

**Universidad Complutense de Madrid**  
**Universidad Nacional de Educación a Distancia**



Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

# MODELADO EN MODELICA DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE FIRMES

Memoria presentada por  
Belén Cadavid Jáuregui

Bajo la dirección de  
Alfonso Urquía Moraleda

Curso Académico 2013/14  
Septiembre 2014

**Proyecto Fin de Máster**  
**Máster en Ingeniería de Sistemas y Control**

**MODELADO EN MODELICA DE LA RESPUESTA  
ESTRUCTURAL DE FIRMES**

Proyecto tipo B

Proyecto específico propuesto por el alumno

Memoria presentada por

Belén Cadavid Jáuregui

Bajo la dirección de

Alfonso Urquía Moraleda





## Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado: Belén Cadavid Jáuregui

Firma del alumno

## Resumen

El diseño analítico de firmes se compone de un análisis teórico de la respuesta de la estructura como función de los materiales que la componen, sus espesores y las condiciones de carga aplicada, y un análisis empírico que relaciona esa respuesta con el comportamiento mecánico con el paso del tiempo.

En el análisis teórico se emplean modelos matemáticos que reproducen la respuesta del firme ante la aplicación de cargas. Estos modelos se denominan modelos de respuesta del firme.

La librería *FirmesCarreteras* ha sido desarrollada en Modelica, aplicando la metodología del modelado orientado a objetos, con el propósito de facilitar la creación de modelos sencillos y reutilizables de respuesta del firme. Están basados en los distintos tipos de comportamiento, mecánico y térmico, que presentan los materiales.

En esta primera versión de la librería se han modelado dos tipos de comportamiento: el comportamiento elástico presentado por los suelos y el comportamiento visco-elástico presentado por las mezclas bituminosas.

En el comportamiento elástico se modela la variación del módulo de rigidez del suelo debido al confinamiento y el efecto producido por la anisotropía tangencial del material.

El comportamiento visco-elástico modelizado depende de la variación del módulo dinámico de la mezcla con respecto a la temperatura y la frecuencia de carga según la curva maestra del material.

Las validaciones se realizan comparando el comportamiento teórico con el simulado y mediante el uso de datos de la bibliografía. Estas confirman el buen funcionamiento de la curva maestra para simular las tensiones y deformaciones del material.

Por último se modela y simula un caso de estudio formado por una estructura bi-capa, una capa de material visco-elástico y otra de material elástico, sobre la que se aplica una carga dinámica. Los resultados se comparan con los obtenidos con BISAR, resultando en una infravaloración de las deformaciones verticales de los suelos que puede ser debido a la consideración del efecto del confinamiento del material.

## Palabras clave

Modelización física, modelos firmes carretera, mezcla bituminosa, diseño de firmes, frecuencia reducida, curva maestra, viscoelasticidad

## Abstract

Mechanistic-Empirical (M-E) pavement design involves mechanistic and performance analysis of the pavement. The mechanistic part is directed to calculating the responses in the pavement structure as a function of material properties, layer thicknesses and loading conditions. These responses must be related to observed performance.

In the mechanistic part, several mathematical models are used to model the pavement response under dynamic or static loads. These models are called pavement response models.

The library called *FirmesCarreteras* has been developed in Modelica using Object-Oriented modeling methods with the aim to design faster different reusable pavement response models. These are based on the mechanical and thermal behaviors of materials that are modeled making analogies with mechanical and thermal systems.

For this first version of the library, two mechanical behaviors are modeled: the elasticity of the granular materials and the viscoelasticity of the asphalt concrete.

The dependence of shear modulus properties with depth has been taken into account in the elastic behavior as well as the horizontal anisotropy of soils used in this kind of structure.

The viscoelasticity has been modeled related to the variation of the dynamic modulus of the asphalt concrete with the combined effect of temperature and load frequency, reduced frequency load, using the master curve of the material.

The validation of the components of the library have been carried out evaluating

To evaluate the correct performance of the components has been used bibliographic data and theoretical behaviors. These validations turn out in the good fit of the master curve to simulate strain and stresses.

Finally, a model of two layers, one of them elastic and the other viscoelastic, has been simulated in order to compare the results to BISAR. This comparison turns out in underestimation of the vertical soil strains and stresses, probably as a result of considering the confined effect.

## Keywords

Physic modeling, asphalt pavement design, asphalt concrete, viscoelasticity, reduced frequency load, master curve, dynamic modulus

# Índice

---

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción y objetivos .....</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción .....	1
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Estructura de la memoria del Proyecto.....	5
<b>Capítulo 2</b>	<b>Herramientas de diseño y evaluación de firmes de carreteras .....</b>	<b>7</b>
2.1	Introducción .....	7
2.2	Dimensionamiento de firmes .....	7
2.3	Dimensionamiento analítico del firme: modelos de respuesta y modelos de comportamiento .....	10
2.3.1	Procedimiento general de dimensionamiento .....	11
2.3.2	Modelos de respuesta .....	15
2.3.3	Modelos de comportamiento .....	18
2.4	Lenguaje de modelado Modelica.....	20
2.5	Dymola: entorno de modelado de Modelica .....	21
2.6	Conclusiones .....	23
<b>Capítulo 3</b>	<b>Modelado de la respuesta estructural de un firme de carretera .....</b>	<b>25</b>
3.1	Introducción .....	25
3.2	Estructura de los firmes de carreteras.....	25
3.2.1	Los materiales empleados en la construcción de las secciones de firme .....	29
3.2.2	Propiedades mecánicas de los materiales empleados en el diseño de firmes.....	31
3.2.3	Amortiguamiento de los materiales .....	39
3.3	Aplicaciones de carga sobre la estructura .....	40
3.3.1	Magnitud de la carga transmitida al firme .....	41

3.3.2	Naturaleza dinámica y cíclica de las cargas .....	41
3.3.3	Velocidad del vehículo y tiempo de carga.....	43
3.4	Interacción con el entorno .....	44
3.4.1	Interacción mecánica con el entorno .....	44
3.4.2	Interacción debido a las variaciones climáticas con el entorno .....	45
3.5	Fenómenos mecánicos modelados .....	50
3.5.1	Modelización de los suelos granulares, los suelos cohesivos y las zahorras.....	54
3.5.2	Modelización de las mezclas bituminosas .....	58
3.5.3	Modelización del amortiguamiento del material .....	62
3.6	Fenómenos térmicos modelados .....	67
3.6.1	Transferencia de calor debido al mecanismo de convección .....	68
3.6.2	Transferencia de calor debido al mecanismo de radiación.....	68
3.6.3	Transferencia de calor debido al mecanismo de conducción .....	69
3.6.4	Temperatura variable y fija.....	70
3.7	Simplificaciones e hipótesis de modelado .....	70
3.7.1	Simplificaciones e hipótesis en la consideración de la estructura .....	72
3.7.2	Simplificaciones e hipótesis en la consideración de la carga .....	73
3.7.3	Simplificaciones e hipótesis en la consideración del entorno .....	73
3.8	Conclusiones .....	74
<b>Capítulo 4 Librería FirmesCarreteras.....</b>		<b>77</b>
4.1	Introducción .....	77
4.2	Desarrollo de la librería .....	77
4.2.1	Sistema físico estudiado .....	77
4.2.2	Arquitectura de la librería .....	82
4.3	Modelado de la carga.....	83
4.4	Modelado de la estructura.....	85
4.5	Modelado del entorno .....	91
4.6	Modelos para validaciones y casos de estudio.....	92

4.6.1 Modelos para la validación de los componentes de la estructura .....	92
4.7 Documentación librería .....	95
4.8 Conclusiones .....	96
<b>Capítulo 5 Validación de las distintas partes del sistema.....</b>	<b>97</b>
5.1 Introducción .....	97
5.2 Procedimiento de validación.....	97
5.3 Validaciones de las cargas aplicadas.....	99
5.3.1 Método 1: ValidacionCarga1 .....	100
5.3.2 Método 2: ValidacionCarga2.....	103
5.3.3 Resultados validación aplicación de la carga .....	104
5.4 Validaciones de las estructuras.....	109
5.4.1 Validación de los comportamientos .....	109
5.4.2 Validación de las sub-capas.....	132
5.4.3 Validación de las capas.....	139
5.5 Validaciones del entorno .....	147
5.5.1 Validación del entorno mecánico .....	148
5.5.2 Validación del entorno térmico.....	150
5.6 Conclusiones .....	153
<b>Capítulo 6 Simulación de la respuesta estructural de un de firme .....</b>	<b>157</b>
6.1 Introducción .....	157
6.2 Sistema físico planteado .....	157
6.2.1 Condiciones de contorno.....	159
6.2.2 Condiciones del entorno.....	160
6.2.3 Parametrización del modelo.....	160
6.3 Simulación de la respuesta del modelo .....	161
6.3.1 Problema del reinicio.....	161
6.3.2 Condiciones de simulación.....	162
6.3.3 Ajuste de los parámetros del modelo.....	163

6.3.4 Resultados obtenidos .....	164
6.4 Conclusiones .....	166
<b>Capítulo 7 Conclusiones y líneas de trabajo futuras .....</b>	<b>169</b>
7.1 Introducción .....	169
7.2 Conclusiones .....	169
7.3 Líneas de trabajo futuras.....	173
Anexo A. Librería <i>FirmesCarreteras</i> .....	183
Índice de figuras .....	V
Índice de tablas .....	XI
Símbolos, siglas y abreviaturas.....	179
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>V</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>XI</b>
<b>Símbolos, siglas y abreviaturas.....</b>	<b>179</b>
<b>Anexo A. Librería <i>FirmesCarreteras</i>.....</b>	<b>183</b>

# Índice de figuras

---

Figura 1.1 Capas que conforman la estructura de una carretera	1
Figura 1.2 Ejemplo de soluciones constructivas de firmes presentes en el Catálogo de firmes del Ministerio de Fomento	2
Figura 1.3 Pista de Ensayo Acelerado de Firmes del CEDEX	3
Figura 2.1 Dimensionamiento de firmes	8
Figura 2.2 Tensiones y deformaciones al paso de la carga	10
Figura 2.3 Deterioros considerados en el cálculo analítico	12
Figura 2.4 Procedimiento general para el dimensionamiento analítico	13
Figura 2.5 Distinta tipología de camiones en función de sus ejes	15
Figura 2.6 Macizo multicapa elástico lineal bajo carga circular estática apoyado sobre un macizo de Boussinesq	16
Figura 2.7 Modelización de la carga	18
Figura 2.8 Cálculo del mecanismo crítico de deterioro del firme diseñado	20
Figura 2.9 Pantalla en la que se componen los modelos mediante arrastre de las clases definidas en las librerías y conexión entre ellas	22
Figura 3.1 Estructura de una carretera: firme más explanada	26
Figura 3.2 Catálogo para el diseño de la construcción de la explanada	29
Figura 3.3 Catálogo para el diseño de las secciones de firme	30
Figura 3.4 Esfuerzos o tensiones normales y tangenciales o de corte	32
Figura 3.5 Deformaciones en las distintas direcciones	33
Figura 3.6 Tipos de suelos y zahorras	37
Figura 3.7 Testigo de mezcla bituminosa	37
Figura 3.8 Diferencia en el valor de la deflexión entre vehículos de distinta carga	40
Figura 3.9 Estado tensional de un elemento del firme durante el paso de un vehículo	42

Figura 3.10 Tensiones originadas por el paso de un vehículo. Naturaleza cíclica.	43
Figura 3.11 Representación de un volumen discreto de material	45
Figura 3.12 Diferentes zonas dependiendo de sus temperaturas	47
Figura 3.13 Diferentes zonas dependiendo de su precipitación media anual	48
Figura 3.14 Mecanismos de transferencia de calor entre el firme y su entorno	49
Figura 3.15 Sistema de coordenadas seleccionado	51
Figura 3.16 Volumen de control de la capa que forma la estructura	52
Figura 3.17 Esfuerzos en reposo debidos al peso propio	55
Figura 3.18 Modelo de Kelvin-Voight para representar el comportamiento viscoelástico	59
Figura 3.19 Respuesta del modelo de Kelvin-Voight ante un esfuerzo constante	60
Figura 3.20 Respuesta de la mezcla con distinta temperatura	61
Figura 3.21 Conexión del amortiguador que simula el amortiguamiento estructural de la Sub_Capa	63
Figura 3.22 Amortiguamiento estructural del material	65
Figura 3.23 Distribución de tensiones bajo una base cuadrada	66
Figura 3.24 Aplicación del amortiguamiento geométrico en cada Capa	67
Figura 3.25 Tensiones y deformaciones dentro de la sub-capa	71
Figura 4.1 Sistema físico estudiado	78
Figura 4.2 Modelado del espacio geométrico de la estructura	78
Figura 4.3 Modelización de la carga sobre la estructura	79
Figura 4.4 Volumen de control de la estructura formado por composición de modelos menores	80
Figura 4.5 Condiciones de variación de los parámetros de los modelos atómicos	81
Figura 4.6 Arquitectura de la librería FirmesCarreteras	82
Figura 4.7 Arquitectura del paquete Carga	83

Figura 4.8 Modelado de la Fuerza Aplicada	84
Figura 4.9 Arquitectura del paquete estructura	85
Figura 4.10 Modelización del comportamiento de un material visco-elástico	86
Figura 4.11 Modelización de una Sub_Capa	88
Figura 4.12 Modelización de la Capa a través de modelos más sencillos de Sub_Capa	90
Figura 4.13 Arquitectura del paquete Entorno	91
Figura 4.14 Modelo realizado para la validación de los componentes	93
Figura 4.15 Modelo para simulación de un caso real	94
Figura 4.16 Modelo para la simulación de la temperatura en la superficie	95
Figura 5.1 Procedimiento de validación seguido en este proyecto	98
Figura 5.2 Ejemplo que simula la aplicación de una carga sobre una estructura mediante el método1	101
Figura 5.3 Simulación del paso de dos vehículos por el método1	102
Figura 5.4 Ejemplo que simula la aplicación de carga sobre la estructura	103
Figura 5.5 Movimiento de la masa de material ante la aplicación de carga en el eje x	105
Figura 5.6 Movimiento de la masa de material ante la aplicación de la carga en el eje z	105
Figura 5.7 Módulo de la fuerza total aplicada al variar la velocidad. Intervalo de simulación de 500	106
Figura 5.8 Errores cometidos para la fuerza aplicada en función de la velocidad	108
Figura 5.9 Señal senoidal de 0.3 Hz y 40 Hz para un intervalo de integración de 5000	109
Figura 5.10 Comportamiento de la masa inercial en el eje horizontal	111
Figura 5.11 Comportamiento de la masa inercial en el eje vertical	112
Figura 5.12 Movimiento de la masa ante la aplicación de una fuerza vertical	113
Figura 5.13 Sistema masa-muelle	114
Figura 5.14 Deformaciones a diferente frecuencia de carga	117

Figura 5.15 Curva tensión-deformación del comportamiento elástico	118
Figura 5.16 Comprobación del ensayo de fluencia	119
Figura 5.17 Variación de la deformación de la mezcla con la temperatura a una frecuencia de 1 Hz	122
Figura 5.18 Variación de la deformación debido a la variación del módulo por la temperatura a 1 Hz	123
Figura 5.19 Variación de la deformación debido a la variación de la frecuencia de carga	124
Figura 5.20 Se establece una temperatura intermedia entre los planos de control	125
Figura 5.21 Modelo de validación del amortiguamiento estructural	128
Figura 5.22 Amortiguamiento con parámetros aplicados a la masa o a los módulos	129
Figura 5.23 Variación deflexión y deformación horizontal con los coeficientes de amortiguamiento aplicados independientemente	130
Figura 5.24 Variación deflexión y deformación horizontal con los coeficientes de amortiguamiento aplicados conjuntamente	131
Figura 5.25 Deformaciones producidas en la sub-capa	133
Figura 5.26 Tensiones verticales y horizontales con carga vertical	134
Figura 5.27 Deformaciones producidas al aplicar carga en ambos ejes	135
Figura 5.28 Diferencias entre la respuesta en deformaciones horizontales debido a la variación con la temperatura	137
Figura 5.29 Variación de la deformación horizontal debido a la variación de la velocidad del vehículo	138
Figura 5.30 Eliminación del peso de la estructura al reiniciar las variables de estado	140
Figura 5.31 Estructura formada por una capa elástica encima de un suelo rígido	141
Figura 5.32 Resultados del BISAR y de Modelica para la capa elástica	144
Figura 5.33 Curva de deformación horizontal en Modelica y por VEROAD	146

Figura 5.34 Temperaturas a distintas profundidades dentro de la mezcla bituminosa	147
Figura 5.35 Validación del entorno mecánico de los suelos	149
Figura 5.36 Variación de la temperatura	150
Figura 5.37 Validación de la resolución de la ecuación de balance energético en la superficie del firme	151
Figura 5.38 Simulación de la variación diaria de temperatura en la superficie del firme y en su interior	152
Figura 6.1 Modelo de simulación de una estructura de firme	158
Figura 6.2 Parámetros del suelo	160
Figura 6.3 Efecto de la reinicialización de las variables	162
Figura 6.4 Condiciones de simulación	163
Figura 6.5 Distribución de temperaturas dentro de la estructura	166



# Índice de tablas

---

Tabla 3.1 Categorías de explanadas	27
Tabla 3.2 Relación entre $e$ y $k_2$ y $D_r$ y $k_2$	57
Tabla 4.1 Variables tensodeformacionales para cada sub_capa	89
Tabla 5.1 Errores en la reproducción de la fuerza aplicada con la velocidad	107
Tabla 5.2 Resultados variando el módulo de Young y manteniendo fija la carga	116
Tabla 5.3 Resultados variando la carga aplicada y manteniendo el módulo	116
Tabla 5.4 Parámetros del modelo de Kelvin-Voight	120
Tabla 5.5 Características de la carga, el firme y el material	145
Tabla 5.6 Temperaturas máximas de obtenidas en la simulación	153
Tabla 6.1 Valores finales de los parámetros ajustados en el modelo	164
Tabla 6.2 Variables tenso-deformacionales en los puntos de cálculo de cada capa	165

Modelado en Modelica de la respuesta estructural de firmes

# Capítulo 1 Introducción y objetivos

## 1.1 Introducción

Las carreteras son estructuras en ocasiones no muy vistosas, como podrían ser los edificios, pero sí imprescindibles en el desarrollo de las sociedades, ya que permiten el acceso a distintos tipos de servicios básicos como son los hospitales, los centros educativos, los centros administrativos, etc. También posibilitan la comunicación entre distintas comunidades separadas geográficamente (Alarcón Ibarra, 2003).

Las carreteras están formadas por la disposición horizontal de distintas capas de materiales, con diferente comportamiento mecánico, superpuestas y apoyadas sobre una explanada mejorada (véase Figura 1.1). La función de la carretera es doble: por una parte debe proporcionar una superficie cómoda y segura para la circulación de los vehículos, y por otro lado debe transmitir las cargas debidas al tráfico, suficientemente amortiguadas a la explanada como para que puedan ser soportadas por esta (Ruiz, 2010).



Figura 1.1 Capas que conforman la estructura de una carretera

Debido a estas dos funciones que debe cumplir la estructura se tienen que tener en cuenta dos aspectos fundamentales en el diseño de firmes: por un lado la resistencia de la estructura, que condicionará los materiales y espesores que deberán utilizarse en el diseño y construcción de la misma, y por otro la comodidad y seguridad que debe aportar a la circulación, que definirá las condiciones de textura y acabado que se exigirán a las capas superiores para que la carretera cumpla esas funciones (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000a).

En España el Ministerio de Fomento exige a los agentes constructores de este tipo de infraestructuras que los materiales que componen el firme cumplan con una serie de requisitos imprescindibles para asegurar una calidad determinada. Existe un catálogo de firmes (véase Figura 1.2) en el que, dependiendo del tipo de tráfico y del tipo de explanada, se presentan distintas soluciones constructivas que son equivalentes en cuanto a su comportamiento estructural (Carreteras, 2003).

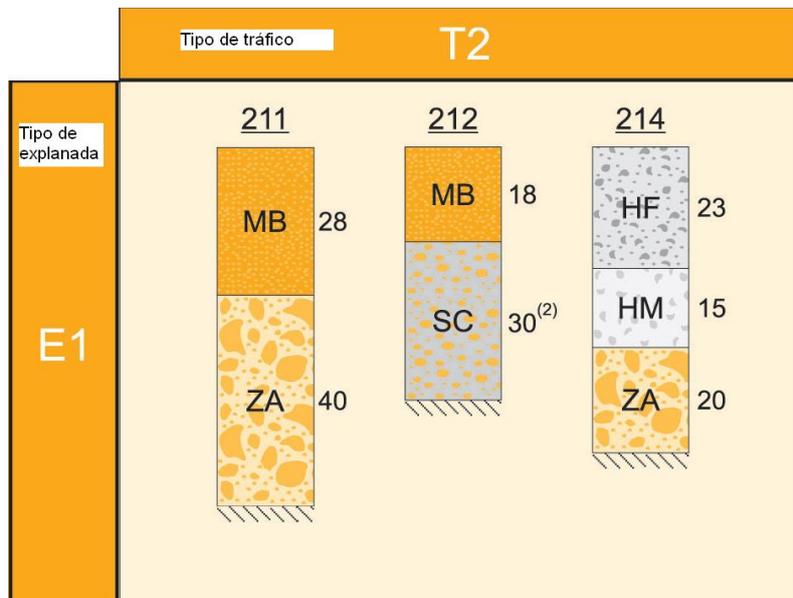


Figura 1.2 Ejemplo de soluciones constructivas de firmes presentes en el Catálogo de firmes del Ministerio de Fomento

Este catálogo es una herramienta útil para el diseño de los firmes y es fruto del estudio analítico y experimental de las distintas soluciones, tanto por parte del Ministerio de Fomento como del Centro de Estudios del Transporte.

El Centro de Estudios del Transporte, perteneciente al CEDEX, organismo autónomo del Ministerio de Fomento, cuenta entre sus instalaciones con una Pista de Ensayo Acelerado de Firmes. Desde su inauguración en 1988 se han llevado a cabo estudios del comportamiento estructural de distintas secciones del catálogo de firmes, así como

de soluciones alternativas, de forma que este catálogo ha sido modificado en base a la experiencia y el estudio experimental de algunas de las soluciones planteadas.

En la Pista de Ensayo Acelerado de Firmes del CEDEX (véase Figura 1.3) todas las secciones construidas son instrumentadas con el objetivo de obtener las medidas de las variables tenso-deformacionales, es decir de las tensiones y deformaciones, que se producen al paso de la carga en las distintas capas que componen la carretera. Estas medidas sirven para la validación y el desarrollo de modelos matemáticos de respuesta y de comportamiento estructural de los firmes (Mateos, de la Fuente Martín y Pérez Ayuso, 2008).



**Figura 1.3 Pista de Ensayo Acelerado de Firmes del CEDEX**

El estudio experimental del comportamiento del firme requiere de un tiempo y coste considerable, incluso en las Pistas de Ensayo Acelerado (APT Facility). Además, los datos son difíciles de extrapolar a otro tipo de condiciones distintas a las del ensayo. Esto provoca que la modelización y simulación de la respuesta y el comportamiento de un firme de carreteras sean unas herramientas muy útiles tanto en el dimensionamiento como en el estudio del deterioro de este tipo de estructuras, ya que se obtienen resultados en un corto periodo de tiempo y con un coste mucho menor (Mateos Moreno, 2003).

La creciente incorporación de nuevos materiales en este tipo de estructuras, materiales tratados, materiales reciclados (escorias de acería, mezclas con polvo de neumático,...), etc., y la evolución de la tecnología de computación ha provocado que cada vez se use más la modelización matemática para el diseño y estudio de las

carreteras ya que permite reproducir distintas hipótesis de cálculo y comparar los resultados (Mateos Moreno, 2010).

Debido a todo lo expuesto anteriormente, disponer de una herramienta como una librería en Modelica para poder modelar el comportamiento de este tipo de estructuras de forma versátil, de forma que la inclusión de materiales con nuevos comportamientos resulte sencilla, sería muy útil como complemento a los estudios sobre las carreteras que se llevan a cabo en la Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX y en el Centro de Estudios del Transporte.

## 1.2 Objetivos

Los objetivos perseguidos en este Proyecto se presentan a continuación:

- El objetivo central será el desarrollo de una librería que permita la construcción de un modelo físico para simular la respuesta estructural de los firmes de carreteras ante la solicitación de cargas dinámicas, de forma que se puedan obtener los valores de las variables tenso-deformacionales, tensiones y deformaciones, para cada componente de la estructura que debido a un proceso de cargas repetidas, un proceso de fatiga, provoca el deterioro de la estructura.
- Para ello se llevará a cabo una revisión de los distintos tipos de modelos de respuesta existentes para este tipo de sistemas.
- Se realizará la validación cualitativa del comportamiento de los elementos de la librería.
- Se incluirá dentro del modelo el efecto que produce la temperatura en las propiedades que caracterizan a los materiales que componen la estructura. Los parámetros que se utilizan en la modelización del comportamiento de los materiales son su módulo de elasticidad, su coeficiente de Poisson y el módulo complejo o dinámico en el caso de los materiales con comportamiento viscoso.
- Para cumplir el objetivo anterior se calcularán los perfiles de temperatura de la estructura a partir de las condiciones climáticas del entorno en el que se simula.
- Se realizará un caso práctico de construcción de un modelo sencillo y se realizará la comprobación de las tensiones obtenidas con Modelica y las obtenidas con otro programa de cálculo de respuesta de firmes (BISAR).
- El objetivo final será la modelización de distintos tipos de comportamientos de los materiales de forma que sea sencilla la reutilización y construcción de distintos

modelos de respuesta utilizando las ventajas que presentan Modelica y Dymola frente a otros lenguajes y entornos de modelado.

## 1.3 Estructura de la memoria del Proyecto

El Proyecto se ha estructurado en siete capítulos y un anexo. A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos:

**Capítulo 1.** En este capítulo se explica la motivación, los objetivos y la estructura del presente Proyecto fin de Máster.

**Capítulo 2.** En este capítulo se realiza una revisión del estado del arte de las herramientas de diseño y evaluación que se utilizan para este tipo de estructuras, centrandó el contenido en las herramientas analíticas. Por último se introduce el lenguaje de modelado empleado en este proyecto, Modelica, y el entorno de simulación utilizado Dymola.

**Capítulo 3.** En este capítulo se realiza una breve introducción a los firmes de carreteras y a la modelización de la respuesta estructural de los mismos, se presentan las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada una de las partes que interviene en el modelado teniendo en cuenta una serie de hipótesis y simplificaciones.

**Capítulo 4.** Este capítulo presenta el sistema físico de estudio y se centra en la descripción de la librería, su estructura y los componentes que la forman. La librería está dividida en distintos paquetes de componentes agrupados en función de sus características y utilidades. Se presentan también ejemplos de modelos construidos con esta librería.

**Capítulo 5.** En este capítulo se lleva a cabo la validación cualitativa de cada una de los componentes que intervienen en el modelo de respuesta de un firme y el procedimiento que se ha seguido.

**Capítulo 6.** En este capítulo se lleva a cabo la simulación de un caso práctico de firmes de carreteras, y se comparan los resultados obtenidos mediante el empleo de otro modelo existente de respuesta estructural de firmes de carreteras (BISAR).

**Capítulo 7.** En este capítulo se presentan las conclusiones del proyecto y las líneas futuras que se podrían llevar a cabo para dar continuidad al trabajo desarrollado.

**Anexo A.** Este anexo contiene el código Modelica de la librería desarrollada para la construcción de los modelos de respuesta de firmes de carreteras.



# Capítulo 2 Herramientas de diseño y evaluación de firmes de carreteras

## 2.1 Introducción

En este capítulo se presentan los métodos de dimensionamiento de firmes. De entre todos ellos, el capítulo se centra en los métodos analíticos que sirven para el diseño y la evaluación de los firmes. Los métodos analíticos utilizan modelos matemáticos para el cálculo de tensiones y deformaciones, los denominados modelos de respuesta. Uno de los objetivos de este proyecto es el desarrollo de una librería en Modelica que permita crear distintos tipo de modelo de respuesta. Es por ello que el lenguaje de modelado Modelica se presenta en este capítulo también junto con el entorno de modelado Dymola, que ha sido el utilizado para llevar a cabo la simulación de los distintos modelos creados.

## 2.2 Dimensionamiento de firmes

El dimensionamiento de firmes es una parte del proyecto de diseño de carreteras que consiste en determinar los materiales que conforman las distintas capas de la estructura y sus espesores, con el fin de que la carretera soporte la carga del tráfico para el cual se proyecta y los deterioros que este provoca, durante una vida de servicio determinada (Ruiz, 2010).

Los materiales, sus espesores y su composición dentro del firme se eligen en función de las características del proyecto (véase Figura 2.1).

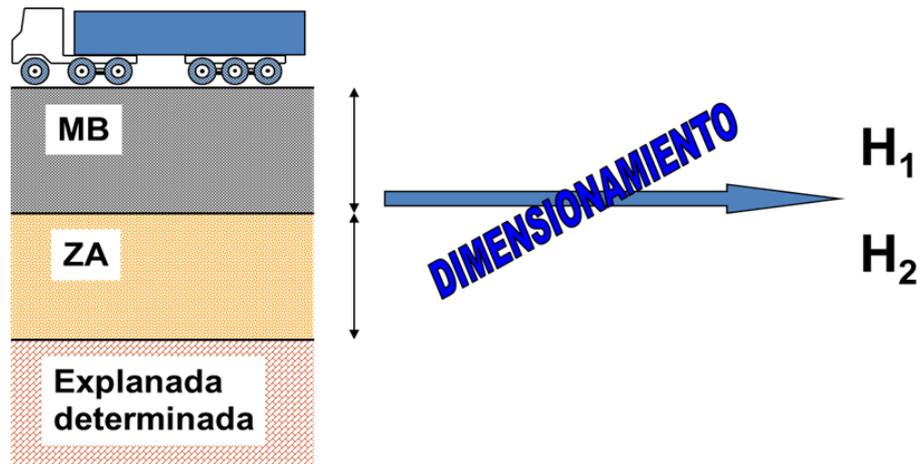


Figura 2.1 Dimensionamiento de firmes

Los métodos de dimensionamiento utilizan como datos de entrada:

- El tráfico que se prevé que soportará el firme durante su vida útil. Solamente se tiene en cuenta el tráfico pesado, que es el que da lugar a la rotura y deformación de las capas de firme.
- La capacidad de soporte de los suelos sobre los que se construye el firme. Esa parte es la denominada explanada.
- Las propiedades mecánicas de los materiales de cada una de las capas del firme, ya que condicionan su comportamiento estructural.
- La climatología, ya que hay variables ambientales como la humedad y la temperatura que afectan al comportamiento mecánico de los materiales que conforman la estructura.

También se tienen en cuenta otro tipo de variables que puedan afectar al comportamiento del firme como puede ser la geometría de la carretera, la disposición de elementos como glorietas, carriles lentos, etc.

Como resultado de la aplicación de los métodos de dimensionamiento se obtiene:

- La definición del firme a través de los materiales, sus espesores y la composición dentro de la estructura.
- Las condiciones tanto climatológicas como de tráfico para las cuales se ha obtenido esa definición de firme.

Los métodos de dimensionamiento se pueden clasificar en tres grupos: los métodos empíricos, los analíticos y los catálogos.

Los métodos empíricos son aquellos que se basan en la observación del comportamiento del firme en tramos reales o en Pistas de Ensayo. Estos métodos presentan el inconveniente de la extrapolación de los resultados a otras condiciones

diferentes a aquellas en las que se llevaron a cabo (Pérez Ayuso, Cadavid Jáuregui, Marrón Fernández y Gutiérrez-Bolívar Álvarez, 2013).

Los métodos analíticos consisten en determinar las tensiones y deformaciones críticas a través de un modelo matemático, denominado modelo de respuesta, y a continuación estas tensiones y deformaciones críticas de la estructura se utilizan en los modelos de comportamiento para obtener el número de cargas que puede soportar la estructura antes de producirse el fallo. Esos modelos tienen una calibración empírica pero tienen la ventaja de poder tratar distintas condiciones del firme (Mateos Moreno, 2003).

Por último los catálogos son métodos basados en un conocimiento empírico y/o analítico que lo que presentan son tablas de doble entrada, por un lado el tipo de tráfico que se prevé que tenga que soportar el firme, y por otro el tipo de explanada sobre la que se asienta, y en función de esos factores se presentan estructuras de firme que son equivalentes con los tipos de materiales, espesores y composición dentro de las capas (Ruiz, 2010).

En España existe una instrucción de firmes de nueva construcción, que ha sido objeto de distintas modificaciones con el paso de los años, la Norma 6.1 IC "Secciones de firme". Esta instrucción contiene tanto las especificaciones técnicas de los materiales empleados en la construcción de carreteras como un catálogo de secciones de firme con las distintas soluciones de diseño propuestas, en función del tráfico que se prevé que tendrá que soportar la carretera y el tipo de explanada sobre la que se asienta.

Debido a las diferencias de tráfico entre la red de carreteras del Estado y las redes autonómicas a partir de los años 90 aparecieron métodos de dimensionamiento autonómicos propios, tendencia que continúa en la actualidad.

Al ser la carretera una estructura que se encuentra condicionada a los momentos socio-económicos de los países, ya que repercute tanto en la inversión en mantenimiento como en el uso que se hace de ella o los materiales que se utilizan (por ejemplo, en épocas de crisis el tráfico pesado disminuye), hay una tendencia hacia los métodos de dimensionamiento analítico, ya que proporcionan mayor flexibilidad en el diseño de este tipo de estructuras que, por ejemplo, los catálogos (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000a).

## 2.3 Dimensionamiento analítico del firme: modelos de respuesta y modelos de comportamiento

Cuando un neumático se desplaza por la superficie de una carretera, un punto cualquiera de la sección estructural situado por delante de la carga se ve sometido a unas tensiones, cuya forma general viene dada en la Figura 2.2. La magnitud de las tensiones y deformaciones depende del tipo, magnitud y velocidad de la carga, constitución del firme, tipo de explanada, temperatura, profundidad del elemento considerado, etc.

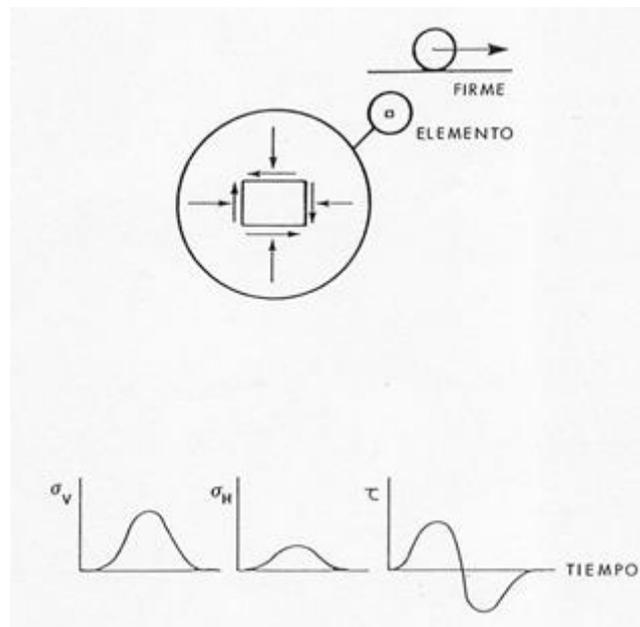


Figura 2.2 Tensiones y deformaciones al paso de la carga

Si los firmes se encuentran bien contruidos, las tensiones que sufren los distintos elementos del firme son inferiores a las de rotura. El fallo, es decir cuando la estructura ya no puede desempeñar la función para la que está concebida, se produce por la repetición de las sollicitaciones, que producen un fenómeno de fatiga (Mateos Moreno y Pérez Ayuso, 2010).

Se denomina respuesta del firme ante el paso de la carga al conjunto de tensiones y deformaciones que se producen en las distintas capas de la estructura. La acumulación de estas deformaciones y tensiones debido a un proceso de fatiga es lo que provoca el fallo estructural de la capa. El tipo de proceso de fatiga es característico del material (suelos, roca, mezcla bituminosa, etc.) y de su posición dentro de la estructura. Ello determinará el punto de cálculo de esas tensiones y deformaciones.

Los deterioros se pueden producir en cualquiera de los componentes del firme, dependiendo de donde se produzcan resultaran en un tipo diferente de fallo de la estructura.

El dimensionamiento analítico del firme consiste en el cálculo de las tensiones y deformaciones que soportan los materiales que conforman las distintas capas del firme en estudio bajo el paso de la carga, de forma que se pueda evaluar si éste es adecuado para las condiciones de tráfico, clima y explanada a las que estará expuesto durante su vida útil (Mateos Moreno, 2003).

La vida útil de un firme se define como el periodo de tiempo durante el cual no se producirán deterioros que provoquen el fallo de la estructura.

Los métodos de dimensionamiento analítico se componen de dos tipos de modelos: un modelo de respuesta, con el que se calculan las tensiones y deformaciones críticas y un modelo de comportamiento, que incluye las leyes de fatiga que relacionan los parámetros críticos de cada material con el número máximo de cargas soportadas por este.

Hay una serie de criterios de dimensionamiento que deben tenerse en cuenta. Aquellos que se contemplan en los métodos analíticos son los siguientes:

- Las deformaciones de la explanada no deben ser excesivas por lo que el firme debe soportar las cargas de tráfico amortiguando las tensiones y deformaciones que llegan a la explanada.
- Las capas con materiales ligantes, como las mezclas bituminosas o materiales tratados con conglomerantes, deben soportar las cargas del tráfico sin que se produzcan agrietamientos.

### **2.3.1 Procedimiento general de dimensionamiento**

El procedimiento general de dimensionamiento analítico consta de dos pasos necesarios: el cálculo de las tensiones y deformaciones del firme y a continuación con esos valores de tensiones y deformaciones se calcula el número de aplicaciones de carga que soporta la estructura antes del fallo.

Hay que tener en cuenta que los firmes se deterioran de forma distinta dependiendo de su composición. Esto conlleva que se tiene que emplear un modelo de comportamiento distinto dependiendo de la tipología del firme a dimensionar (Mateos Moreno, 2003).

Generalmente se consideran dos formas de deterioro que establecen los criterios de fallo en el cálculo analítico (véase Figura 2.3):

- La deformación permanente que se acumula en la superficie del firme debida a la deformación de la explanada y las variaciones climáticas.
- La fisuración de los materiales con algún tipo de ligante, como las mezclas bituminosas.



Deformación de la explanada



Fisuración de la mezcla

**Figura 2.3 Deterioros considerados en el cálculo analítico**

El procedimiento sigue el esquema general mostrado en la Figura 2.4. Se establecen los parámetros de entrada al modelo de respuesta, estos parámetros son: el tipo de tráfico, la composición del firme indicando los espesores de las distintas capas y la disposición de los materiales, las propiedades mecánicas de estos materiales y las condiciones climáticas.

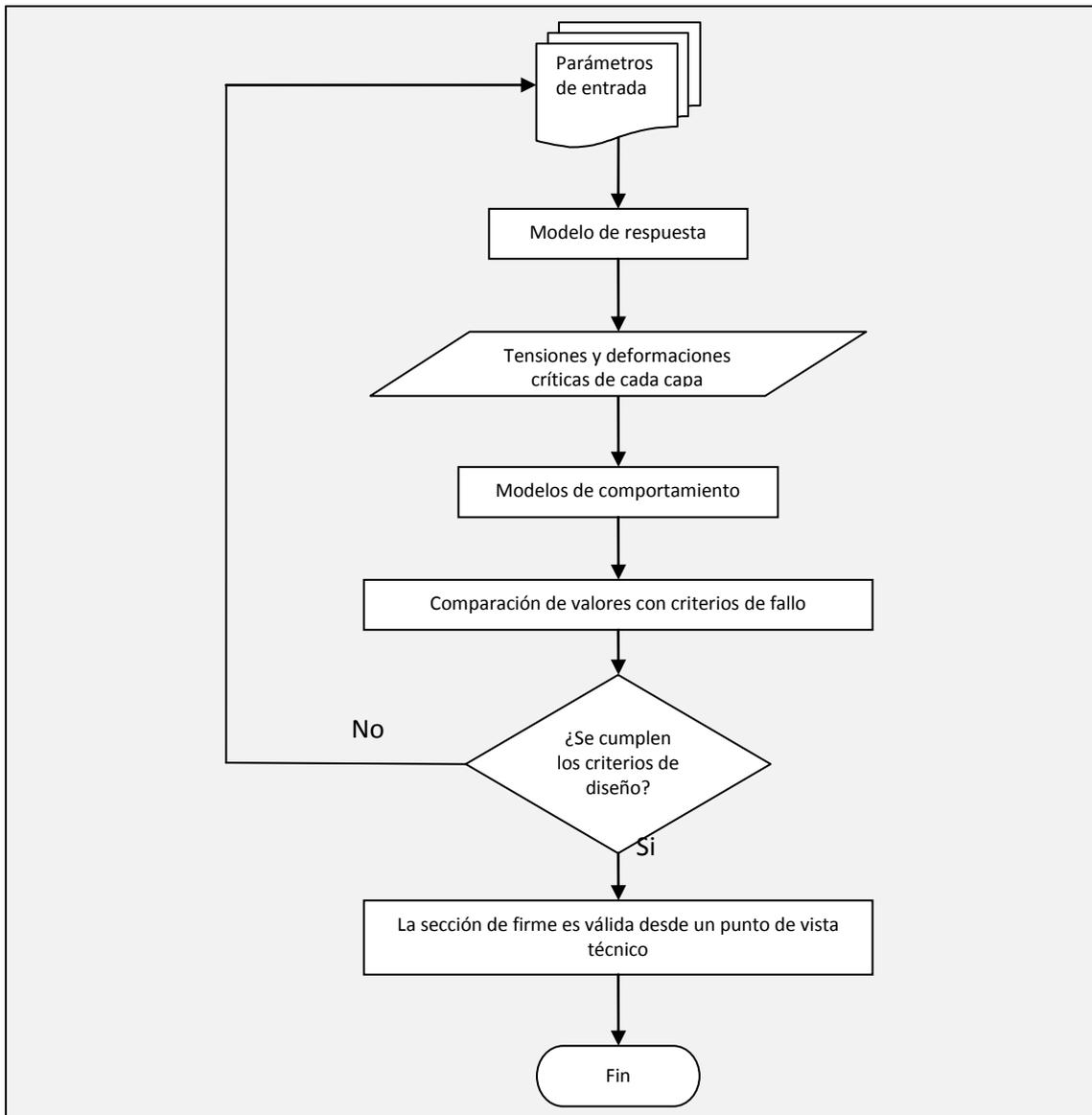


Figura 2.4 Procedimiento general para el dimensionamiento analítico

Una vez que se han definido las entradas al modelo de respuesta se obtienen las tensiones y deformaciones en los puntos críticos de la estructura que provocan el fallo de la misma. Estos valores a su vez sirven de entrada para los distintos modelos de comportamiento considerados. Para terminar se comprueba si el deterioro del firme después de aplicar los modelos de comportamiento es admisible dentro del periodo de cálculo considerado. Si no es así, se repite el proceso variando los parámetros de entrada hasta que se cumpla (Mateos Moreno, 2010).

En este procedimiento no se tienen en cuenta los cambios en las propiedades de los materiales que se producen a lo largo de la vida en servicio del firme.

Para tener en cuenta estos cambios, se puede dividir la vida del firme en distintos periodos en los cuales se consideran constantes las propiedades de los materiales.

Para cada periodo  $j$  se calculan las tensiones y deformaciones que se producen en las distintas capas y el número de aplicaciones de la carga tipo,  $n_j^i$ , que es capaz de soportar para un criterio de fallo  $i$  determinado en ese periodo  $j$ .

Cada periodo aportará un número de aplicaciones de carga distinto para el mismo criterio de fallo  $i$  que irá asociado a un daño relativo del firme que va acumulándose de acuerdo a la **ley de Miner** (Ben-Amoz, 1990). El firme va acumulando el daño de forma lineal a lo largo del tiempo. Entonces, si el firme es capaz de aguantar  $N^i$  aplicaciones de carga antes de fisurarse para un criterio de fallo  $i$ , el daño provocado por este periodo determinado  $j$  dentro de la vida útil será de:

$$D_j = \frac{n_j^i}{N^i} \quad (2.1)$$

El daño acumulado en la sección a lo largo de todos los periodos  $j$  de tiempo considerados será:

$$D = \sum_1^j \frac{n_j^i}{N^i} \quad (2.2)$$

Donde  $j$  representa un periodo determinado. Si el daño acumulado es menor que 1, entonces la sección aguantará sin deteriorarse durante el tiempo total de proyecto. Un valor mucho menor a 1 indica un sobredimensionamiento de la sección, con lo que habría que volver a realizar el procedimiento variando las condiciones iniciales de cálculo.

Las cargas provocadas por los vehículos pesados no son siempre iguales, ya que existe una amplia variedad de vehículos pesados que circulan por las carreteras. Algunos de ellos presentan ejes simples con ruedas normales, otros por el contrario están compuestos por distintos tipos de ejes y ruedas. En la Figura 2.5 se puede observar un ejemplo de los casos expuestos anteriormente: en la figura de la izquierda se tiene un vehículo pesado con dos ejes simples con ruedas normales, y en la figura de la derecha se observa un vehículo con eje simple con ruedas normales en la parte delantera y un eje doble, o tándem, con ruedas gemelas en la parte trasera.



Figura 2.5 Distinta tipología de camiones en función de sus ejes

Para el dimensionamiento de firmes es necesario convertir el flujo de tráfico de una carretera en un número equivalente de cargas de un eje tipo, el cual representa una carga tipo. En España se toma como eje tipo equivalente el eje simple de 13 t con rueda gemela y la carga tipo, entonces, será la que le llegue a cada una de las ruedas, es decir la cuarta parte del peso total del eje (Ruiz, 2010).

### 2.3.2 Modelos de respuesta

En los modelos de respuesta estructural se trata de obtener las deformaciones y tensiones que se producen a distintas profundidades ante el paso de vehículos por encima de la estructura. Estos modelos pueden ser mecánicos, probabilísticos y de regresión.

Los modelos de respuesta mecánicos son los más utilizados y dentro de este grupo se pueden clasificar en dos categorías: los basados en sistemas multicapa y ecuaciones elásticas (Hipótesis de Burmister (Burmister, 1954)), y los basados en elementos finitos (MEF). De los programas basados en técnicas de elementos finitos destacan: el ILLI-PAVE (Raad y Figueroa, 1980), desarrollado por la Universidad de Illinois y el MICH-PAVE (Harichandran, Baladi y Yeh, 1989), desarrollado por la Universidad de Michigan (Qin, 2010).

También existen modelos basados en la formulación de los elementos discretos (MED), desarrollada por Cundall en los años 70 (Cundall and Strack, 1979). Estos modelos se basan en la modelización de los medios continuos como un conjunto de partículas discretas que interaccionan entre sí. Al requerir una gran capacidad de cálculo, no les hizo muy populares en sus inicios, no obstante con la capacidad de computación actuales están cobrando importancia en el estudio de interacciones en el

campo de la ingeniería geotécnica, sobre todo en procesos de desgaste y fractura de los materiales o los suelos debido a la interacción con otros elementos (Burrel Díez, 2003).

En el campo de la modelización de la respuesta de los firmes como problema no se tiene constancia del desarrollo de modelos basados en este tipo de formulación, probablemente porque resultan modelos complejos con demasiados parámetros de ajuste. Si se han utilizado para estudiar algunos procesos como el confinamiento del material, la evolución de las deformaciones plásticas en un ensayo triaxial, etc (Mateos Moreno, 2003).

Aunque cada vez hay más modelos desarrollados con la técnica de elementos finitos gracias a la capacidad de cálculo de los ordenadores actuales, la base de la mayor parte de los modelos de respuesta empleados es la solución presentada por Burmister en 1954 (Burmister, 1954) para un macizo multicapa elástico lineal (véase Figura 2.6) ya que proporciona resultados con la precisión necesaria, la mayor parte de las veces, y son modelos más sencillos y con menor carga de cálculo que los basados en elementos finitos (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000b).

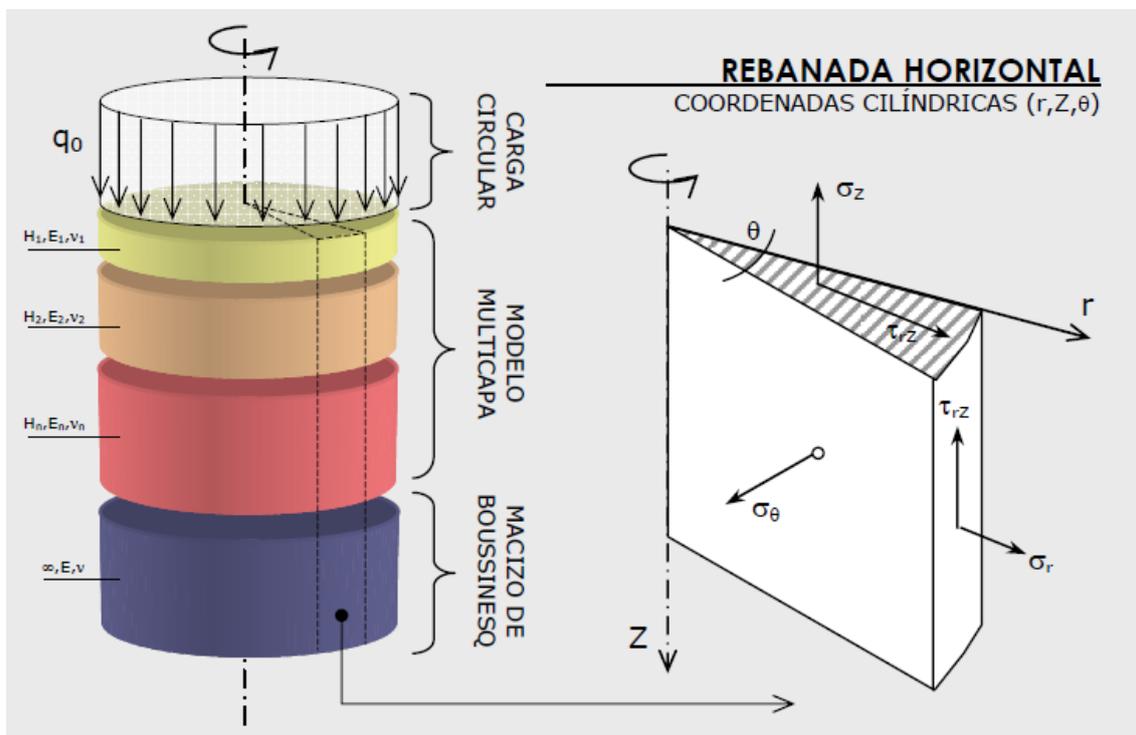


Figura 2.6 Macizo multicapa elástico lineal bajo carga circular estática apoyado sobre un macizo de Boussinesq

En la Figura 2.6 se representa la modelización de la estructura del firme como un sistema multicapa elástico y lineal apoyado sobre un macizo de Boussinesq (1885) en

el cual el cálculo de las tensiones y deformaciones dentro del mismo se realiza a partir de las ecuaciones desarrolladas en la teoría de Boussinesq sobre la distribución de las deformaciones y tensiones dentro de un macizo considerado semi-infinito, elástico, lineal e isótropo.

Burmister se basó en la teoría de Boussinesq para el desarrollo de su solución del problema.

Como ejemplos de programas que utilizan la solución de Burmister están:

- BISAR (De Jong, Peatz and Korswagen, 1973), desarrollado por la empresa Shell.
- ALIZE (Autret, Baucheron De Boissoudy and Marchand, 1982), desarrollado por el LCPC francés (“Laboratoire Central des Ponts et Chaussées”).
- CHEVRON (Warren and Dieckmann, 1963), desarrollado por Chevron Research Company y utilizado por el CEDEX en el dimensionamiento de algunas secciones de la Norma 6.1 IC.
- KENLAYER (Huang, 1967), desarrollado por Yang H. Huang.
- ELSYM5 (Kopperman, Tiller and Tseng, 1986), desarrollado por la Universidad de California-Berkeley.
- EVERSTRESS (Sivaneswaran, Pierce and Mahoney, 1999), desarrollado por la Universidad de Washington.

Las hipótesis que se utilizan en este tipo de programas son:

- Las capas son de espesor constante y extensión horizontal infinita.
- Los materiales que componen cada capa son homogéneos, elásticos, lineales, isótropos y continuos.
- La carga de cada neumático está distribuida de forma uniforme sobre un área de forma circular.
- Las capas pueden estar adheridas completamente o sueltas completamente.
- Se trata en todo momento de un cálculo estático, no dinámico.

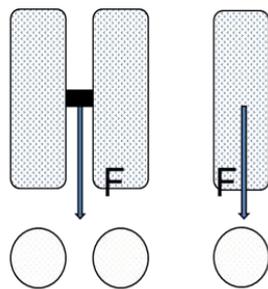
El problema queda definido a través de los parámetros que caracterizan los materiales de cada capa (módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y espesor), el tipo de interfaz entre capas (si existe adherencia o no) y los parámetros de la carga (posición, magnitud, radio y presión de contacto) (Ruiz, 2010).

Normalmente cuando se utilizan estos modelos de respuesta se suele considerar adherencia completa entre capas, la opción de la no adherencia se emplea en estudios de sensibilidad más concretos.

Por otro lado, la modelización de la fuerza aplicada por los neumáticos de los vehículos se realiza considerando superficies circulares uniformemente cargadas (véase Figura 2.7), de forma que la presión de contacto se puede estimar a partir de la huella de los neumáticos:

$$\sigma_p = \frac{F}{\pi \cdot r^2} \quad (2.3)$$

En caso de que la rueda sea gemela la fuerza se reparte entre las dos superficies de los neumáticos.



- Superficie circular
- Presión de contacto uniforme

Figura 2.7 Modelización de la carga

Dependiendo del tipo de firme (flexibles o semirígidos con base de suelo cemento) las variables que hay que calcular con el modelo son diferentes, ya que el deterioro de la estructura se produce debido a un proceso de fatiga que viene determinado por una variable diferente. En el caso de los firmes flexibles hay que calcular las deformaciones horizontales de tracción en el fondo de la capa de mezcla bituminosa ( $\epsilon_{MB}$ ) y las deformaciones verticales de compresión en la coronación de la explanada ( $\epsilon_{EXP}$ ). En el caso de los firmes semirígidos con base de suelo cemento se calculan las tensiones horizontales de tracción en el fondo de la capa de suelocemento ( $\sigma_{SC}$ ) (Mateos Moreno, 2010).

### 2.3.3 Modelos de comportamiento

En los modelos de comportamiento lo que se busca es predecir la evolución en el tiempo de los distintos mecanismos de deterioro que presentan los firmes a lo largo de su vida útil.

Los modelos de comportamiento deben ser calibrados y verificados por zonas para tener en cuenta las distintas variables que afectan al comportamiento y asegurar que se ajustan correctamente a los datos reales de deterioro.

Uno de los mecanismos de deterioro de mayor impacto tanto económico como ambiental, es la fatiga de la mezcla bituminosa que provoca la aparición de fisuras en el firme. Otro mecanismo predominante de deterioro y también costoso en su reparación, es la deformación permanente de la explanada. El control de las deformaciones de la explanada permite controlar el resto de deformaciones, tanto elásticas como plásticas, que se producen en el resto de materiales colocados sobre ella. Estos mecanismos provocan que los parámetros críticos de la estructura sean la deformación vertical en la explanada y la deformación horizontal en el fondo de la capa de mezcla bituminosa (Mateos Moreno, 2010).

Los modelos analíticos de comportamiento del firme predominantes son aquellos basados en leyes de fatiga cuyo resultado es el número de repeticiones de carga tipo,  $N$ , que será capaz de soportar el material estudiado antes de producirse el fallo.

En el caso de la deformación permanente de la explanada, la ley de fatiga que relaciona el número de cargas admisibles  $N_d$  con la deformación vertical en la explanada  $\varepsilon_d$  se puede expresar de la forma:

$$N_d = f_4 \cdot \varepsilon^{-f_5} \quad (2.4)$$

Donde  $f_4$  y  $f_5$  son parámetros que varían dependiendo del método empleado para su obtención.

En el caso de la fisuración por fatiga de capas bituminosas, la ley de fatiga relaciona el número de repeticiones de carga permitidas,  $N_f$ , con la deformación horizontal máxima del fondo de la capa de mezcla bituminosa,  $\varepsilon_t$ . La expresión general es de la forma:

$$N_f = f_1 \cdot \varepsilon_t^{-f_2} \cdot k \quad (2.5)$$

Donde  $f_1$  y  $f_2$  son parámetros para cada mezcla y  $k$  puede introducir otro tipo de dependencias como el módulo elástico, el porcentaje de huecos, contenido de ligante, etc. La mayor parte de las veces  $k$  no se considera ya que no afecta a la ley de fatiga.

En el caso de fatiga de las capas tratadas con conglomerantes hidráulicos, normalmente se relaciona el nivel máximo de tensiones y el número de repeticiones de carga hasta rotura. Las expresiones son de la forma:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma} \text{ ó } \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon} = 1 + \beta \cdot \log(N_f) \quad (2.6)$$

También se suelen usar expresiones similares a las que se emplean para las mezclas bituminosas ya que los ensayos de laboratorio para determinar el comportamiento a fatiga de estos materiales son similares a los de los materiales bituminosos.

Una vez que se ha definido la sección, con sus parámetros críticos y las leyes de fatiga correspondientes (véase Figura 2.8), se calcula la respuesta del firme a una carga tipo y se halla el número de aplicaciones de carga tipo  $N_i$  que permite cada modelo de comportamiento. El menor de todos ellos será el que limite la capacidad estructural de la sección y el mecanismo de deterioro crítico (Mateos Moreno, 2012).

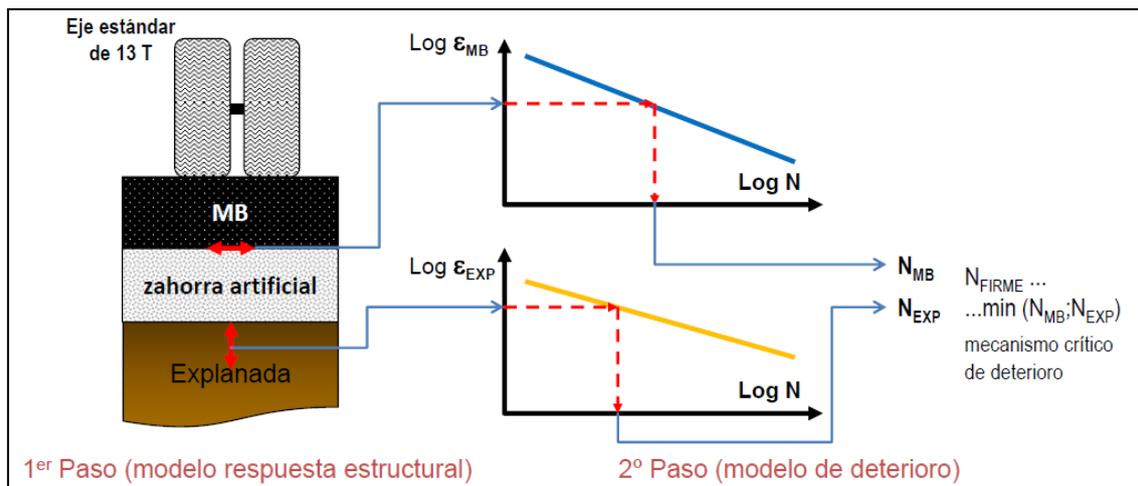


Figura 2.8 Cálculo del mecanismo crítico de deterioro del firme diseñado

## 2.4 Lenguaje de modelado Modelica

Modelica es un lenguaje abierto de modelado de sistemas físicos multidominio. Permite el modelado de sistemas de los diferentes dominios físicos (eléctrico, mecánico, térmico, etc) y también sistemas que contengan más de un dominio distinto. Permite hacer llamadas a funciones escritas en otros lenguajes de programación como C.

Es un lenguaje orientado a objetos y acausal por lo que permite la reutilización de clases, que provoca un ahorro considerable de tiempo a la hora de programar, y el enfoque acausal permite que no tenga que definirse la causalidad computacional a la hora de programar, las ecuaciones con las cuales se calcula cada una de las variables del sistema, si no que se realiza en el entorno de modelado. Aunque a través de ecuaciones se pueden realizar asignaciones con causalidad definida, lo que se denomina algoritmos. Esta propiedad también permite flexibilidad a la hora de

desarrollar modelos ya que una clase se puede adaptar a distintas situaciones de diferente causalidad (Oliva Domínguez, 2011).

La reutilización de las clases se puede realizar a través de composición o de especialización. En el caso de la composición se pueden conectar clases entre sí para formar nuevos modelos y la especialización consiste en definir nuevos modelos a través de la adaptación de otros que ya existen. Para ello es muy importante la parametrización.

Modelica soporta la múltiple; una clase puede heredar de más de una y los parámetros se pueden modificar de forma que permite particularizar el comportamiento heredado en la nueva clase. También favorece el encapsulado de la información, de forma que la información de las clases que no sea relevante para la interacción con los demás elementos se puede ocultar, y la definición de clases parciales.

Los sistemas físicos dinámicos se modelan a través de ecuaciones diferenciales y algebraicas (DAE). En algunas ocasiones el sistema cambia su estructura durante la simulación después de que se produzca un determinado evento. El lenguaje Modelica es capaz de modelar sistemas con componentes discretos, los denominados sistemas DAE-híbridos. Modelica dispone de construcciones concretas para describir las condiciones de disparo de los eventos y las acciones asociadas (Urquía Moraleda, 2000).

Modelica es un lenguaje en continua evolución, ya que tiene una comunidad muy activa de desarrolladores. Dispone, entre otras, de una librería de código abierto denominada Modelica Standard Library (MSL), que contiene sobre 1280 componentes de modelado y 910 funciones de mucho dominios diferentes ([www.modelica.org](http://www.modelica.org)).

Gracias a la MSL muchos de los componentes desarrollados en la librería presentada en este trabajo tienen como base alguno de los pertenecientes a la MSL.

## 2.5 Dymola: entorno de modelado de Modelica

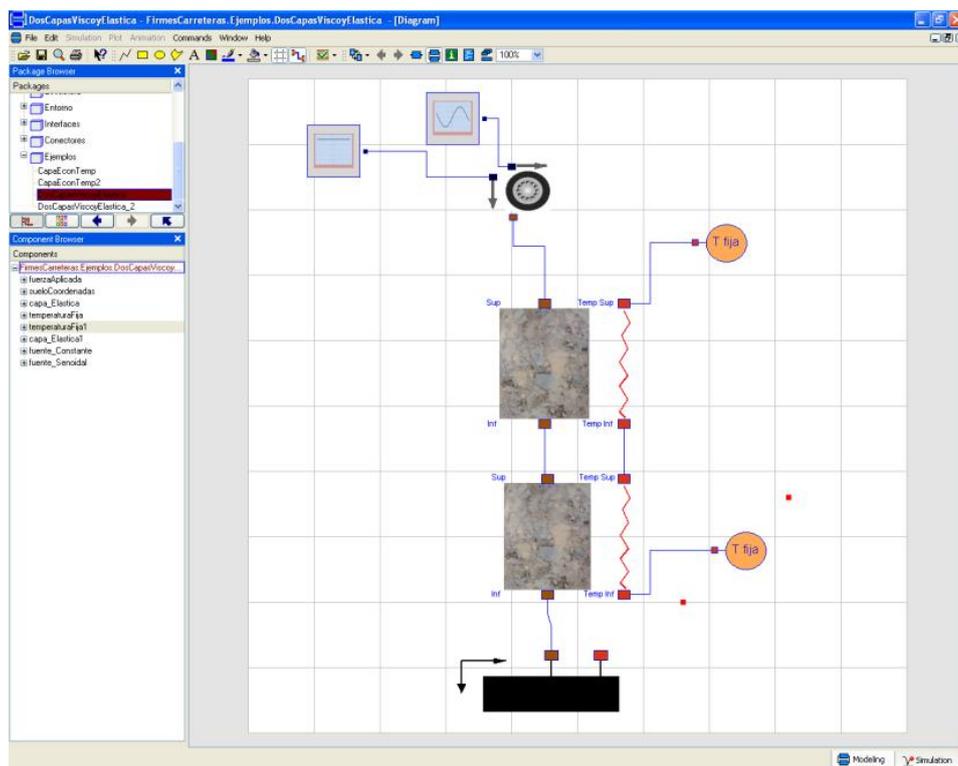
Dymola es una herramienta de simulación y modelado basada en el lenguaje Modelica en el cual se pueden diseñar modelos multidominio con facilidad gracias a las librerías con las que cuenta.

Dymola es un entorno de modelado que contiene los algoritmos necesarios para la asignación de la causalidad. También emplea manipulación simbólica para la resolución de los lazos algebraicos de forma automática.

Dymola lo que hace es traducir el modelo escrito en lenguaje Modelica en un programa en C, por lo que necesita un compilador de C. Este programa constituye el algoritmo para la simulación, y una vez compilado, se genera un ejecutable .exe. Todos estos ficheros son accesibles para el usuario con lo que pueden ser utilizados junto con otros entornos o lenguajes de programación, como puede ser MATLAB o LabVIEW.

Junto con el entorno de programación se proporciona un compilador gratuito de C, que se instala de forma automática. Este compilador se puede usar en caso de no realizarse simulaciones en tiempo real. Si se quieren realizar simulaciones en tiempo real es necesaria la instalación de Visual C++.

Los modelos se pueden desarrollar a través de la programación de código Modelica o a través de una pantalla en la que se pueden arrastrar los componentes elementales del modelo de las librerías correspondientes y conectarlos directamente entre ellos. Gracias a la interfaz gráfica que presenta, la construcción de los modelos resulta muy cómoda y rápida (véase Figura 2.9).



**Figura 2.9** Pantalla en la que se componen los modelos mediante arrastre de las clases definidas en las librerías y conexión entre ellas

En la parte de simulación de los modelos se puede asociar animación a la simulación de los mismos, de forma que se pueda ver gráficamente el comportamiento del sistema que se está modelando (Dassault Systèmes AB, 2013).

Dymola también permite la generación automática de la documentación de las librerías o los componentes que se desarrollan, siendo esta característica muy útil para poder obtener información por parte de otros desarrolladores.

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se han presentado los métodos empleados en el dimensionamiento de los firmes, centrandó especial atención sobre los métodos analíticos. Se han revisado los modelos que componen la mayor parte de los métodos analíticos: los modelos de respuesta y los modelos de comportamiento.

Se ha prestado un interés mayor en la parte de modelos de respuesta ya que los trabajos que se llevarán a cabo en este proyecto van enfocados a conseguir desarrollar un modelo de este tipo.

La mayor parte de los modelos de respuesta se basan en la resolución de las ecuaciones planteadas por Burmister para un sistema multicapa elástico lineal. La principal desventaja de estos modelos es que considera a todos los materiales que conforman la estructura como elásticos y lineales, lo que justifica el empleo de otro tipo de herramientas para el modelado de este tipo de estructuras.

Entre otras herramientas (modelos de elementos finitos) se presenta brevemente el lenguaje de modelado físico Modelica, escogido para el desarrollo de una librería que permita crear modelos de respuesta de firmes. Modelica permite la reutilización de los modelos desarrollados, realizar analogías del comportamiento de los materiales con componentes mecánicos, de forma que puede resultar muy útil a la hora de estudiar comportamientos de los materiales distintos al puramente elástico lineal, y su integración con otro tipo de lenguajes de programación. Modelica se ha escogido para este trabajo debido a su capacidad de integración de distintos dominios físicos y a su versatilidad para la creación de modelos físicos.

Para finalizar, se introduce el entorno Dymola, seleccionado para la creación de la librería y la simulación de los modelos desarrollados, ya que se trata de un entorno de desarrollo con carácter comercial y con muchas funcionalidades para el diseño de librerías en lenguaje Modelica.



# Capítulo 3 Modelado de la respuesta estructural de un firme de carretera

## 3.1 Introducción

En este capítulo se describen los elementos que intervienen en la respuesta estructural de un firme como son los materiales que forman la estructura, el entorno y la carga que se aplica a la estructura.

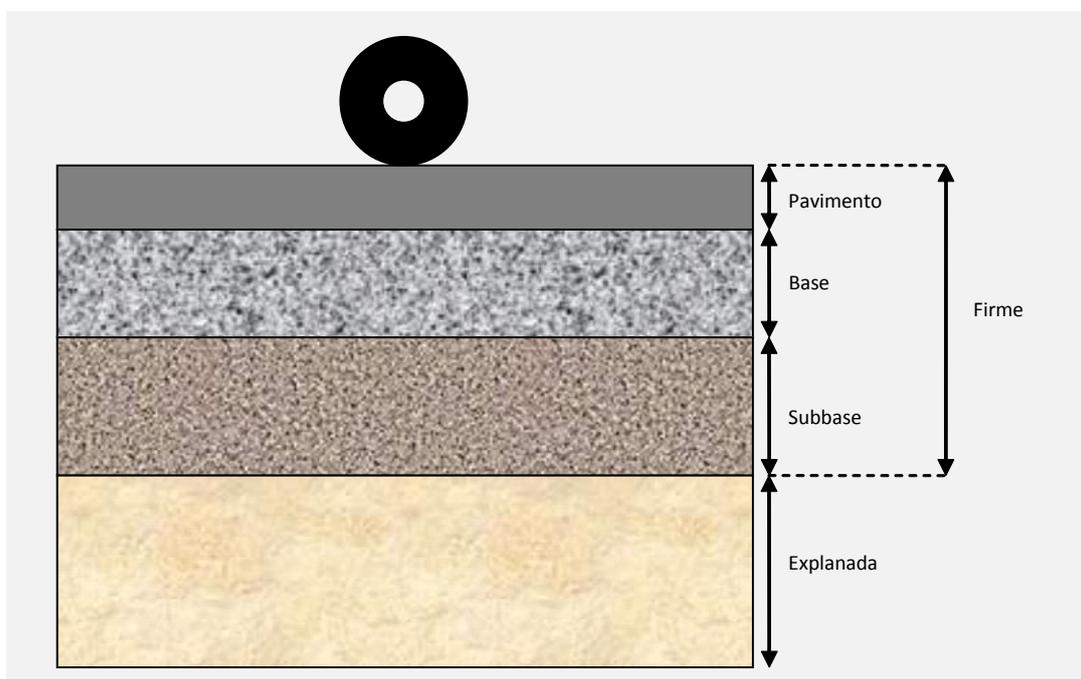
En primer lugar se explica la estructura de un firme de carreteras y se presentan los tipos de firmes en función de su comportamiento y respuesta. Se realiza una descripción de los materiales tipo empleados en la construcción de firmes que conduce a la presentación de las ecuaciones constitutivas de los mismos. A continuación se hace una descripción de la carga aplicada sobre los firmes y por último se explica cómo afecta el entorno a la respuesta estructural.

Una vez conocido el problema se detallan los principios físicos de los fenómenos modelados, tanto mecánicos como térmicos, que son las tensiones y deformaciones de los sólidos deformables, el amortiguamiento y los fenómenos de intercambio de calor entre sistemas introduciéndose las ecuaciones empleadas en el modelo. Por último se presentan las hipótesis y simplificaciones empleadas en el modelado de cada una de las partes que intervienen en el modelo de respuesta estructural de un firme.

## 3.2 Estructura de los firmes de carreteras

Los firmes de carreteras consisten en unas estructuras lineales constituidas por varias capas superpuestas de distintos tipos de materiales y varios centímetros de espesor

que se apoyan sobre una explanada mejorada, que está constituida por la compactación de los suelos de la propia traza o algún tipo de suelo añadido o tratado con cal o cemento. Normalmente se dispone de 3 capas, una capa superficial denominada pavimento, una capa por debajo denominada base y otra capa entre la explanada y la base denominada subbase (véase Figura 3.1). Estas estructuras proporcionan un apoyo para las cargas dinámicas que se desplazan por su superficie; la explanada por sí sola no sería capaz de soportar las cargas del tráfico pesado, por lo que el firme debe ser confortable y lo suficientemente rígido para no ceder ante las sollicitaciones que se le aplican y reducir las tensiones que llegan a la explanada (PROAS, 2013).



**Figura 3.1 Estructura de una carretera: firme más explanada**

La explanada sobre la que apoyan las distintas capas que componen el firme, se clasifica en tres categorías dependiendo de su capacidad de soporte (E1, E2 y E3, de menor a mayor capacidad de soporte), es decir su capacidad para soportar las sollicitaciones (PROAS, 2013). Esto se refleja en que la explanada, dependiendo de la categoría a la que pertenezca, debe tener un valor mínimo de módulo de deformación y un valor máximo de deflexión bajo carga, como se puede observar en la Tabla 3.1. El módulo es una medida de la rigidez del suelo y la deflexión es el desplazamiento que se produce de toda la estructura debajo de la zona de aplicación de la carga.

Tabla 3.1 Categorías de explanadas

Categoría de la explanada	E1	E2	E3
Módulo $E_{v2}$ (MPa) NLT-357	$\geq 60$	$\geq 120$	$\geq 300$
Deflexión patrón ( $10^{-2}$ mm) NLT-356	$\leq 250$	$\leq 200$	$\leq 125$

Las explanadas se construyen o bien con el suelo de la propia traza de la carretera o añadiendo capas de suelos de distintas calidades. En la Instrucción de Carreteras española se define como suelo aquellos materiales que provienen de las excavaciones de las obras y que cumplen una serie de requisitos relacionados con su granulometría, es decir, con la distribución del tamaño de los granos que forman el suelo, y con el contenido y naturaleza de estos. De acuerdo a estos requisitos se clasifican en cuatro tipos, de mayor a menor calidad: seleccionados, adecuados, tolerables y marginales.

Por tanto, dependiendo de su calidad, los suelos se usan en la construcción de las explanadas en distintas capas dentro de la misma. También está permitido el empleo de los denominados suelos estabilizados; estos suelos consisten en mezclar el suelo con un porcentaje de cal o cemento con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. En España se definen tres tipos de suelos estabilizados denominados S-EST1, S-EST2 (que pueden llevar cal o cemento) y S-EST3 que solo se consigue mediante el uso de cemento. Se distinguen sobre todo por el porcentaje de cal o cemento aplicado (Romero Olleros, 2011).

En el caso de los firmes, dependiendo de la composición de cada una de las capas, se pueden clasificar en 4 tipologías diferentes:

- **Firmes flexibles:** estos firmes están constituidos por materiales granulares en las capas de base y subbase y el pavimento es un tratamiento superficial o una capa de mezcla bituminosa de menos de 15 cm.
- **Firmes semiflexibles:** en este caso tanto la capa de base como el pavimento están compuestas por mezclas bituminosas con un espesor total igual o superior a 15 cm. La subbase está compuesta por materiales granulares no tratados.

- Firmes semirrígidos: el pavimento se encuentra formado por una o dos capas de mezcla bituminosa, y una capa base de un material granular tratado con un ligante hidráulico o puzolánico. La subbase suele ser un material granular generalmente estabilizado con cal o cemento.
- Firmes rígidos: estos firmes tienen un pavimento de hormigón, en forma de losas con juntas de unión, de forma que se puede apoyar directamente sobre la explanada o bien sobre algún material que puede estar tratado.

Cada uno de estos tipos de firmes tiene un comportamiento mecánico diferente y los fallos de la estructura se producen por distintas causas. A continuación se detallan algunas características del comportamiento de estos tipos de firmes y sus fallos más comunes (PROAS, 2013).

En el caso de los firmes flexibles:

- Las capas granulares son las que resisten las cargas. La capa bituminosa sirve para impermeabilizar.
- Las capas granulares deben amortiguar las cargas transmitidas y trabajan por rozamiento interno de su esqueleto mineral. Por lo que los áridos deben ser resistentes para evitar que se fracturen y machaquen formando finos que lo que provocan es que aumente su deformabilidad.
- Estas capas tienen una capacidad de soporte creciente de abajo hacia arriba y una permeabilidad decreciente (capas inferiores son más permeables).
- El fallo se produce por acumulación de deformaciones excesivas como consecuencia de la aplicación de cargas repetidas.

En el caso de los firmes semiflexibles:

- La capa de base, que es bituminosa, trabaja a flexotracción<sup>1</sup>. Puede ser más rígida de forma que amortigua las tensiones que llegan a la explanada, o más flexible de forma que transmite en mayor proporción las tensiones.
- En el primer caso el fallo se produce por fatiga de la mezcla y en el segundo por deformaciones excesivas, como en el caso de los firmes flexibles.
- Los fallos se pueden presentar conjuntamente ya que las capas de mezcla bituminosa son muy susceptibles a las variaciones térmicas.

En el caso de los firmes semirrígidos:

---

<sup>1</sup> Al aplicar a la capa cargas cíclicas se flexiona justo en la parte de aplicación de la carga, ya que los extremos se mantiene fijos, y la fibra inferior de la capa sufre tracciones que provocan microfisuras. Estas microfisuras se van haciendo grandes a medida que el proceso se repite, y se propagan hacia la superficie de la capa provocando el fallo de la misma.



En el caso de la explanada, el catálogo para el diseño de la misma tiene dos variables de entrada que son: el tipo de suelo que se tiene en la excavación de la obra (columnas de la Figura 3.2) y la categoría de explanada que se tiene que conseguir (filas de la Figura 3.2).

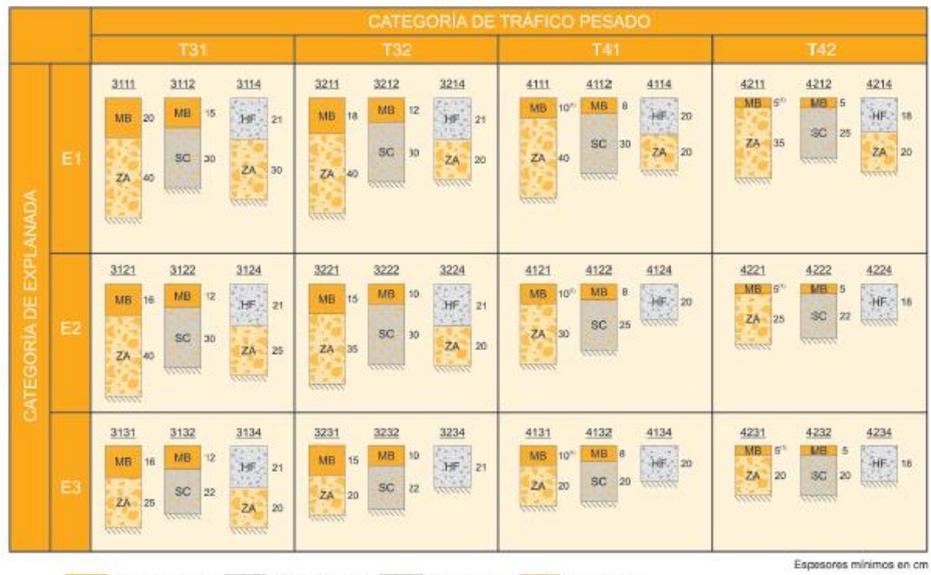
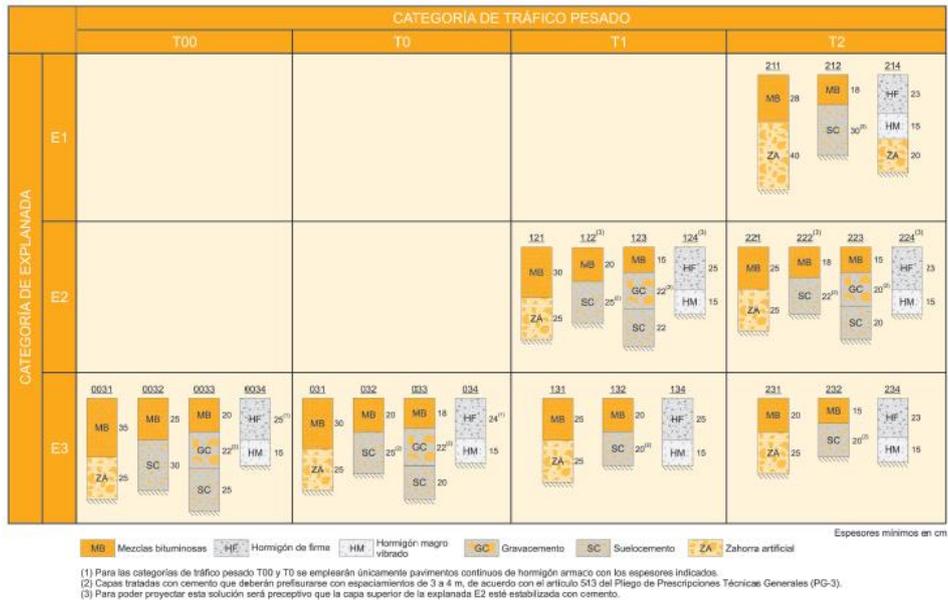


Figura 3.3 Catálogo para el diseño de las secciones de firme

En el caso del firme, el catálogo para el diseño del mismo tiene dos variables de entrada que son: el tipo de tráfico que debe soportar la estructura (columnas de la Figura 3.3) y la categoría de la explanada sobre la que se apoya (filas de la Figura 3.3).

Debido a que la mayor parte de los firmes construidos en España se corresponden con la tipología de firmes flexibles o semiflexibles, el presente trabajo se centra en estas tipologías (Alarcón Ibarra, 2003).

### 3.2.2 Propiedades mecánicas de los materiales empleados en el diseño de firmes

El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales que forman la estructura es imprescindible en el diseño de firmes de carreteras, ya que lo que se pretende es saber si un material es lo suficientemente resistente para soportar las tensiones que se provocan en este tipo de estructuras. Por otro lado, este conocimiento ayuda en el estudio de las causas del deterioro de la estructura (Blanco Alvarez, 2005).

Las propiedades mecánicas de los materiales definen la relación entre las tensiones o esfuerzos y las deformaciones que se producen en los mismos debido a los distintos tipos de agentes externos (fuerzas externas, temperatura, tiempo, humedad, etc). Las ecuaciones que relacionan las tensiones y deformaciones son las que definen su comportamiento mecánico.

Dependiendo del tipo de comportamiento mecánico que presenten cada uno de los materiales que componen el firme, la respuesta de la estructura será diferente. Se entiende por respuesta de la estructura al conjunto de esas tensiones y deformaciones que se originan en su interior debido al paso de los vehículos.

Debido al tipo de cargas que se aplican sobre el firme (véase Capítulo 3) los materiales que lo componen deben presentar un buen comportamiento mecánico ante esfuerzos verticales o normales ( $\sigma_v$ ) y tangenciales o de corte ( $\tau$ ). Las tensiones normales o verticales dan lugar a alargamientos o compresiones ( $\varepsilon$ ) y las tangenciales o de corte dan lugar a distorsiones ( $\gamma$ ) (véase Figura 3.4).

a) ALARGAMIENTOS « $\varepsilon$ » DEBIDOS A « $\sigma$ »

b) DISTORSIONES « $\gamma$ » DEBIDAS A « $\tau$ »

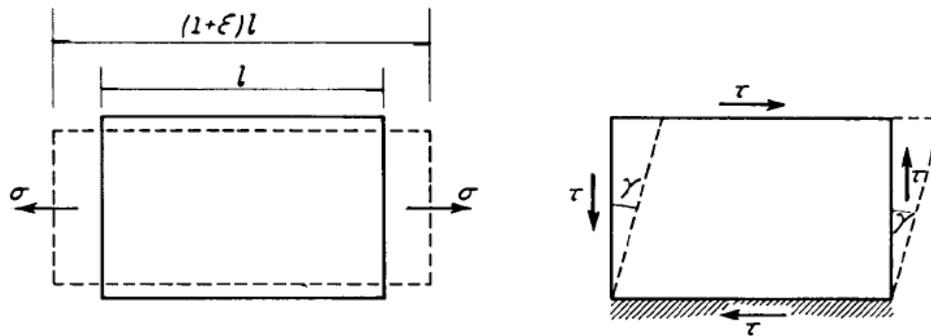


Figura 3.4 Esfuerzos o tensiones normales y tangenciales o de corte

### Los suelos y los materiales granulares o zahorras

Los suelos y los materiales granulares o zahorras (véase Figura 3.6) son el fruto de la alteración, tanto física como química, de las rocas más superficiales de la tierra. Este proceso se denomina meteorización y favorece el transporte de los materiales que han sido modificados (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000b).

El comportamiento mecánico más simple para los suelos y los materiales granulares es el comportamiento elástico lineal cuya expresión matemática viene definida por la ley de Hooke, que en una dirección resulta:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Donde  $\sigma$  es la tensión aplicada en una dirección determinada,  $\varepsilon$  la deformación que se produce en el material en esa dirección y  $E$  es un parámetro característico de los materiales denominado módulo de elasticidad o módulo de Young. Este módulo expresa la resistencia del material a las deformaciones.

Cuando el material es isótropo, su comportamiento es igual en todas las direcciones, al producirse deformación en una dirección, como el volumen total no varía, las otras direcciones también se deforman para conservar el volumen del sólido (véase Figura 3.5) (Badiola, 2004).

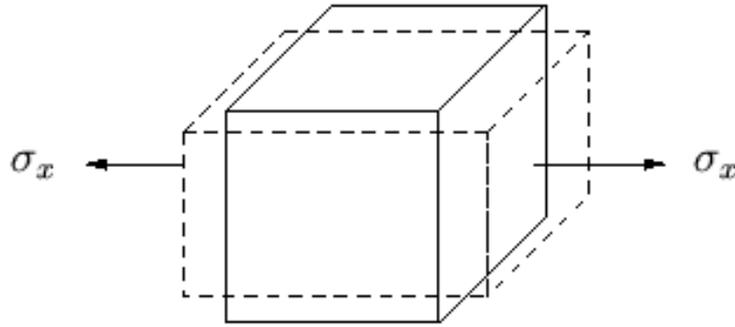


Figura 3.5 Deformaciones en las distintas direcciones

La relación entre la deformación axial ( $\varepsilon_{axial}$ ) y la deformación lateral ( $\varepsilon_{lateral}$ ) se denomina coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y se considera constante en un comportamiento elástico, isótropo y lineal del material (Badiola, 2004):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}} \quad (3.2)$$

En cuanto a la tensión tangencial o de corte  $\tau$ , en un comportamiento elástico perfecto esta es proporcional a la deformación angular  $\gamma$ , y se expresa a través de la ecuación:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (3.3)$$

Donde  $\tau$  representa la tensión de corte,  $\gamma$  la deformación angular y  $G$  se define como el módulo de corte o de cizalla o de rigidez y es un parámetro característico del material (Badiola, 2004).

El módulo de corte se relaciona con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson a través de la relación:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.4)$$

Por tanto, el comportamiento elástico lineal de un material isótropo se puede caracterizar a través de dos parámetros: el módulo de Young ( $E$ ) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Sin embargo, los suelos son materiales complejos y la caracterización de su comportamiento mediante un modelo elástico lineal con parámetros constantes es una simplificación muy grande. La rigidez que presentan está influenciada por su composición y estructura, el historial de las tensiones que han sufrido, la densidad y las características de las fuerzas aplicadas. Además, sus propiedades mecánicas son anisótropas (difieren dependiendo de la dirección considerada). Por lo tanto es

necesaria la elaboración de leyes constitutivas que reproduzcan mejor el comportamiento real del suelo (Mateos Moreno, 2003).

Los suelos se pueden clasificar en dos grandes grupos: los cohesivos y los granulares (no cohesivos) (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000). La granulometría de un suelo o de un material granular hace referencia a la composición en tamaños de partícula del suelo. Es una curva que representa el porcentaje de áridos de cada tamaño que tiene el material. Cuando se dice que un material tiene una granulometría continua se quiere expresar que no falta ningún tamaño de árido dentro de su estructura en el intervalo de tamaños, del mínimo al máximo, que contenga el material. En caso de que su granulometría sea discontinua se debe a que faltan partículas de alguno de los tamaños intermedios.

### **Suelos granulares**

Los suelos granulares están formados por partículas aisladas que debido a las fuerzas gravitatorias tienden a formar una estructura donde cada una de las partículas toca a otras formando un esqueleto mineral estable sin fuerzas de adherencia entre ellas, o fuerzas interpartículas.

Sus características principales son su buena capacidad portante y su alta permeabilidad, es decir que permiten la salida de agua de forma rápida al aplicarse una carga externa, lo que les confiere una buena drenabilidad.

Hay dos grupos; las gravas y las arenas. Se distinguen por su tamaño ya que las arenas están formadas por áridos de tamaño inferior a 2 mm.

Mecánicamente funcionan debido al rozamiento interno entre las partículas; su resistencia viene determinada por el ángulo de rozamiento interno<sup>2</sup> entre partículas y por su módulo de compresibilidad (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000).

El ángulo de rozamiento interno está relacionado con la resistencia a los esfuerzos tangenciales mientras que el módulo de compresibilidad relaciona las deformaciones volumétricas que se producen en una masa de suelo al estar sometida a un estado tensional determinado.

Los esfuerzos tangenciales son los que provocan, cuando se supera una determinada fuerza de corte, los fallos de la estructura debido al deslizamiento de dos capas de suelo a través de un determinado plano, denominado plano de

---

<sup>2</sup> El ángulo de rozamiento interno es el ángulo formado por el peso del material y la dirección normal al plano de deslizamiento.

deslizamiento, que está relacionado con el ángulo interno (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000b). Estos esfuerzos tangenciales se relacionan con las deformaciones tangenciales a través del módulo de rigidez o de corte (Muelas Rodríguez).

Por otro lado, el peso del material provoca un aumento del confinamiento del mismo, lo que ocasiona que el módulo de rigidez del suelo aumente a medida que aumenta la profundidad (Ortiz-Pulido, Gaitán-Serrano y Camacho-Tauta, 2013).

A la hora de la modelización del comportamiento de este tipo de suelos, suelen modelizarse por separado las tensiones que provocan deformación volumétrica y las que provocan deformaciones tangenciales.

La ecuación que liga la tensión con la deformación volumétrica se puede expresar de la forma:

$$p = K \cdot \theta \quad (3.5)$$

Donde  $p$  es la tensión que provoca el cambio de volumen en el material, la tensión de confinamiento,  $K$  es el módulo de compresibilidad y  $\theta$  es la deformación volumétrica.

Si el material se considera elástico, isótropo y lineal el módulo de compresibilidad se relaciona con el módulo de Young y con el coeficiente de Poisson a través de la expresión:

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (3.6)$$

Donde  $K$  es el módulo de compresibilidad del material,  $E$  su módulo de Young y  $\nu$  su coeficiente de Poisson.

Por otro lado, se tienen las tensiones tangenciales o de corte, que se relacionan con las deformaciones tangenciales a través del módulo de corte o módulo de rigidez transversal  $G$ .

Al igual que sucede con el módulo de compresibilidad, para materiales elásticos, isótropos y lineales el módulo de rigidez transversal se relaciona con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson a través de la ecuación (3.4) vista anteriormente.

En los suelos estas tensiones tangenciales se representan mediante el esfuerzo desviador  $q$ . Este esfuerzo es la diferencia entre las tensiones debidas al confinamiento del material y las tensiones extra aplicadas.

La expresión para las deformaciones tangenciales producidas en los suelos queda de la forma:

$$q = G \cdot \varepsilon_d \quad (3.7)$$

Donde  $\varepsilon_d$  representa la deformación tangencial que se presenta.

### **Suelos cohesivos**

Los suelos cohesivos son aquellos que poseen un tamaño de partículas más fino (menor a 0.08 mm), lo que provoca que la estructura que se forma se deba a las fuerzas iónicas actuantes entre las partículas, ya que la superficie de la partícula es mayor a su volumen. Las fuerzas interparticulares superan a las fuerzas gravitatorias.

Mecánicamente la propiedad más importante es la cohesión, que es la fuerza interparticular producida en parte por el agua que contiene el suelo. La cohesión aumenta la resistencia del suelo frente a tensiones tangenciales o de corte (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000b).

En el caso de los suelos cohesivos, el módulo de rigidez ( $G$ ) presenta una dependencia con la succión del material debido a esa fuerza de cohesión; lo que se puede expresar como una dependencia con la humedad.

### **Las zahorras**

Las zahorras (véase Figura 3.6) son materiales que se emplean en la construcción de las bases o subbases del paquete de firme y son materiales granulares de granulometría continua, es decir que contienen todos los tamaños de áridos. Existen dos tipos de zahorras, las zahorras naturales las artificiales.

- Las zahorras naturales suelen emplearse en la capa de subbase y se trata de partículas que no han sufrido ningún proceso de trituración.
- Las zahorras artificiales se emplean tanto en capas de base como de subbase y las están totalmente o parcialmente trituradas.

Las zahorras son modelizadas a partir de los valores de su módulo de compresibilidad  $K$  y su módulo de corte  $G$ , igual que sucede con los suelos.



Suelo granular

Suelo cohesivo

Zahorra natural

Zahorra artificial

Figura 3.6 Tipos de suelos y zahorras

### Las mezclas bituminosas

Las mezclas bituminosas (véase Figura 3.7) son la combinación de un ligante hidrocarbonado, árido y, en algunos casos aditivos, de forma que todas las partículas queden recubiertas por el ligante de forma homogénea. El ligante hidrocarbonado es una mezcla compleja de hidrocarburos, de los cuales los más usados en carretera son los denominados betunes asfálticos y sus derivados. Estos se caracterizan por presentar una cierta viscosidad y un comportamiento termoplástico, es decir que la viscosidad depende con la temperatura. También presentan buena adhesividad con la superficie de los áridos e inmiscibilidad con el agua, es decir que no se mezclan (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000b).



Figura 3.7 Testigo de mezcla bituminosa

El comportamiento mecánico del betún es complejo y depende, entre otros, de los siguientes factores: la carga aplicada, el tiempo que es aplicada y la temperatura ambiente. La reología intenta explicar este comportamiento.

El conjunto del esqueleto mineral y el betún, la mezcla bituminosa, tiene propiedades que provienen de los materiales que la forman. De esta manera el esqueleto mineral proporciona una resistencia a la deformación volumétrica gracias a los áridos que lo forman, y el betún proporciona las características viscosas, la resistencia a la deformación cortante o tangente.

El comportamiento mecánico que presenta una mezcla bituminosa se puede asemejar al viscoelástico, ya que su estado de tensiones depende de la historia y del tiempo. Las deformaciones que se producen dependen del tiempo, de la temperatura y de la frecuencia de aplicación de la carga que provoca las tensiones (Mateos Moreno, 2003).

Uno de los parámetros más importante de las mezclas bituminosas a nivel de comportamiento mecánico es su módulo complejo  $E^*$ . Este módulo es un número complejo y es el cociente entre tensión y deformación cuando la carga aplicada es una carga armónica (Mateos Moreno, 2003).

$$E^* = \frac{\sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t)}{\varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)} \quad (3.8)$$

Donde la tensión aplicada es  $\sigma = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$  y la deformación que se produce es  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)$ .

El módulo de  $|E^*|$  representa el cociente entre los valores máximos de tensión y deformación y se denomina módulo dinámico. Su argumento, ángulo de fase  $\varphi$ , representa el desfase entre la tensión y la deformación.

Este módulo caracteriza la rigidez de la mezcla bituminosa para una frecuencia determinada, lo que es muy importante ya que la frecuencia de la carga aplicada por un vehículo depende de su velocidad. El valor de este módulo también tiene una fuerte dependencia con la temperatura de la mezcla.

Esta naturaleza viscoelástica está más relacionada con la deformación debida a tensiones de corte o tangenciales que a tensiones normales. Bajo tensiones normales la mezcla bituminosa presenta un comportamiento elástico (Mateos Moreno, 2003). Por tanto, una forma de implementar el comportamiento de las mezclas bituminosas es considerar un comportamiento elástico para las compresiones o tensiones normales y un comportamiento viscoelástico en el caso de las tensiones tangenciales o de corte.

### 3.2.3 Amortiguamiento de los materiales

El amortiguamiento o fricción interna de un material es el fenómeno que provoca la disipación de su energía mecánica, normalmente mediante la transformación en calor u otro tipo de energía (Cossolino y Pereira, 2010).

Esta disipación en las estructuras que se encuentran sometidas a cargas dinámicas se tiene en cuenta en las fuerzas proporcionales a la velocidad: amortiguamiento viscoso o elástico, y en las fuerzas proporcionales a los desplazamientos: amortiguamiento histerético, debido al comportamiento no lineal del sistema (Cossolino y Pereira, 2010).

Existe otro tipo de amortiguamiento, denominado amortiguamiento geométrico o por radiación que se produce cuando se propaga energía dentro de un medio infinito, como el suelo, el agua, etc. Consiste en la disminución que sufre la amplitud y la intensidad de las ondas bi y tridimensionales que transportan la energía cuando se alejan del foco emisor, independientemente de si se produce interacción con el medio. La amplitud de la onda resulta inversamente proporcional al cuadrado de la distancia con el foco emisor (Mateos Moreno, 2003).

En el caso de los firmes cuando se aplica la carga en el sistema multicapa que compone la estructura, la energía se propaga a través de ondas bi y tridimensionales que van encontrando un volumen creciente de material, por lo que la densidad de energía de cada onda disminuye al alejarse de la zona de aplicación (Mateos Moreno, 2003).

Por tanto, los dos tipos de amortiguamiento que se contemplan para la estructura son el debido al material, a su estructura interna, y el debido a la geometría. (Mateos Moreno, 2003).

El amortiguamiento debido al material está motivado principalmente por la disipación interna debido a la fricción entre las partículas. Este amortiguamiento se puede simular mediante un amortiguador y depende de las características del material como son su masa y su rigidez (Urquía Moraleda y Martín Villalba, 2013).

El amortiguamiento geométrico se simula a través de la variación de la superficie sobre la que actúan las fuerzas con la profundidad. Se hace uso de la teoría de Boussinesq (1988), la cual analiza la distribución de los esfuerzos que se originan en un suelo considerado como semi-infinito, homogéneo, linealmente elástico e isótropo. Estos esfuerzos son producidos por la aplicación de una carga constante. Según esta teoría la distribución de esfuerzos en el macizo semi-infinito depende de la geometría

de la superficie sobre la que se aplica la carga al suelo y de la profundidad (Leoni, 2008).

### 3.3 Aplicaciones de carga sobre la estructura

Las cargas que se aplican sobre la estructura son debidas al paso de los vehículos. Estos mantienen contacto con la superficie a través de las ruedas de cada uno de los ejes que conforman el vehículo.

Las cargas que se tienen en cuenta en el dimensionamiento de firmes de carreteras son las debidas al tráfico pesado; ya que son las que realizan un mayor daño a la estructura. En la Figura 3.8 se puede comparar la deflexión producida por un vehículo pesado (gráfica azul) frente a la producida por un vehículo ligero (gráfica roja), el primer pico corresponde con el eje delantero y el segundo con el eje trasero en ambos casos (Pérez Ayuso, Cadavid Jáuregui, Navareño Rojo, García Carretero y Marrón Fernández, 2013).

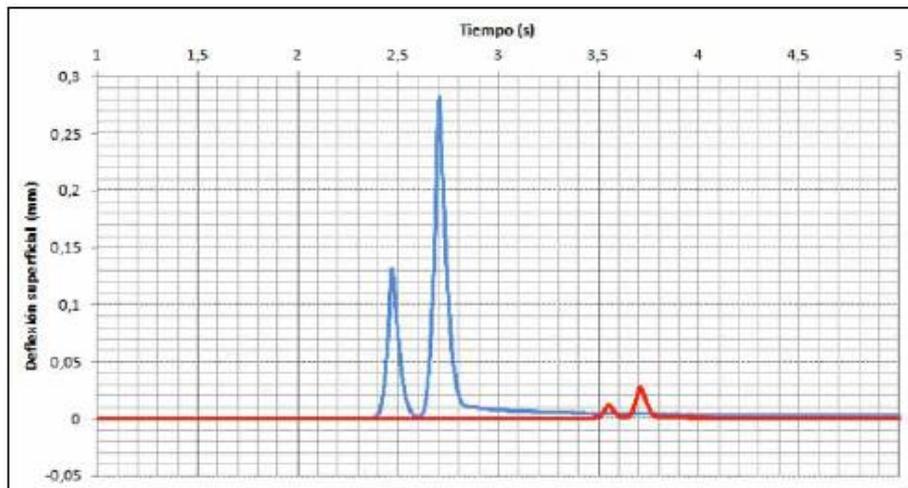


Figura 3.8 Diferencia en el valor de la deflexión entre vehículos de distinta carga

La Instrucción de Carreteras española (Carreteras, 2003) considera vehículos pesados a:

- Los camiones de carga superior a 3 toneladas, de más de 4 ruedas y sin remolque.
- Los camiones con uno o varios remolques.
- Los vehículos articulados y los vehículos especiales.
- Los vehículos destinados al transporte de personas con más de 9 plazas.

### 3.3.1 Magnitud de la carga transmitida al firme

La carga de los vehículos se transmite al firme a través del área de contacto de la rueda con la superficie de la carretera. La presión de contacto con el firme depende de la presión del neumático y del sistema de amortiguamiento de los vehículos, sin embargo, en la mayor parte de los métodos de dimensionamiento, no se tienen en cuenta, ya que ello supone una mayor complejidad en el análisis sin evidencias de que los resultados se ajusten mejor, ya que la respuesta del firme no depende exclusivamente de la magnitud de la carga (Mateos Moreno, 2003).

Otra simplificación que se realiza es considerar la superficie del neumático sobre el firme como circular y con distribución homogénea de la presión. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la presión de contacto se puede calcular entonces a través de la relación:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{\pi \cdot r^2} \quad (3.9)$$

Donde  $P$  denota la presión de contacto en la superficie del firme,  $F$  es el peso del vehículo, su masa ( $m$ ) por la aceleración de la gravedad ( $g$ ), y  $S$  es la superficie de contacto, que se considera circular de radio igual a  $r$  (Mateos Moreno, 2003).

Otros investigadores utilizan relaciones sencillas entre la presión de hinchado de los neumáticos y la presión de contacto, como por ejemplo la propuesta por Van Vuuren (1974):

$$q = 0.61 \cdot p + 145 \quad (3.10)$$

Siendo  $q$  la presión media de contacto en kPa y  $p$  la presión de hinchado de los neumáticos, también el kPa.

En cuanto a la consideración de una distribución homogénea de la presión en toda la superficie de contacto, los estudios que se han realizado sobre las diferencias entre la presión en el centro de la superficie de la huella y la presión en los bordes, parecen indicar que no se aprecian diferencias considerables que resulten en graves errores en los resultados de cálculo (Mateos Moreno, 2003).

### 3.3.2 Naturaleza dinámica y cíclica de las cargas

La mayor parte de los métodos de análisis de las tensiones y deformaciones producidas por el paso del tráfico suponen una carga estática, cuando en la realidad es dinámica. Esta simplificación de la naturaleza de las sollicitaciones sobre el firme

provoca que ciertos comportamientos de los materiales que conforman la estructura, como la viscoelasticidad de las mezclas bituminosas, no puedan reproducirse sin considerar los efectos dinámicos, siendo estos significativos sobre la respuesta estructural del firme (Mateos Moreno, 2003).

Por tanto, es importante considerar la naturaleza dinámica de la carga. Al pasar un vehículo pesado por encima de la carretera provoca una serie de pulsos de carga los cuales ejercen tensiones normales y tangenciales sobre un elemento del firme. La tensión tangencial cambia de sentido a medida que la carga se desplaza por encima del elemento considerado.

En la Figura 3.9 se muestra una sección longitudinal de las capas de un firme sobre la que transita una carga a velocidad constante. Se puede observar como el estado tensional en el punto P debido a la carga del punto A, está compuesto tanto de tensiones normales (verticales y horizontales) como tensiones tangenciales o cortantes.

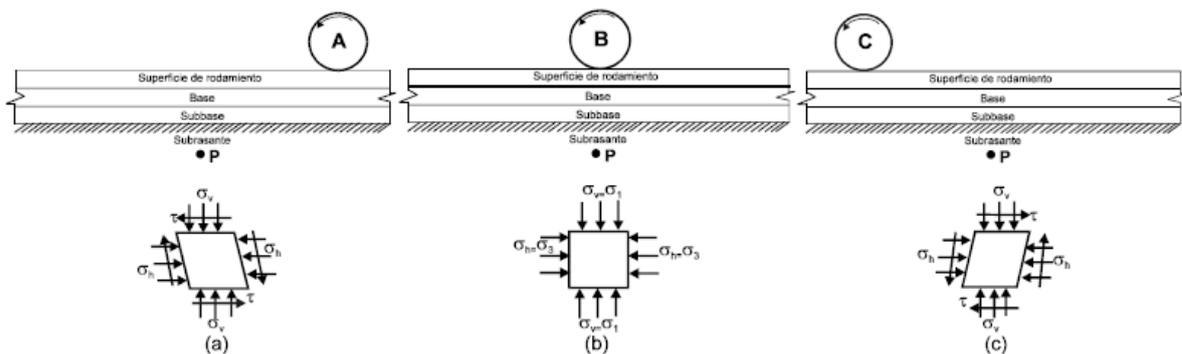


Figura 3.9 Estado tensional de un elemento del firme durante el paso de un vehículo

Cuando el vehículo se encuentra en la posición del punto B, no hay tensiones tangenciales, solamente normales a las caras del elemento. En cuanto el vehículo se encuentra en el punto C se producen tensiones tangenciales de sentido opuesto a las originadas en el punto A (Garnica Anguas, Gómez López y Sesma Martínez, 2002).

En la Figura 3.10 se puede observar las tensiones o esfuerzos que se generan en el elemento con mayor detalle y en función del tiempo. Estas tensiones se pueden modelizar como ondas senoidales, de media onda para las tensiones verticales y horizontales y de onda completa para las tensiones tangenciales o cortantes. Se puede observar como se trata de pulsaciones cíclicas, con distintas magnitudes y periodos de retraso, en caso de que el tráfico sea continuo.

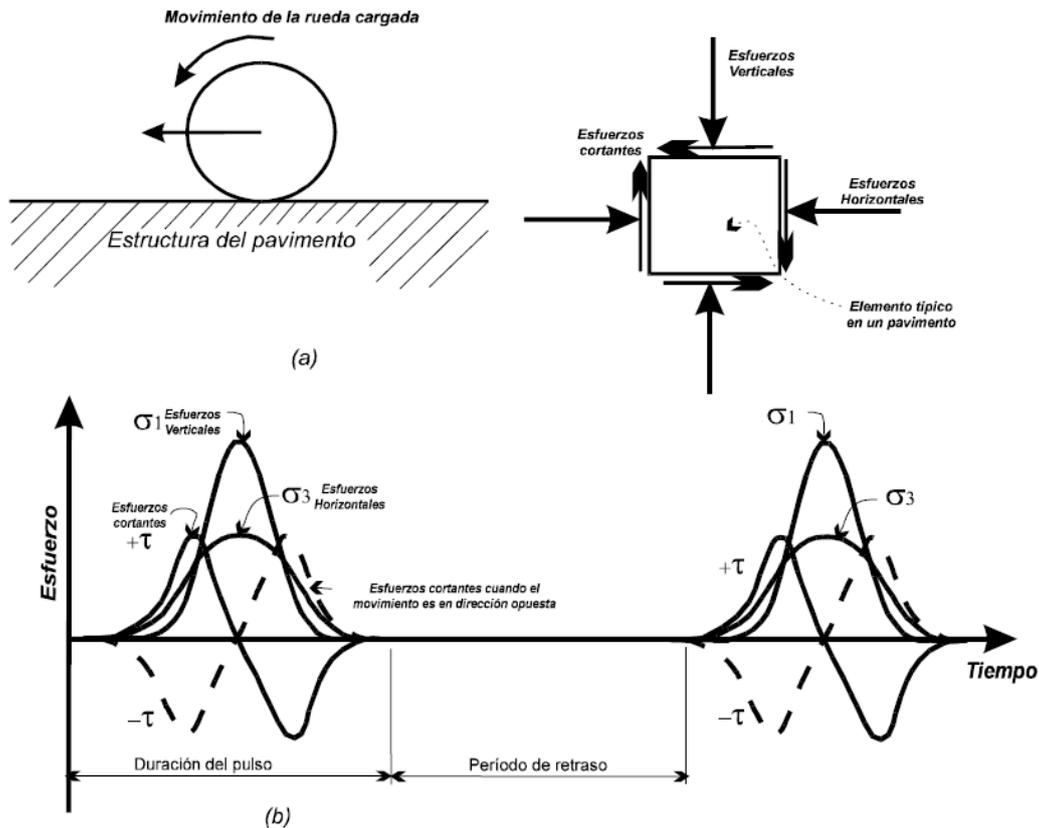


Figura 3.10 Tensiones originadas por el paso de un vehículo. Naturaleza cíclica.

### 3.3.3 Velocidad del vehículo y tiempo de carga

La velocidad del vehículo está relacionada con la duración del pulso de carga. La duración del pulso también depende de la profundidad a la cual se están calculando las tensiones y deformaciones del pavimento según estudios que se han llevado a cabo y se citan en la referencia (Garnica Anguas, Gómez López y Sesma Martínez, 2002). A medida que la velocidad aumenta, el tiempo del pulso de carga disminuye mientras que aumenta al aumentar la profundidad de cálculo dentro del pavimento.

Además, esta duración del pulso afecta a la magnitud de las tensiones ya que éstas disminuyen al aumentar la velocidad del vehículo, por tanto al disminuir el tiempo de duración del pulso de carga (Mateos Moreno, 2003). Esto está relacionado con la naturaleza visco-elástica de la mezcla bituminosa. Las propiedades mecánicas de la mezcla varían con la frecuencia de aplicación de la carga. A medida que aumenta la frecuencia, la mezcla se vuelve más rígida, lo que provoca que la respuesta del firme ante el paso del vehículo decrezca, es decir, se produzcan tensiones y deformaciones menores cuanto más rápido pasa la carga (Mateos, de la Fuente Martín y Pérez Ayuso, 2008). Por ello, en el dimensionamiento de firmes es importante la velocidad

del vehículo, ya que hay que escoger el valor del módulo dinámico de la mezcla bituminosa en función de la frecuencia asociada a la velocidad del vehículo.

Brown (1973) (Hildebrand, 2002) obtuvo una ecuación (3.11) para calcular el tiempo de carga en función de la velocidad del vehículo y de la profundidad dentro de las capas de mezcla bituminosa.

$$\log(l_t) = 0.5 \cdot d + 0.2 - 0.94 \cdot \log(v) \quad (3.11)$$

Donde:

- $l_t$  tiempo de carga (en segundos).
- $d$  profundidad (en metros).
- $v$  velocidad de la carga (en km/h).

Con la expresión (3.11) se obtiene la frecuencia de carga a la que se ve sometida la capa de mezcla bituminosa, que provoca una variación en el módulo dinámico de la misma.

## 3.4 Interacción con el entorno

Cuando se habla de interacción con el entorno se quiere hacer referencia a dos tipos de interacción que afectan a la respuesta estructural del firme. Por un lado existe una interacción mecánica con el entorno por parte de los materiales que conforman la estructura y por otra parte existe una interacción debida a las variaciones climáticas que se producen en el entorno que rodea a la estructura.

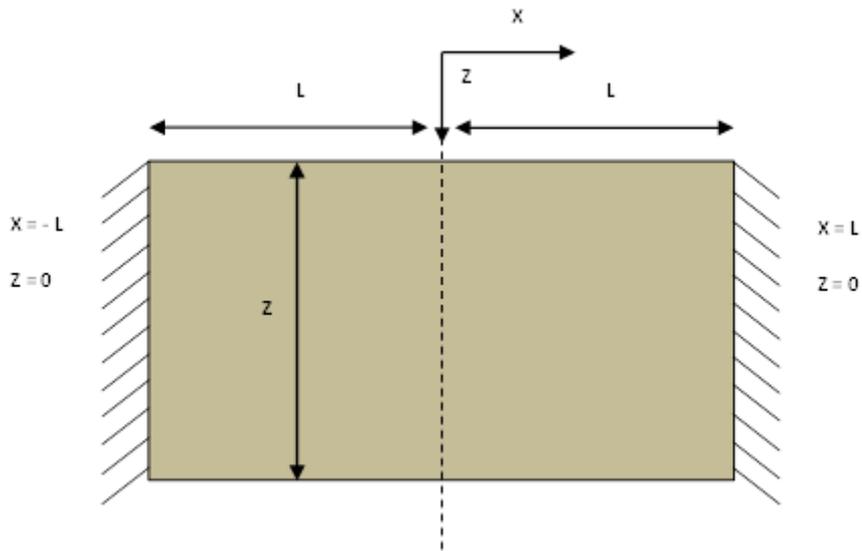
### 3.4.1 Interacción mecánica con el entorno

La interacción mecánica entre el entorno y la estructura se basa fundamentalmente en el establecimiento de un contorno. Este contorno lo que hace es proveer a la estructura de un confinamiento, de forma que se establecen las condiciones de contorno del sistema las cuales, junto con las ecuaciones de compatibilidad, permiten obtener los desplazamientos que se producen en el sólido.

Gracias al contorno establecido queda delimitado el volumen discreto donde se producen las tensiones y deformaciones con el paso del vehículo.

El contorno queda definido como las zonas en las que no se producen deformaciones, por tanto los valores del vector desplazamiento ( $s[s_x, s_z]$ ) en las direcciones

establecidas son constantes, no varían con el tiempo, como se puede ver en la Figura 3.11.



**Figura 3.11 Representación de un volumen discreto de material**

En la Figura 3.11 se representa un volumen discreto de material donde se puede observar cómo se encuentra confinado en los laterales del mismo. En estos no existen desplazamientos, los valores de las posiciones con respecto al eje de coordenadas son constantes. El ancho es igual a  $2 \cdot L$  y el largo o espesor igual a  $Z$ .

Se ha considerado también la interacción con el apoyo sobre el que se asienta la estructura, en el que no se producen desplazamientos en ninguna de las direcciones estudiadas, y el valor de la coordenada  $Z$  del apoyo es igual a la profundidad total de la estructura.

### 3.4.2 Interacción debido a las variaciones climáticas con el entorno

Las variaciones climáticas que se producen en el entorno afectan a la carretera ya que alteran las propiedades físicas de los materiales que conforman la estructura. Las principales variaciones que afectan a la respuesta estructural de un firme de carreteras son:

- Las variaciones en el contenido de agua de los suelos.
- Las variaciones de temperatura.

Las variaciones en el contenido de agua de los suelos provocan variación en su módulo de rigidez, sobre todo en aquellos suelos denominamos suelos cohesivos, ya que el agua confiere la fuerza interpartículas que juega un papel importante en la

resistencia del suelo frente a esfuerzos, sobre todo, cortantes o tangenciales (Bañón Blázquez y Beviá García, 2000b).

Las variaciones de temperatura que se producen en el entorno afectan al comportamiento de los firmes, especialmente a aquellos que están formados por una capa de mezcla bituminosa. La mezcla bituminosa tiene una alta sensibilidad a los cambios de temperatura debido a su naturaleza. La viscosidad del ligante bituminoso que contiene el material depende fuertemente de la temperatura, reduciéndose su valor con el aumento de la misma; lo que provoca que la resistencia a las tensiones de corte o tangenciales disminuya. Por tanto con los aumentos de temperatura la mezcla bituminosa es más vulnerable a las deformaciones. Sin embargo, al disminuir la temperatura el material se rigidiza, ya que su viscosidad aumenta, con lo que las deformaciones que se producen en el material son menores (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013).

Los métodos de diseño y dimensionamiento de firmes tienen en cuenta las condiciones climáticas de la zona geográfica donde se proyecta la construcción o rehabilitación de una carretera. La Instrucción de Carreteras española (Carreteras, 2003) divide España en diferentes zonas climáticas en función de las temperaturas (véase Figura 3.12) y en función de la precipitación de agua (véase Figura 3.13). Aunque en este caso se emplea la pluviometría para la selección de mezclas que sean capaces de drenar mejor el agua que se acumule en su superficie, con el objetivo de mejorar la seguridad en tiempo de lluvia. No se utiliza para la selección de los suelos.



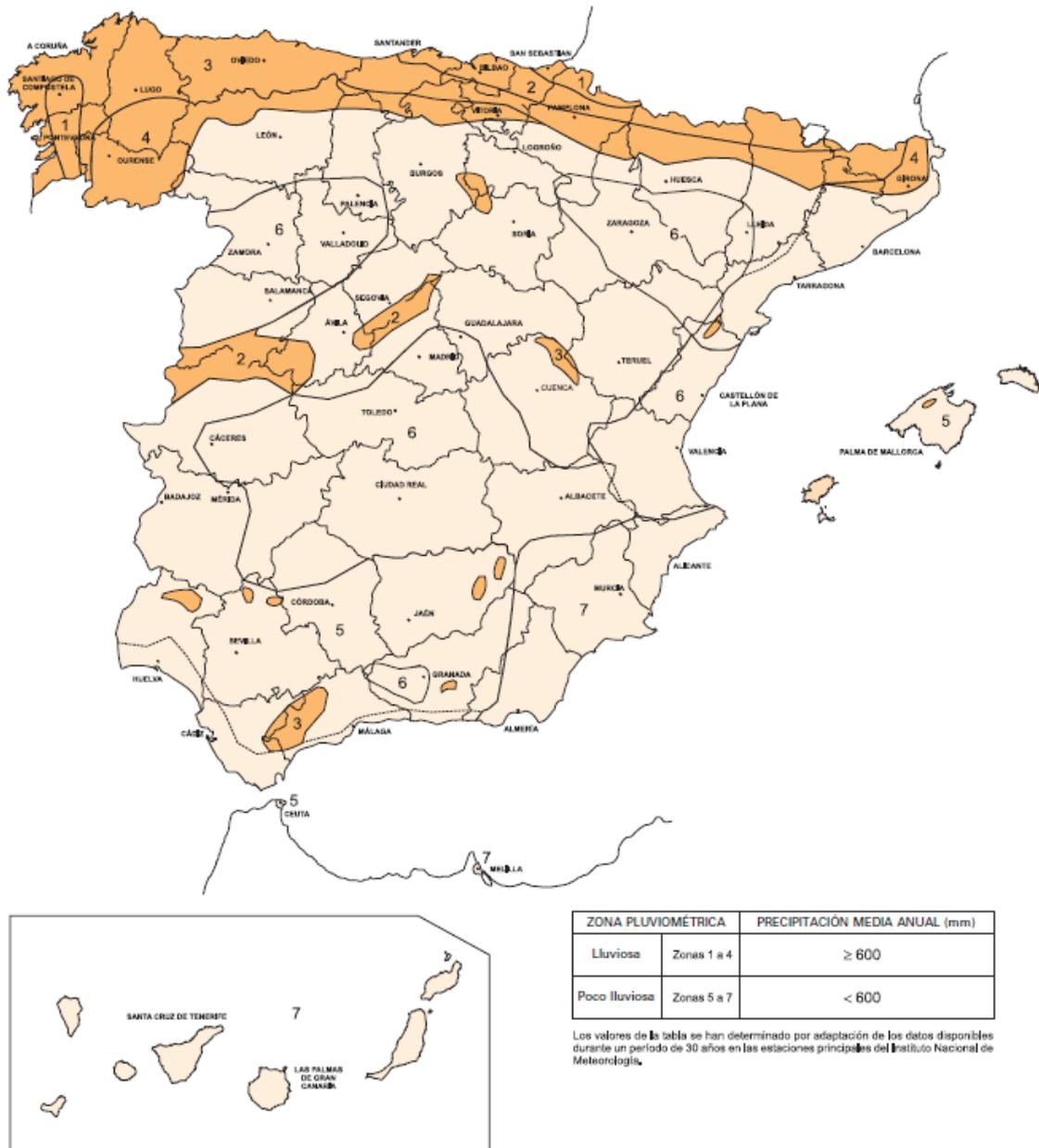


Figura 3.13 Diferentes zonas dependiendo de su precipitación media anual

Por tanto, las mezclas bituminosas se seleccionan teniendo en cuenta la zona climática térmica y pluviométrica en la que se encuentre la carretera que se está proyectando o la que va a ser rehabilitada.

Las variaciones de temperatura o variaciones térmicas se producen con mayor frecuencia que las variaciones de contenido de agua de los suelos. La variación de humedad de los suelos suele ser una variación estacional, se produce dependiendo de las estaciones, mayores humedades se dan en épocas de lluvias que en épocas más secas. Las variaciones de temperatura se producen diariamente, con mayor o menor gradiente térmico dependiendo de la época del año y la localización geográfica.

La dinámica del efecto de las temperaturas en el firme es mayor que la que provoca el efecto de la humedad en los suelos, por lo que en este trabajo solamente se contempla la modelización del efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de los materiales.

También se contempla la modelización únicamente de la temperatura debido a la mayor importancia que se le da, en el dimensionamiento de firmes, al efecto que provocan las variaciones térmicas. Existen numerosos estudios que tratan de modelizar el perfil de las temperaturas dentro de la estructura del firme (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013), lo que refleja una idea de la importancia que tiene la consideración de esta variable en el diseño de firmes.

Los modelos desarrollados para predecir las temperaturas dentro del firme se basan en el balance energético que tiene lugar su superficie (véase Figura 3.14) debido a la transferencia de calor entre la estructura y su entorno.

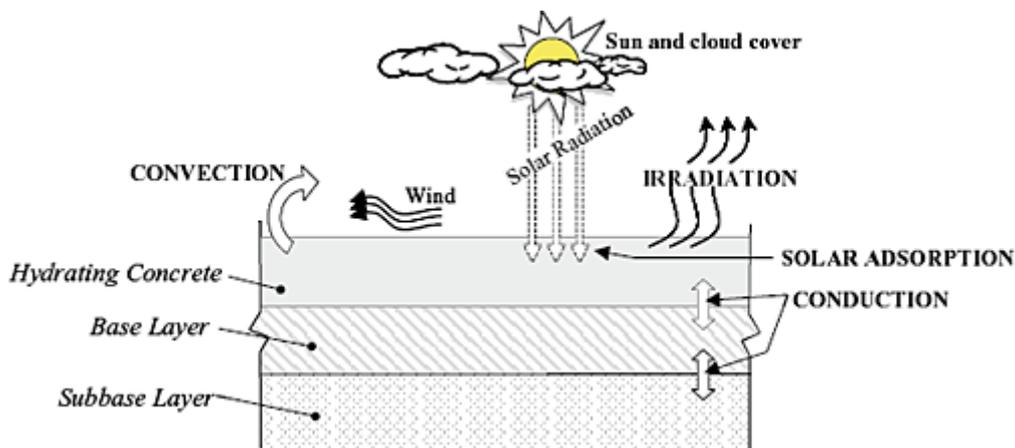


Figura 3.14 Mecanismos de transferencia de calor entre el firme y su entorno

Por tanto, al aplicar el balance energético para un elemento diferencial de la superficie se obtiene la siguiente ecuación:

$$q_{pave} = q_s + q_a + q_r + q_c + q_f|_s \quad (3.12)$$

Dónde:

- $q_{pave}$  es el flujo de calor interno del elemento de la superficie.
- $q_s$  es el flujo de calor debido a la radiación solar directa.
- $q_a$  es el flujo de calor debido a la radiación dispersada por la atmósfera.
- $q_r$  es el flujo de calor debido a la radiación emitida por el firme.
- $q_c$  es el flujo de calor debido a la convección.

- $q_f|_s$  es el flujo de calor debido a la conducción en el elemento diferencial de la superficie.

El flujo de calor interno del elemento diferencial de la superficie depende de la temperatura a la que se encuentre, por lo que una vez que se conoce la temperatura en la superficie del mismo, el intercambio de calor con las capas inferiores se realiza mediante el mecanismo de conducción que se expresa a través de la ley de Fourier (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013).

$$q_f = -K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.13)$$

Donde  $K$  representa la conductividad térmica del material.

Por tanto, la interacción del entorno en el caso de la variación de las condiciones climáticas, viene determinada por el intercambio de calor entre este y la superficie de la estructura mediante los mecanismos de radiación (tanto la solar como la irradiada por la atmósfera y por la superficie del firme) y convección. Se trata de una interacción de intercambio térmico (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013).

En el interior del firme el mecanismo predominante de intercambio de calor es el de conducción.

### 3.5 Fenómenos mecánicos modelados

Para el estudio del comportamiento de los materiales y su posterior modelización se ha empleado la dinámica de sólidos deformables. La dinámica es la rama de la física que describe un cambio de estado, estudia las causas que lo provocan y trata de describir los factores que provocan los cambios en el sistema físico, cuantificarlos y plantear sus ecuaciones. La dinámica de sólidos deformables estudia el comportamiento de las tensiones y deformaciones que se producen en el sólido debido a la aplicación de fuerzas u otras acciones que provoquen cambios en su estado de reposo. Los tipos de ecuaciones que se plantean en la dinámica de sólidos deformables son (Romero Olleros, 2011):

- Ecuaciones dinámicas: relacionan las tensiones internas del sólido con las cargas aplicadas y con las oscilaciones mecánicas provocadas.
- Ecuaciones constitutivas: relacionan las tensiones con las deformaciones. Esta relación es propia del material que constituye el elemento sólido.

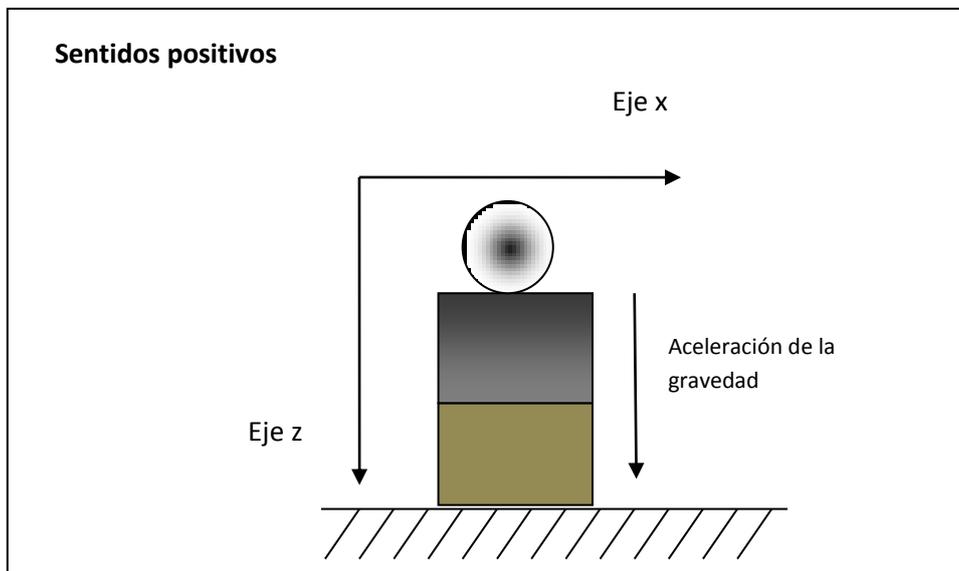
- Ecuaciones de compatibilidad: a partir de estas ecuaciones se pueden calcular los desplazamientos en función de las deformaciones y las condiciones de contorno o enlace con el exterior.

Las fuerzas que actúan sobre los sólidos deformables son:

- Las volumétricas, que actúan sobre cada diferencial de masa, predominan la fuerza de gravedad y la carga del vehículo.
- Las de superficie o contacto, aplicadas sobre el cuerpo a través de su contorno, predominan las fuerzas de confinamiento.

En este proyecto se ha modelado la fuerza de la gravedad que actúa sobre el volumen de material y las fuerzas externas aplicadas a la estructura debido al paso de la carga.

El sistema de coordenadas escogido se presenta en la Figura 3.15.



**Figura 3.15 Sistema de coordenadas seleccionado**

Las fuerzas externas aplicadas provocan que la masa de material se desplace, provocan que oscile.

También se ha modelado el amortiguamiento provocado por el material sobre la energía que se transmite a través de la estructura debido a la aplicación de la carga.

La modelización de la estructura que sufre las cargas aplicadas se ha realizado como composición de modelos más pequeños que representan un volumen de control. En este volumen de control se establece el balance energético. En la Figura 3.16 se puede apreciar la composición por modelos menores del volumen de control establecido.

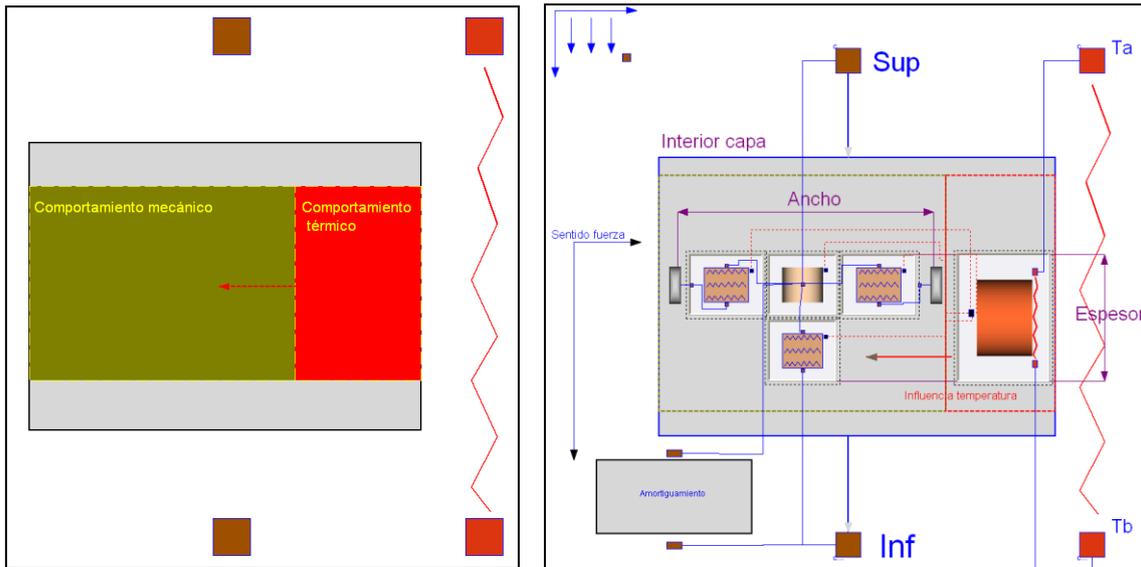


Figura 3.16 Volumen de control de la capa que forma la estructura

Este volumen de control se encuentra formado por modelos menores que se emplean para modelizar el comportamiento mecánico, el térmico y el amortiguamiento estructural o interno del material.

En cuanto al comportamiento mecánico se establecen 4 tipos de comportamientos dentro del volumen:

- Comportamiento inercial: en el centro de la parte mecánica del volumen de control. Es sobre el que se aplican todas las fuerzas.
- Comportamiento mecánico izquierda: en la parte izquierda, representa el comportamiento del material en ese sentido.
- Comportamiento mecánico derecha: en la parte derecha, representa el comportamiento del material en ese sentido.
- Comportamiento mecánico profundidad: en el fondo, es el que representa el comportamiento del material en la dirección vertical.

El comportamiento mecánico se encarga de establecer las ecuaciones dinámicas del sistema. Representa la masa de material que se puede desplazar. Está modelizado por la clase *Comp\_Inercial*, que se encuentra en el grupo de *Comportamientos* de la librería. Esta clase contiene un elemento atómico denominado *ElementoInercial* donde se aplica la segunda ley de Newton:

$$\begin{aligned} \frac{F_x}{S} &= \rho \cdot dz \cdot a_x \\ \frac{F_z}{S} + \frac{peso_z}{S} &= \rho \cdot dz \cdot a_z \end{aligned} \quad (3.14)$$

Donde:

- $F_x$  y  $F_z$  son las fuerzas aplicadas en el eje x y en el eje z sobre la masa de material.
- $S$  es la superficie sobre la que se aplican las fuerzas.
- $peso_z$  es la fuerza debida a la gravedad.
- $\rho$  es la densidad medida en  $\text{kg/m}^3$  del material.
- $dz$  es el espesor del material.
- $a_x$  y  $a_z$  son la aceleración de la masa de material en el eje x y en el eje z respectivamente.

Las ecuaciones (3.14) representan las ecuaciones dinámicas del sistema. El peso del material se tiene en cuenta en el inicio de la simulación pero se obvia y se reinician las variables de estado una vez que se ha empleado en el cálculo del confinamiento.

El hecho de eliminar el peso del material una vez que se ha calculado el confinamiento se debe a que las variables que se emplean como variables de estado en el modelo son las posiciones de las masas. Esto provoca que al iniciar la simulación el sistema no parta del reposo, debido a la consideración del peso y el empleo de muelles. Primero se produce la consolidación de la estructura. Una vez que se conoce el efecto de esta consolidación, se reinician las variables de estado a su valor original y se elimina el efecto del peso en las ecuaciones (3.14), de forma que la estructura parte del reposo.

Las condiciones de contorno se establecen mediante las clases *Pared* y *Suelo*, contenidas en el grupo de *EntornoMecanico*. Se impiden los movimientos en ambas direcciones y se les da una configuración fija dentro de la estructura. Se pueden observar las clases *Pared* en la Figura 3.16, donde se encuentran fijando los extremos de los comportamientos mecánicos de la izquierda y de la derecha. La clase *Suelo* se utiliza como condición de contorno para la estructura global cuando está formada por varias capas.

Las ecuaciones constitutivas de los materiales se modelan a partir de los comportamientos mecánicos de la izquierda, de la derecha y en profundidad.

Las ecuaciones de compatibilidad relacionan las deformaciones de los modelos de comportamiento con los desplazamientos de los extremos que los forman, de modo que se relacionan las fuerzas en los extremos con los desplazamientos del componente inercial.

Los sólidos deformables presentan distintos comportamientos (elástico, plástico, viscoso, etc) dependiendo de cómo sea la relación entre las tensiones y las deformaciones, es decir dependiendo del tipo de relación constitutiva (Torrano y Herrero Pérez, 2011).

A continuación se describe la modelización adoptada para cada uno de los materiales que componen la estructura del firme en función del tipo de comportamiento.

### 3.5.1 Modelización de los suelos granulares, los suelos cohesivos y las zahorras

Los suelos granulares y las zahorras se considera que presentan un comportamiento elástico y lineal en todas las direcciones.

El comportamiento en profundidad está gobernado por el módulo de compresibilidad  $K$  y el comportamiento en horizontal está gobernado por el módulo de corte del material  $G$ . Ambos módulos se obtienen a través de las relaciones con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson expresadas en (3.6) y (3.4) respectivamente.

En el caso de los suelos cohesivos, no se modeliza la dependencia del módulo con la succión, y por tanto con la humedad. Se modeliza su comportamiento como si se tratara de un suelo granular.

#### Modelización del confinamiento

El conocimiento del comportamiento dinámico de los suelos granulares es muy importante para explicar la respuesta de estos materiales ante las deformaciones producidas por la aplicación de cargas dinámicas. Uno de los parámetros más importantes en el comportamiento dinámico de los suelos es el módulo de rigidez o de corte. La relación entre la tensión de corte y la deformación en un suelo depende del nivel de deformación. Para niveles pequeños ( $10^{-6} - 10^{-5}$ ), como los que se producen en los firmes de carreteras, el comportamiento del suelo se puede representar mediante un modelo elástico lineal (Ortiz-Pulido, Gaitán-Serrano y Camacho-Tauta, 2013).

En el caso de pequeñas deformaciones el módulo de rigidez máximo o inicial define la respuesta tensión-deformación del suelo. Este módulo se encuentra afectado por distintos parámetros, de los cuales los que más influyen son el confinamiento efectivo ( $\sigma'_0$ ) y la relación de vacíos que se mide mediante el índice de poros ( $e$ ). El confinamiento efectivo es igual a la presión total ejercida sobre una masa de suelo menos la presión de los poros. El confinamiento efectivo es importante ya que controla

la respuesta del material ante compresiones y resistencia cortante (Ortiz-Pulido, Gaitán-Serrano y Camacho-Tauta, 2013).

La dependencia del módulo con respecto a estos factores sigue una ecuación del tipo:

$$G_0 = A \cdot f(e) \cdot (\sigma'_0)^n \quad (3.15)$$

Donde  $A$  y  $n$  son constantes que dependen del tipo de material y se determinan experimentalmente y  $f(e)$  es una relación que depende del índice de poros (Ortiz-Pulido, Gaitán-Serrano y Camacho-Tauta, 2013).

Cuando el suelo no se encuentra sometido a cargas externas, los esfuerzos totales ejercidos sobre una masa del mismo a una determinada profundidad son función del peso propio (véase Figura 3.17), el peso del material que tiene por encima, y de la presión en dirección horizontal. Esto provoca que el confinamiento efectivo dependa de la profundidad, aumentando conforme aumenta esta (Muelas Rodriguez).

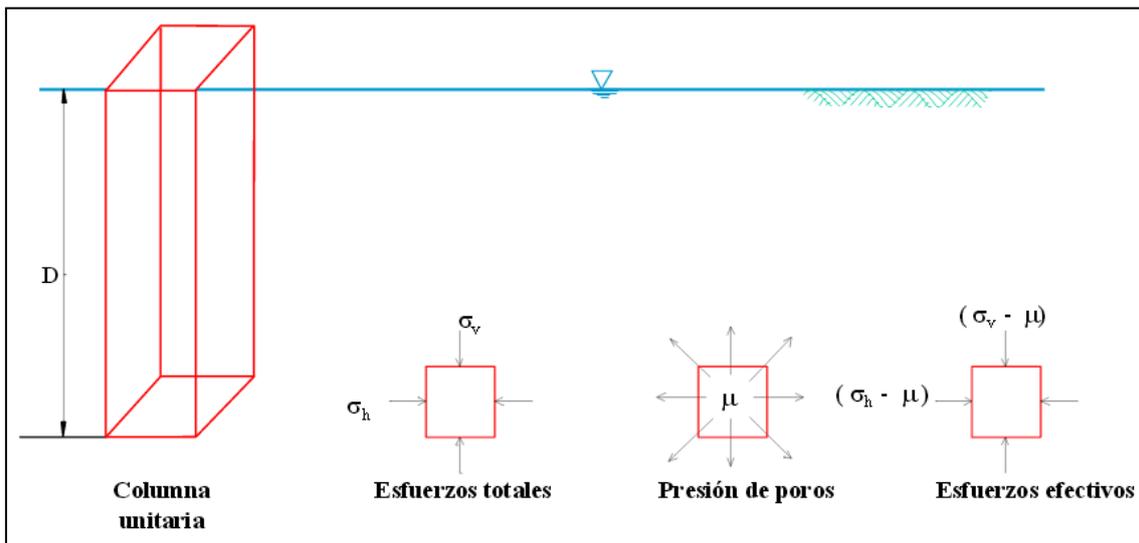


Figura 3.17 Esfuerzos en reposo debidos al peso propio

Para un terreno horizontal y sedimentado se puede establecer una relación sencilla entre la tensión vertical debida al peso propio del suelo y la tensión en la dirección horizontal. Esta relación se establece a través del coeficiente de presión lateral  $K$  cuya expresión es:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (3.16)$$

Cuando no se han producido deformaciones laterales en el terreno este coeficiente se denomina coeficiente de presión lateral en reposo ( $K_0$ ) y para una arena suele

encontrarse entre 0,4 y 0,5 pero puede alcanzar valores de hasta 3 (Muelas Rodriguez).

El efecto del confinamiento de los suelos se modeliza mediante la variación de los módulos de rigidez dependiendo de la profundidad dentro de la capa a través de una relación del tipo (3.15). En este proyecto se emplea la expresión (Rodriguez Segurado, 2005):

$$G = 10^3 \cdot k_2 \cdot \sqrt{\sigma'_{0m}} =$$

$$= 10^3 \cdot k_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\sigma_{peso} + 2 \cdot \sigma_{lateral})} \quad (3.17)$$

$\sigma'_{0m}$  representa la tensión de confinamiento efectivo media debida al peso propio con:

$$\sigma_{peso} = \rho \cdot g \cdot dz + peso_{encima} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{lateral} = K_0 \cdot \sigma_{peso} \quad (3.19)$$

Donde:

- $K_0$  coeficiente de empuje lateral de los suelos en reposo.
- $\rho$  densidad del material del volumen de control.
- $g$  aceleración de la gravedad.
- $dz$  espesor del volumen de control.
- $peso_{encima}$  peso por unidad de superficie por encima del volumen de control debido al resto de materiales.
- $k_2$  constante propia del tipo de suelo que se está modelando que se calcula a partir del índice de poros o de la densidad relativa.

Esta modelización del confinamiento para el módulo de rigidez se ha propuesto como correlación empírica para un tipo específico de suelos: las arenas (Rodriguez Segurado, 2005). La constante  $k_2$  es propia para cada tipo de suelo y depende del índice de poros ( $e$ ) o de la densidad relativa de la arena ( $D_r$ ) según la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Relación entre  $e$  y  $k_2$  y  $D_r$  y  $k_2$ 

$e$	$k_2$	$D_r(\%)$	$k_2$
0,4	70	30	34
0,5	60	40	40
0,6	51	45	43
0,7	44	60	52
0,8	39	75	59
0,9	34	90	70

### Modelización de la anisotropía

Los suelos presentan comportamientos complejos que provocan que su respuesta ante las tensiones se aleje de la elástica y lineal, la cual no simula con suficiente precisión lo que sucede en la realidad.

Uno de estos comportamientos es la anisotropía. La anisotropía es una propiedad del suelo debido a la cual este presenta diferente comportamiento mecánico dependiendo de la dirección de aplicación de la tensión, por lo que responde de forma diferente en la dirección vertical a como lo hace en la dirección horizontal.

En el caso de los suelos que se usan como parte de la estructura del firme, debido al proceso de construcción y al paso de la carga, presentan esta propiedad de forma más notoria. Normalmente la anisotropía en este tipo de materiales se considera de tipo transversal, es decir que el módulo elástico vertical es mayor que el horizontal (Mateos Moreno, 2003).

Para modelizar la anisotropía del suelo en los modelos de firmes se suele emplear la siguiente relación entre el módulo de Young en sentido vertical y el módulo en sentido horizontal (Mateos Moreno, 2003):

$$2 \leq \frac{E_{vertical}}{E_{horizontal}} \leq 3 \quad (3.20)$$

Por tanto, teniendo en cuenta la anisotropía del suelo mediante la relación (3.18) las ecuaciones constitutivas que relacionan las tensiones y deformaciones para los materiales granulares y cohesivos queda de la forma:

Para el comportamiento horizontal:

$$\sigma = G \cdot \varepsilon_c = \frac{E_{horizontal}}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \varepsilon_c \quad (3.21)$$

Para el comportamiento vertical:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_v = \frac{E_{vertical}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \cdot \varepsilon_v \quad (3.22)$$

Donde:

- $\varepsilon_c$  es la deformación tangencial.
- $\varepsilon_v$  es la deformación volumétrica.

### 3.5.2 Modelización de las mezclas bituminosas

Las mezclas bituminosas presentan un comportamiento mixto entre elástico y viscoso, un comportamiento viscoelástico. Debido a la fuerte dependencia del ligante con la temperatura y la frecuencia de aplicación de carga del betún, estos materiales presentan variaciones en sus propiedades mecánicas, es decir variaciones en los módulos dinámicos de rigidez (Cárdenas and Fonseca, 2009).

Para modelizar el comportamiento viscoelástico de las mezclas bituminosas se emplea el modelo de Kelvin-Voight (véase Figura 3.18) donde se unen en paralelo un muelle y un amortiguador. En el modelo de Kelvin-Voight la tensión y la deformación se relacionan según la ecuación (Chen, 2009):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.23)$$

Donde:

- $E$  es el módulo elástico.
- $\eta$  es el módulo viscoso.

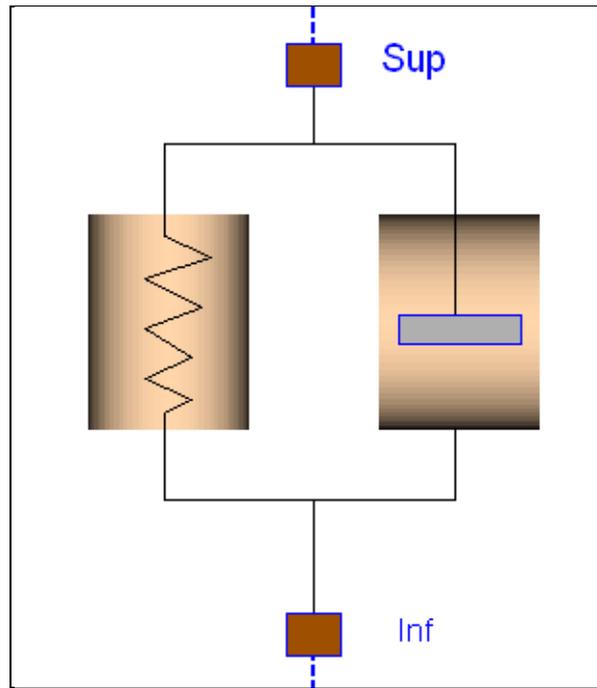


Figura 3.18 Modelo de Kelvin-Voight para representar el comportamiento viscoelástico

Ante un esfuerzo constante ( $\sigma = cte$ ) aplicado al modelo de Kelvin-Voight, la respuesta de los elementos es la misma, se aproxima al valor de  $\sigma/E$  con el paso del tiempo. La fuerza externa es la suma de la fuerza en los dos elementos. Cuando se suprime el esfuerzo aplicado, el material recupera su posición original después de un cierto retardo, como se puede observar en la Figura 3.19.

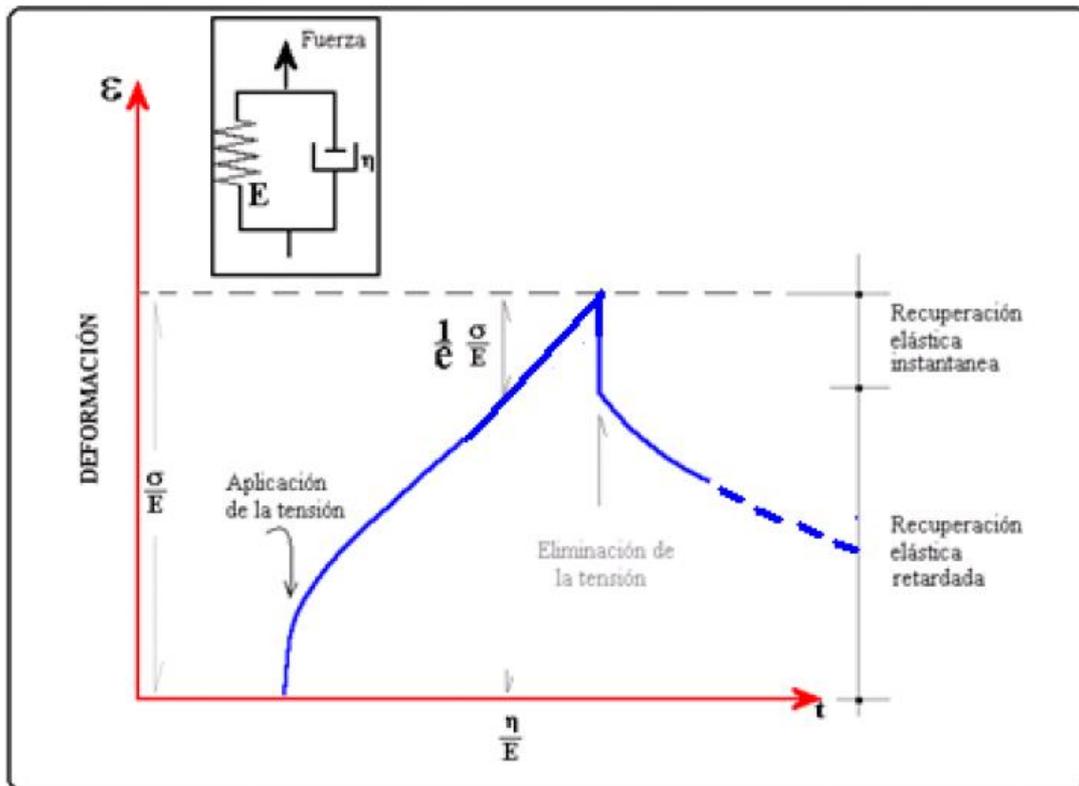


Figura 3.19 Respuesta del modelo de Kelvin-Voigt ante un esfuerzo constante

Los parámetros  $E$  y  $\eta$  del modelo de Kelvin-Voigt se deben ajustar a la función respuesta de la mezcla obtenida en el laboratorio. En este proyecto se trabaja con la función respuesta denominada módulo complejo (3.8) presentada anteriormente.

Para deformaciones pequeñas el comportamiento de la mezcla ante cargas verticales, es decir el comportamiento en profundidad, se puede asemejar a un comportamiento elástico, independiente de la frecuencia de carga (Mateos Moreno, 2003). Para ello se emplea el módulo de compresibilidad del material  $K$ . Por lo tanto, las ecuaciones constitutivas que relacionan las tensiones y deformaciones para los materiales bituminosos quedan de la forma:

Para el comportamiento horizontal:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_c + \eta \cdot \frac{d\varepsilon_c}{dt} \quad (3.24)$$

Para el comportamiento vertical:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_v \quad (3.25)$$

Donde:

- $\varepsilon_c$  es la deformación tangencial.

- $\varepsilon_v$  es la deformación volumétrica.

### Modelización del efecto de la temperatura y la frecuencia de carga

Para tener en cuenta simultáneamente las modificaciones que provoca la frecuencia de aplicación de la carga y la temperatura en el valor del módulo complejo de la mezcla bituminosa, se emplea el principio de superposición tiempo-temperatura (Camacho Lasso y Contreras Marin, 2010). Según este principio un incremento o descenso en la temperatura tendrá un efecto sobre el módulo del material equivalente a si se comprimiera o expandiera la escala de tiempo (véase Figura 1.1).

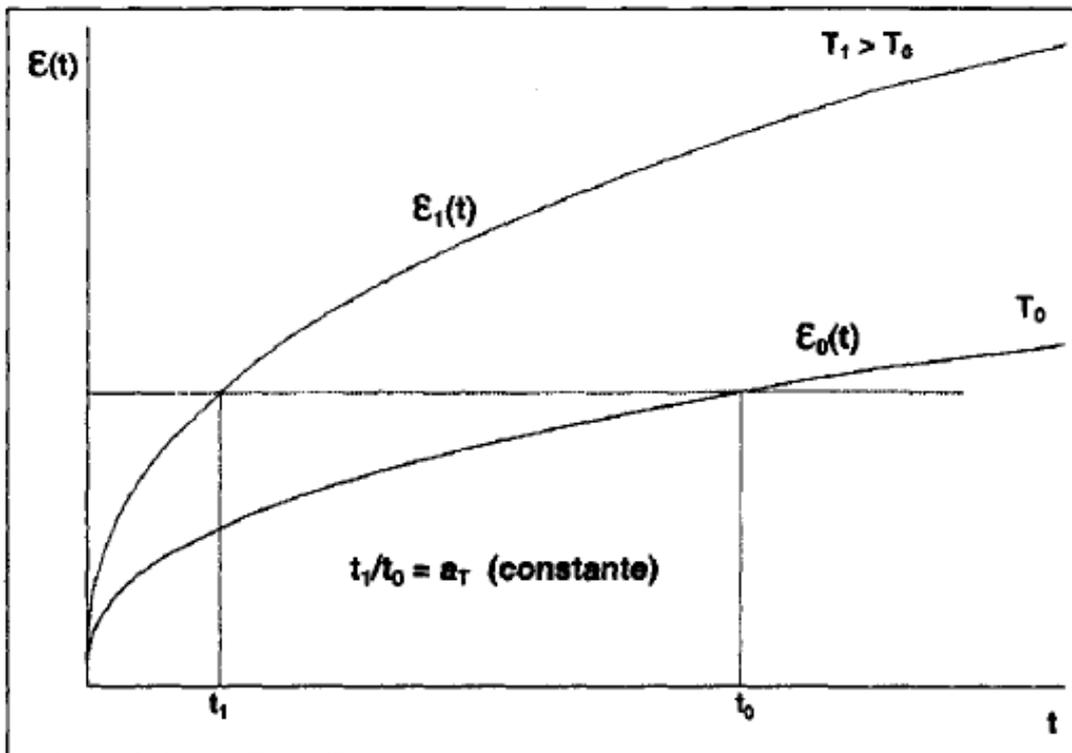


Figura 3.20 Respuesta de la mezcla con distinta temperatura

Cuando se tienen dos curvas de respuesta de un material, es decir las deformaciones con el tiempo ( $\varepsilon_1(t)$  y  $\varepsilon_0(t)$ ) a dos temperaturas diferentes, serán la misma función trasladada en el tiempo. La relación  $a_T = t_1/t_0$  es constante, lo que lleva a:

$$a_T = t_1/t_0 \Rightarrow \varepsilon_1(t) = \varepsilon_0(t/a_T) \quad (3.26)$$

El factor de corrección  $a_T$  es característico para cada material y depende de la temperatura únicamente. En el caso del rango de temperaturas considerado en los firmes, esta dependencia se puede expresar del modo:

$$\log(a_T) = -\beta \cdot (T - T_0) \quad (3.27)$$

Donde:

- $\beta$  es un parámetro que debe ser obtenido por el ajuste de los datos experimentales.
- $T$  y  $T_0$  son la temperatura a la que se obtienen los datos y una temperatura de referencia respectivamente.

La frecuencia de carga (inverso del tiempo de carga) y la temperatura se junta en una variable denominada frecuencia reducida ( $f_r$ ) cuya expresión resulta (García S., 2012):

$$\log(f_r) = \log(f) + \log(a_T) \quad (3.28)$$

Donde:

- $f$  es la frecuencia de carga aplicada a una temperatura  $T$ .
- $a_T$  el factor de corrección para la temperatura  $T$  a una temperatura de referencia  $T_0$ .

Empleando este principio se desarrolla el concepto de curva maestra del módulo dinámico. Con esta curva se puede describir la dependencia del material para cualquier combinación de frecuencia y temperatura. La expresión matemática de la curva maestra es (García S., 2012):

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \cdot \log(f_r)}} \quad (3.29)$$

Donde:

- $f_r$  es la frecuencia reducida a la temperatura de referencia.
- $\delta$  valor mínimo de  $E^*$ .
- $\delta + \alpha$  valor máximo de  $E^*$ .
- $\beta, \gamma$  parámetros que describen la forma de la función sinusoidal.

De este modo, para una determinada temperatura y frecuencia de carga se calcula la frecuencia de carga reducida a una temperatura de referencia y se emplea en la ecuación (3.27) para determinar el módulo de la mezcla para esa combinación de frecuencia de carga y temperatura (Camacho Lasso y Contreras Marin, 2010).

### 3.5.3 Modelización del amortiguamiento del material

Los dos tipos de amortiguamiento que se modelizan son:

- El amortiguamiento estructural debido a la fricción entre las partículas del material.
- El amortiguamiento geométrico.

El amortiguamiento estructural se reproduce a través de la inclusión de un componente en la sub-capa que provoque una disipación de energía mecánica. Este componente se modela como un amortiguador lineal con respecto a la velocidad de los conectores donde se conecta (véase Figura 3.21).

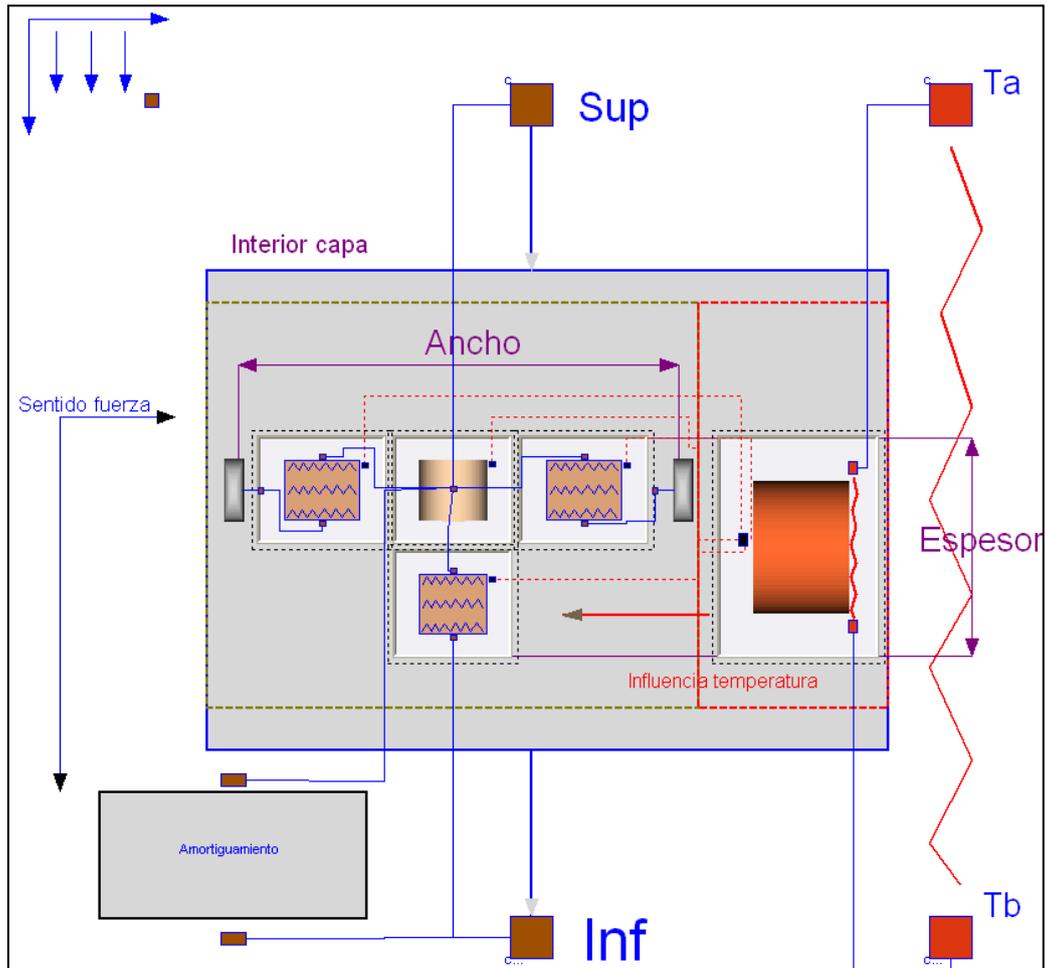


Figura 3.21 Conexión del amortiguador que simula el amortiguamiento estructural de la Sub\_Capa

En este tipo de sistemas físicos no lineales en el tiempo y con muchos grados de libertad, la obtención de una matriz de amortiguamiento es un problema complejo. Una forma de simplificarlo consiste en utilizar el método del amortiguamiento de Rayleigh. En este método el amortiguamiento se hace proporcional a la masa y a la rigidez del siguiente modo (Trigos Salas, 2007):

$$[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K] \quad (3.30)$$

Donde:

- $[C]$  es la matriz de amortiguamiento simétrico del sistema.
- $[M]$  es la matriz de masas simétrica del sistema.
- $[K]$  es la matriz de rigidez simétrica del sistema.
- $\alpha$  y  $\beta$  son las constante de proporcionalidad.

En este proyecto se realiza una simplificación del problema de la obtención de los coeficientes de los amortiguadores que representan el amortiguamiento estructural con el objetivo de obtener un menor número de parámetros para ajustar los datos del modelo.

La simplificación que se realiza en la modelización de este fenómeno es considerar que la constante de amortiguamiento del amortiguador de la *Sub\_Capa* depende del valor del módulo, de rigidez o de compresibilidad y de la masa del volumen de control, y de dos parámetros de amortiguamiento (*amort\_x* y *amort\_z*) que son modificables por el usuario y que afectan al módulo del material en cada una de las direcciones. Estos parámetros son los coeficientes de ajuste del amortiguamiento estructural (véase Figura 3.22).

```

model Amortiguamiento
  "Representa el amortiguamiento estructural de la sub-capas."
  extends Interfaces.AdherenciaMecanica;

  parameter Real amort_x = 0.35
    "Parámetro de ajuste de la amortiguación del material en horizontal.";
  parameter Real amort_z = 0.35
    "Parámetro de ajuste de la amortiguación del material en vertical.";
  parameter Real masa "Masa del elemento.";
  parameter Real E "Módulo elástico del material.";
  parameter Real Poisson "Coeficiente de Poisson del material.";

  Real f[2] (unit="N") "Fuerza dentro del elemento.";
  Real s[2] (unit="m") "Distancia relativa entre conectores.";
  Real v[2] (unit="m/s", start={0,0}) "Velocidad relativa entre conectores.";

  annotation (Icon(
    Rectangle(extent=[-62,68; 62,-60], style(
      color=0,
      rgbcolor={0,0,0},
      thickness=2,
      fillColor=30,
      rgbfillColor={215,215,215},
      fillPattern=1)), Text(
      extent=[-50,18; 48,0],
      style(color=3, rgbcolor={0,0,255}),
      string="Amortiguamiento")), Diagram);

equation
  s = cMinf.s - cMsup.s;
  v = der(s);

  //Simplificación:
  f[1] = (amort_x*(E/(2*(1+Poisson)))+masa)*v[1];
  f[2] = (amort_z*(E/(3*(1-2*Poisson)))+masa)*v[2];

  cMinf.F = f;
  cMsup.F = -f;
end Amortiguamiento;

```

Figura 3.22 Amortiguamiento estructural del material

Por tanto, las ecuaciones para el amortiguamiento del material quedan de la forma:

$$\begin{aligned}
 f[1] &= (amort_x \cdot G + Masa) \cdot v[1] \\
 f[2] &= (amort_z \cdot K + Masa) \cdot v[2]
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

Para tener en cuenta el amortiguamiento geométrico se utiliza la idealización teórica de Boussinesq sobre la distribución de las tensiones en la masa de suelo, cuando se aplica una carga estática sobre una superficie cuadrada de lado dos veces el radio de la huella del neumático (Leoni, 2008).

De forma aproximada se puede considerar que las tensiones se propagan en la dirección vertical con forma de pirámide truncada que tiene una pendiente de sus

planos laterales de 1 en vertical y 0,5 en horizontal, y suponiendo que en los planos entre el origen y el valor de profundidad  $z$  las tensiones son constantes (véase Figura 3.23) (Leoni, 2008).

Cuando la superficie es una base cuadrada de dimensiones  $B \times B$  y con una carga aplicada sobre la misma igual a  $Q$ , la tensión que llega a una profundidad de  $2 \cdot B$  se puede estimar que será un 10% de la tensión aplicada por la carga  $Q$  sobre la superficie.

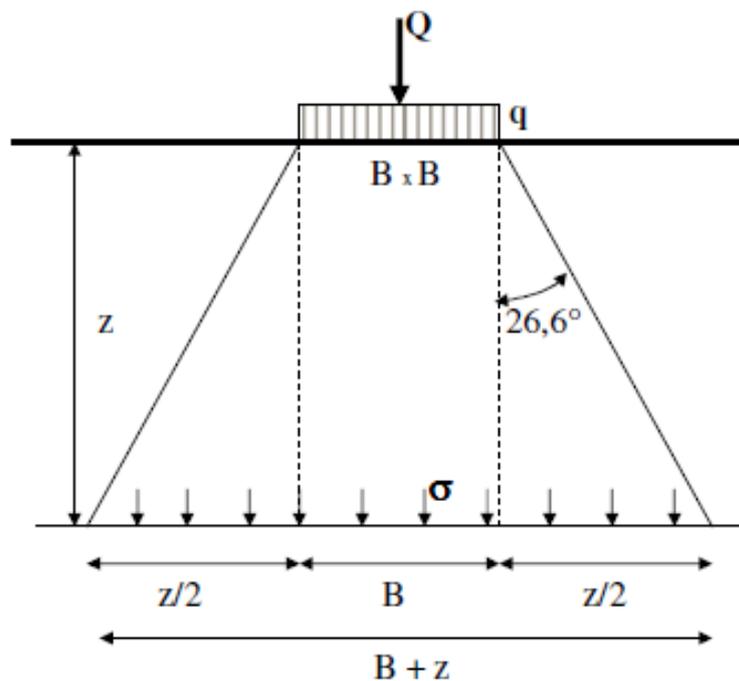


Figura 3.23 Distribución de tensiones bajo una base cuadrada

Para la modelización del efecto del amortiguamiento geométrico, se modifica la superficie sobre la que se aplica la fuerza en cada una de las *Sub\_Capas* en función de su profundidad dentro de la *Capa*.

Como parámetro de ajuste, se considera el ángulo  $\theta$  formado por el borde de la huella del neumático y la vertical.

Este parámetro tendrá el siguiente valor, por defecto:

$$\theta = 26,6^\circ \quad (3.32)$$

De forma que se cumpla la distribución teórica de tensiones según Boussinesq. En cualquier caso el ángulo es un parámetro de la *Capa* modificable por el usuario para ajustar esa distribución de tensiones.

En la Figura 3.24 se puede observar la composición de la *Capa* con las *Sub\_Capas* y la variación de la superficie sobre la que se aplica la carga en cada una de ellas según la distribución de tensiones explicada.

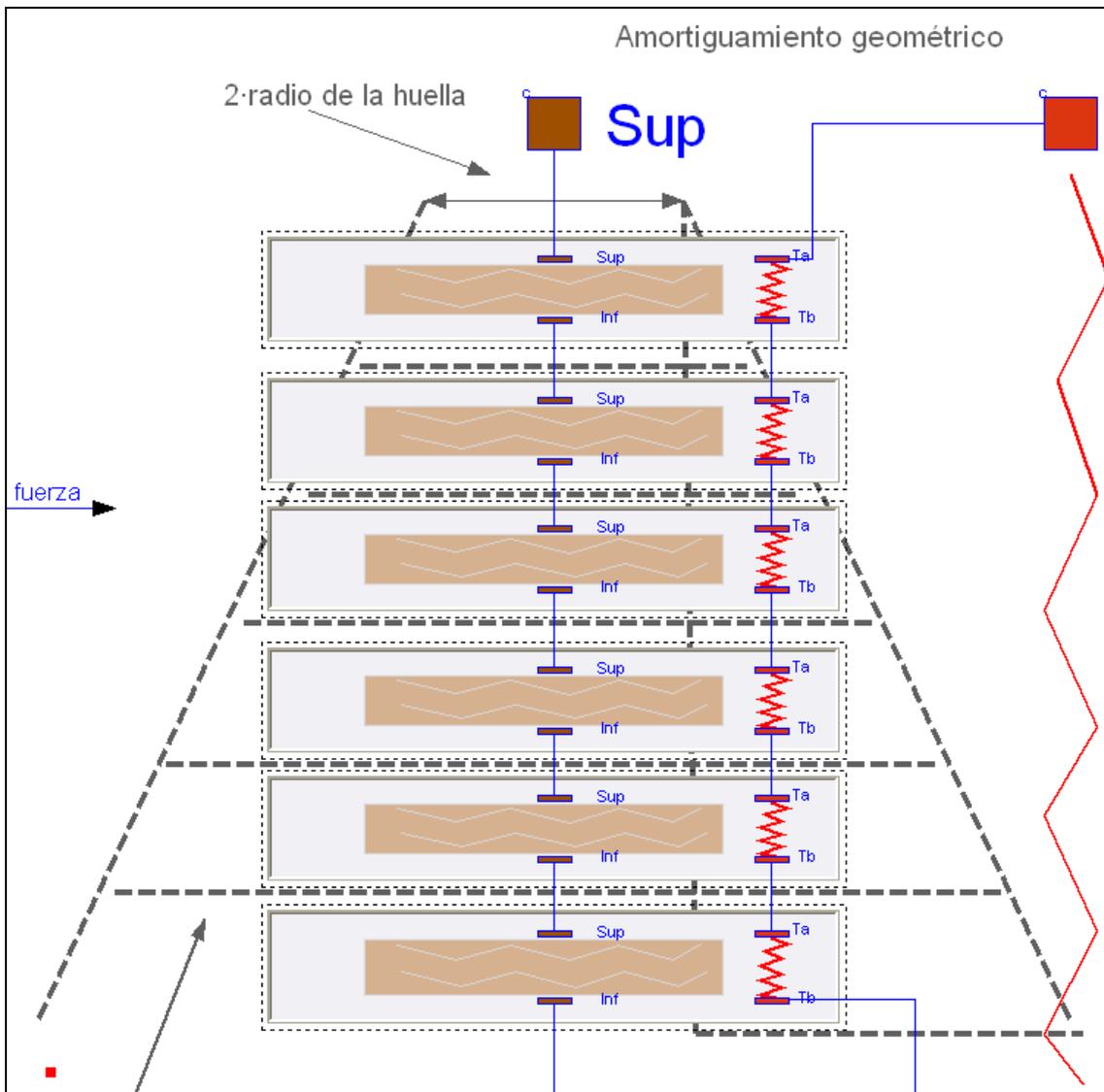


Figura 3.24 Aplicación del amortiguamiento geométrico en cada Capa

### 3.6 Fenómenos térmicos modelados

Los fenómenos térmicos que han sido modelados corresponden con los mecanismos de transferencia del calor que se producen entre la superficie del firme y el entorno debido a las diferencias de temperatura entre ambos (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013). Los flujos de calor entre el entorno y la superficie del firme se modelan como fenómenos de transporte entre volúmenes de control que relacionan el flujo de calor intercambiado por los volúmenes de control con sus temperaturas internas.

### 3.6.1 Transferencia de calor debido al mecanismo de convección

Se ha modelado este mecanismo mediante un objeto que permite relacionar el flujo de calor debido al contacto del aire con la superficie del firme. Para la modelización de este tipo de mecanismo de transferencia de calor se hace uso de la ley de enfriamiento de Newton. Esta ley relaciona el flujo de calor que se produce entre los dos medios y la variación de sus temperaturas según la ecuación:

$$q_c = h_i \cdot (T_{firme} - T_{aire}) \quad (3.33)$$

Donde:

- $q_c$  es el flujo de calor debido al proceso de convección.
- $h_i$  es el coeficiente de convección medido en  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .
- $T_{firme}$  es la temperatura del firme en  $^\circ C$ .
- $T_{aire}$  es la temperatura del aire en  $^\circ C$ .

El flujo de calor tiene sentido del medio con mayor temperatura hacia el de menor.

### 3.6.2 Transferencia de calor debido al mecanismo de radiación

Este mecanismo se debe al calor que emiten los cuerpos debido a su temperatura. En este caso se encuentran tres tipos de flujos de calor debido a la radiación.

El flujo de calor debido a la radiación solar, el flujo de calor debido a la radiación emitida por el firme y el flujo de calor debido a la radiación dispersada por la atmosfera. Estos dos últimos flujos se deben al mismo tipo de radiación, a la radiación de onda larga, por lo que se modelan en conjunto como se verá más adelante.

El Sol emite radiación de onda corta que llega a la atmósfera y parte es absorbida y parte reflejada, tanto por la propia atmósfera como por los demás cuerpos. La radiación solar provoca un flujo de calor incidente en la superficie del firme que se puede expresar mediante la ecuación:

$$q_s = (1 - \alpha) \cdot R_{solar} \quad (3.34)$$

Donde:

- $q_s$  flujo de calor debido a la radiación solar incidente.
- $\alpha$  Albedo, que es la fracción de radiación solar reflejada por la superficie del firme. En el caso de las mezclas bituminosas suele variar entre 0.15 y 0.35 (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013).
- $R_{solar}$  radiación solar incidente sobre la superficie.

Por otra parte, la radiación absorbida por la atmosfera se emite de nuevo hacia la superficie terrestre en forma de onda larga. Parte de este flujo de calor emitido debido a la radiación de onda larga de la atmósfera es absorbido por la superficie del firme. Del mismo modo, la superficie del firme emite radiación de onda larga como un cuerpo negro, por lo que sigue la ley de Stefan-Boltzman. Por tanto, el flujo de calor intercambiado por la atmosfera y la superficie del firme debido a este tipo de radiación se puede expresar a través de la ecuación:

$$q_a - q_r = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{aire}^4 - \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot T_{firme}^4 \quad (3.35)$$

Donde:

- $q_a$  es el flujo de calor de radiación de onda larga emitida por la atmósfera debido a su temperatura absorbido por la superficie del firme.
- $q_r$  es el flujo de calor de radiación de onda larga debido a la temperatura emitido por la superficie del firme.
- $\varepsilon_a$  es el coeficiente de absorción de la superficie del firme para radiación de onda larga.
- $\varepsilon_e$  es el coeficiente de emisión de la superficie del firme.
- $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman.
- $T_{aire}$  y  $T_{firme}$  son las temperaturas del aire y del firme respectivamente en grados K.

### 3.6.3 Transferencia de calor debido al mecanismo de conducción

El intercambio de calor dentro de la estructura del firme se produce principalmente mediante el mecanismo de conducción. Este mecanismo está gobernado por la ley de Fourier, la cual establece una proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura de manera que se puede expresar:

$$q_f = -K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.36)$$

Donde:

- $q_f$  flujo de calor debido a la conducción dentro de un sólido.
- $K$  constante característica del material denominada conductividad térmica.

### 3.6.4 Temperatura variable y fija

Además se modeliza una temperatura variable, de forma que se pueda simular la variación térmica diaria o cualquier otro tipo de variación térmica, y una temperatura fija. Estos componentes proporcionan las condiciones de contorno para la parte térmica.

La temperatura variable permite establecer los datos de entrada para la transferencia de calor en el caso de los mecanismos de convección y radiación debida a la atmósfera.

La temperatura fija permite establecer la condición de contorno en el interior del firme a una profundidad determinada, a partir de la cual la temperatura se mantiene fija en un valor determinado que debe conocerse a priori (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013).

## 3.7 Simplificaciones e hipótesis de modelado

La mayor simplificación realizada es la consideración de un problema tridimensional como bidimensional, se describe en dos dimensiones, un eje vertical o eje z y un eje horizontal o eje x.

Esta simplificación se ha realizado para obtener modelos más sencillos y rápidos de simular. Se hace la hipótesis de que las tensiones en el eje y son cero ( $\sigma_y = 0$ ) porque  $y = 0$  se considera una superficie infinita, con lo que las dimensiones en las otras dos coordenadas son mucho menores (Perelli Botello, 2012).

Solamente se tienen en cuenta tensiones verticales y tensiones en el eje de avance del vehículo. Se realiza la hipótesis de pequeñas deformaciones. La estructura no falla por la aplicación de cargas muy grandes, falla debido a un proceso de fatiga provocado por la acumulación de pequeñas deformaciones.

Las deformaciones y las tensiones se calculan en cada una de las sub-capas que componen las capas del material como se muestra en la Figura 3.25.

Al aplicarse una fuerza sobre el componente inercial del modelo, este se desplaza en función de las respuestas de cada uno de los comportamientos simulados (derecha, izquierda y profundidad). Los componentes mecánicos tienen impedido el movimiento de traslación en alguno de los ejes de uno de sus conectores, ya que se encuentran conectados con las clases *Pared* y *Suelo* (cuando se trata de la última sub-capas de una estructura), para la modelización de las condiciones de contorno mecánicas.

Cuando una sub-capa se conecta a otra sub-capa el comportamiento mecánico en profundidad se acopla con los movimientos de la otra sub-capa. El vehículo se simula como si circulara de izquierda a derecha pero se podría variar el sentido al modificar el signo de la carga aplicada sobre el eje horizontal.

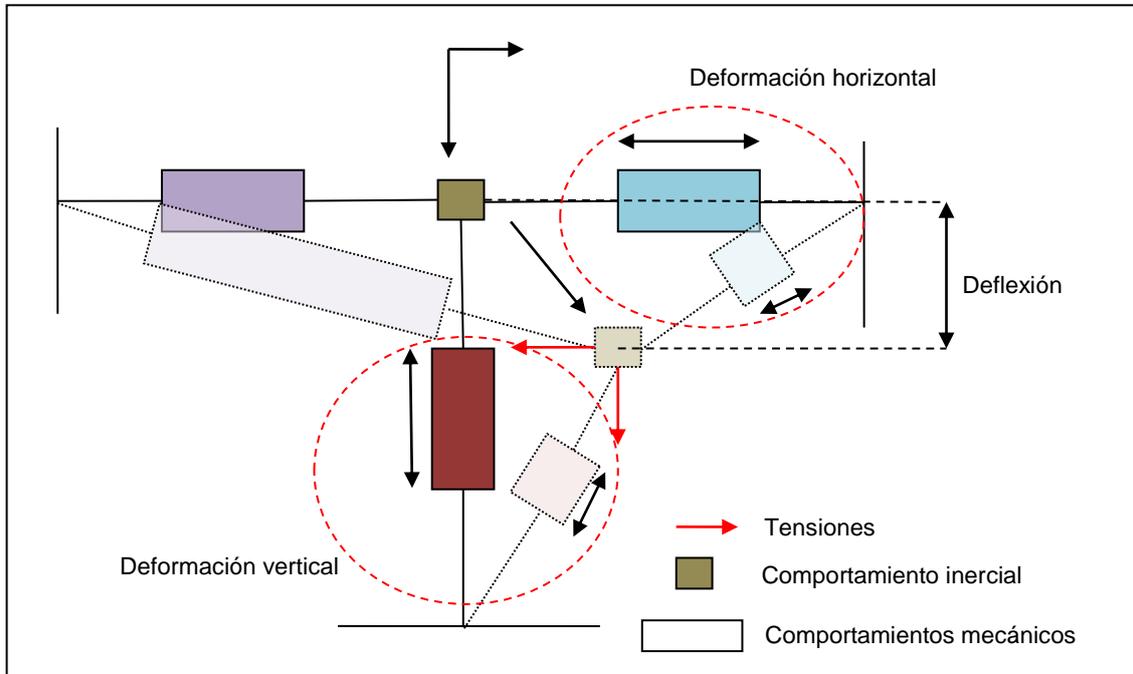


Figura 3.25 Tensiones y deformaciones dentro de la sub-capa

### Las deflexiones ( $\delta$ )

Las deflexiones se calculan como la diferencia entre la posición en el eje vertical del componente inercial y su posición antes de la aplicación de la carga.

### Las deformaciones verticales ( $\varepsilon_v$ )

Las deformaciones verticales se calculan como la deformación que sufre el comportamiento mecánico de profundidad de la sub-capa.

### Las deformaciones horizontales ( $\varepsilon_c$ )

Como el sentido de avance del vehículo es a lo largo del eje horizontal positivo, estas deformaciones se calculan como la deformación del comportamiento mecánico de la derecha.

### Las tensiones verticales ( $\sigma_v$ )

Mide la tensión (fuerza/superficie) en el eje z ejercida por el comportamiento en profundidad sobre el componente inercial.

### **Las tensiones horizontales ( $\sigma_c$ )**

Mide la tensión (fuerza/superficie) en el eje x ejercida por el comportamiento lateral derecho sobre el componente inercial.

A continuación se hace una descripción de las simplificaciones e hipótesis adoptadas en el desarrollo del modelo para cada una de las partes que integran el sistema completo.

#### **3.7.1 Simplificaciones e hipótesis en la consideración de la estructura**

En el caso de la estructura, las distintas capas que la forman conllevan una serie de simplificaciones que se enumeran a continuación:

- La respuesta de la estructura se estudia en un volumen fijo del firme. Este volumen no se desplaza, es la carga la que se desplaza.
- El volumen de material representa lo que se denomina como una sub-capa. Presenta un ancho constante y una superficie sobre la que se aplica la carga vertical igual a la superficie de la huella del neumático. La carga horizontal se aplica sobre una superficie igual a la superficie de la huella del neumático.
- Las sub-capas se modelan mediante la composición de 3 componentes que modelizan el comportamiento del material en el eje x, en la parte izquierda y en la parte derecha, y el comportamiento en el eje z. Estos tres componentes están unidos entre sí a través de otro componente que modeliza el comportamiento de la masa de material con respecto a las fuerzas externas.
- Las capas están compuestas por un total de 6 sub-capas del mismo espesor e igual a 1/6 del valor del espesor total de la capa.
- La adherencia entre capas y sub-capas es total, solamente se contempla un amortiguamiento entre sub-capas para simular el efecto de la disipación de la energía mecánica, un amortiguamiento estructural.
- Se considera el amortiguamiento geométrico (teoría de Boussinesq) para obtener la distribución de las tensiones con la profundidad mediante la variación de la superficie de aplicación de la carga para cada sub-capa de la capa.

En el caso de la modelización del comportamiento de los materiales:

- El comportamiento de los materiales se modeliza en el eje vertical y en el eje horizontal.
- El comportamiento de los materiales se modeliza a partir de elementos atómicos simples como son muelles y amortiguadores.

- No se modelizan comportamientos no lineales de los materiales.
- La anisotropía del material se tiene en cuenta a través de la relación entre el módulo de elasticidad vertical y el módulo de elasticidad horizontal.
- Se modeliza el confinamiento de los suelos a través de la variación de las propiedades mecánicas de los materiales. Sólo se modeliza el debido al confinamiento producido por el peso propio de la estructura, no se tiene en cuenta el debido a la aplicación de la carga del vehículo.
- Se modeliza la viscoelasticidad de las mezclas bituminosas mediante el modelo de Kevin-Voight.
- Se modeliza la variación de las propiedades que rigen las ecuaciones constitutivas de las mezclas bituminosas en función de la temperatura y la frecuencia de aplicación de la carga.

### 3.7.2 Simplificaciones e hipótesis en la consideración de la carga

En el caso de la carga aplicada las simplificaciones e hipótesis que se han considerado son las siguientes:

- La simulación del desplazamiento de la carga se realiza mediante la hipótesis de la variación de esta con respecto al tiempo.
- La carga aplicada en el eje z, vertical, sobre la estructura tiene un comportamiento similar a una función seno. Esta carga se supone igual a la mitad de la carga por eje del vehículo.
- La frecuencia de la carga aplicada tiene que ver con la velocidad del vehículo y se relaciona a través de la ecuación (3.11) considerando  $d = 0$ .
- La carga aplicada en el eje x, en el eje horizontal, simula las tensiones tangenciales y se relaciona con la carga vertical a través de un coeficiente  $C_r$  denominado coeficiente de rozamiento (Heras Barras, 2010).
- La frecuencia de la carga en el eje x es el doble de la frecuencia en el eje vertical o z.

### 3.7.3 Simplificaciones e hipótesis en la consideración del entorno

En lo que corresponde al entorno mecánico:

- Las paredes y el suelo se consideran completamente inmóviles en cualquier dirección. Se utilizan para establecer las condiciones de contorno de la estructura.

- La estructura de las capas se mantiene constante en la dimensión correspondiente al ancho, eje x; todas las capas pertenecientes al mismo modelo contienen el mismo ancho.

En lo que corresponde al entorno térmico:

- No se contempla el efecto provocado por el agua de la lluvia ni el efecto del viento en la ecuación de balance energético de la superficie del firme.
- No se tiene en cuenta la variación de la irradiancia solar debido a días nublados.
- Las propiedades térmicas de los materiales utilizadas en la modelización se consideran constantes.

### 3.8 Conclusiones

En los firmes de carreteras de tipo flexible y semiflexible, las variables más importantes para el estudio del deterioro de los mismos son:

- Las deformaciones horizontales en el fondo de la mezcla bituminosa.
- Las deformaciones verticales en los suelos.
- Las deflexiones que se producen en la estructura completa.

Los materiales que conforman las distintas capas de la estructura presentan diferentes comportamientos ante la aplicación de tensiones verticales y horizontales sobre ellos. Además las propiedades mecánicas de los mismos se ven alteradas debido a la interacción con el entorno y con la carga de los vehículos.

Las fuerzas aplicadas por el paso de un vehículo sobre la estructura tienen una naturaleza cíclica. Estas provocan la aparición de tensiones normales y tangenciales sobre un elemento diferencial de la estructura.

La modelización de las cargas aplicadas por la estructura se lleva a cabo a través de funciones de tipo senoidal donde la carga tangencial posee el doble de frecuencia que la carga vertical, debido a la simulación del paso del vehículo con sentido de avance sobre el eje x.

No se tiene en cuenta la variación de la carga de los vehículos debido a las irregularidades del terreno ni al sistema de suspensión de los mismos. Se considera que la carga del vehículo se reparte de forma homogénea sobre la superficie del neumático.

La modelización del entorno permite establecer las condiciones de contorno a nivel mecánico y térmico, y la interacción con los cambios térmicos que provocan flujos de calor en la superficie del firme. No se modeliza el efecto del agua dentro de la estructura.

Se modelizan los procesos de transferencia de calor entre el entorno y la superficie del firme debidos a la convección, a la radiación y a la conducción.

El comportamiento de los suelos se supone elástico y se modeliza a través del módulo de compresibilidad ( $K$ ) y del módulo de rigidez o de corte ( $G$ ) obtenidos mediante el módulo de elasticidad o módulo de Young ( $E$ ) del material y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

El fenómeno del confinamiento de los suelos debido al peso propio de los materiales se refleja en la modificación de los valores de los módulos de rigidez dependiendo de la profundidad a la que se encuentren dentro de la estructura.

En el caso de la mezcla bituminosa su comportamiento mecánico se asemeja a un comportamiento viscoelástico para las deformaciones horizontales. Este es modelizado mediante el modelo de Kelvin-Voight, cuyos parámetros  $E$  y  $\eta$  deben ajustarse a la función de respuesta de la mezcla. La función de respuesta utilizada en este proyecto es el módulo complejo o dinámico ( $E^*$ ).

El efecto de la variación del módulo dinámico de la mezcla con la temperatura y la frecuencia de aplicación de la carga, se tiene en cuenta a través de la curva maestra del material. La curva maestra proporciona el valor del módulo dinámico de la mezcla para una combinación de temperatura y frecuencia determinada.

En cuanto a las simplificaciones tenidas en cuenta en el desarrollo de esta librería se encuentra la consideración del problema en dos dimensiones, en vez de tridimensional, suponiendo que las tensiones normales a las caras paralelas al eje de avance del vehículo son cero (hipótesis de tensión plana).

En el caso de la modelización del amortiguamiento del material se hacen simplificaciones considerables debido a la dificultad que presenta. El amortiguamiento se hace depender del módulo del material, su masa y dos parámetros de ajuste únicamente para ajustar las tensiones en cada uno de los ejes de forma que se simplifique los parámetros del modelo.

Para el amortiguamiento geométrico se ha supuesto que la capa es un espacio homogéneo, isotrópico y elástico y que la distribución de las tensiones sigue la teoría de Boussinesq para una carga aplicada sobre una superficie cuadrada.



# Capítulo 4 Librería

## FirmesCarreteras

### 4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el sistema físico estudiado y se describe la librería *FirmesCarreteras* que ha sido desarrollada con la finalidad de obtener una herramienta que permita estudiar el comportamiento mecánico y térmico de este sistema.

Se presenta la arquitectura de la librería describiendo con mayor detalle las clases principales que permiten el modelado de los distintos sistemas que intervienen en la respuesta de los firmes como son la carga, la propia estructura y el entorno.

### 4.2 Desarrollo de la librería

La librería *FirmesCarreteras* se ha desarrollado con el objetivo de poder estudiar el comportamiento de un determinado sistema físico, formado por varios subsistemas que interaccionan entre sí mecánica y térmicamente.

El sistema modelado contiene una parte de su estructura en el dominio mecánico y otra en el dominio térmico.

#### 4.2.1 Sistema físico estudiado

El sistema físico que se quiere modelar (véase Figura 4.1) está formado por tres subsistemas que interaccionan entre sí. Estos subsistemas son una estructura formada por capas horizontales superpuestas unas sobre otras, la carretera, los vehículos que circulan por la superficie de la estructura y el entorno que rodea a la estructura.

Por tanto se encuentra formado por tres subsistemas básicos: la carga, la estructura y el entorno.

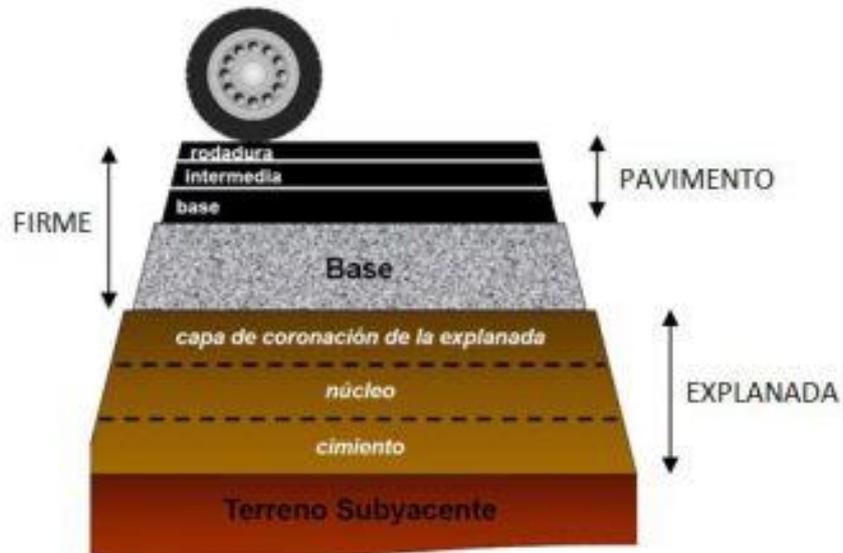


Figura 4.1 Sistema físico estudiado

Este problema tiene una naturaleza tridimensional, no obstante se pueden realizar simplificaciones que ayuden en la modelización del mismo.

Se ha considerado el problema como bidimensional, en el plano  $x-z$ , haciendo la hipótesis de tensión plana. La consideración del plano  $x-z$  como aquel en el cual las tensiones y deformaciones no son nulas, se realiza en base a la simetría del problema (véase Figura 4.2), ya que en este caso la estructura presenta una simetría en el plano  $y = 0$ .

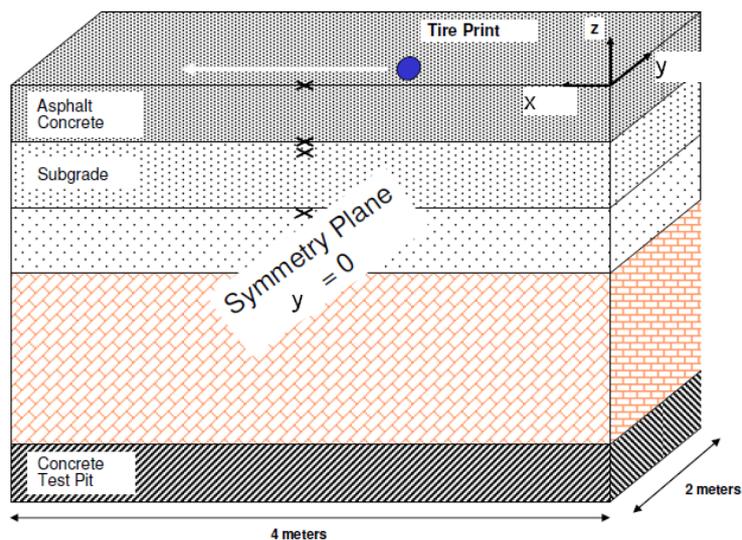
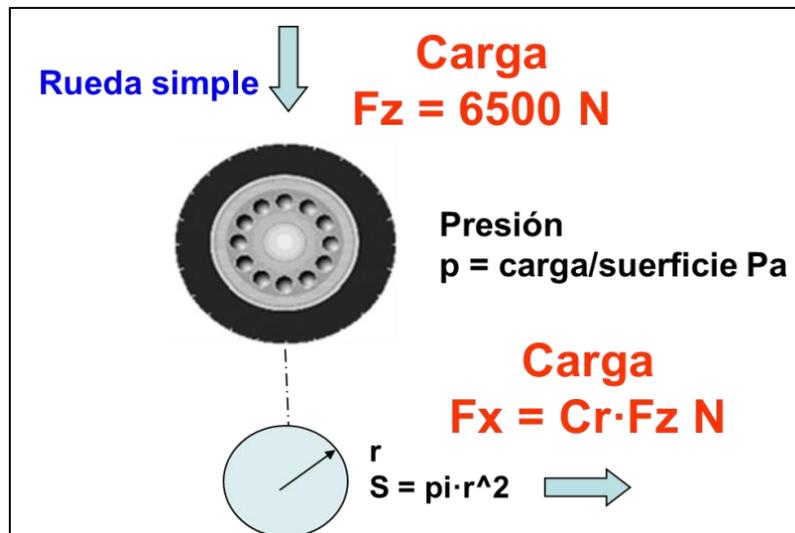


Figura 4.2 Modelado del espacio geométrico de la estructura

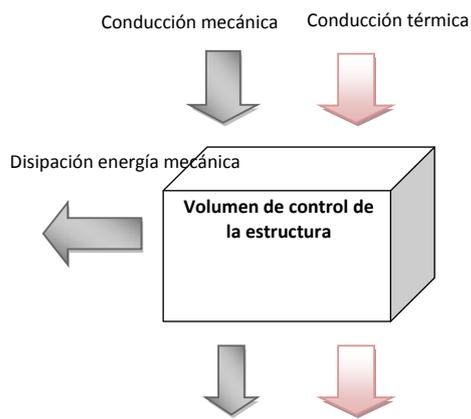
La modelización de la carga se realiza mediante la consideración de esta como una fuente de fuerza en las dos direcciones del plano x-z aplicadas sobre una superficie igual a la huella del neumático de radio  $r$  (véase Figura 4.3).



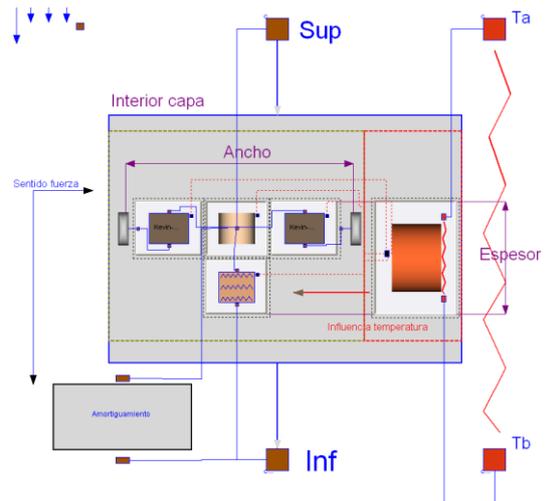
**Figura 4.3 Modelización de la carga sobre la estructura**

Para poder modelizar componentes en los dos dominios físicos considerados, mecánico y térmico, se desarrollan conectores mecánicos y térmicos que contienen las variables de interacción entre los modelos correspondientes a cada dominio físico. Se modeliza un conector de tipo señal para tener en cuenta el paso de información de las variables entre los modelos.

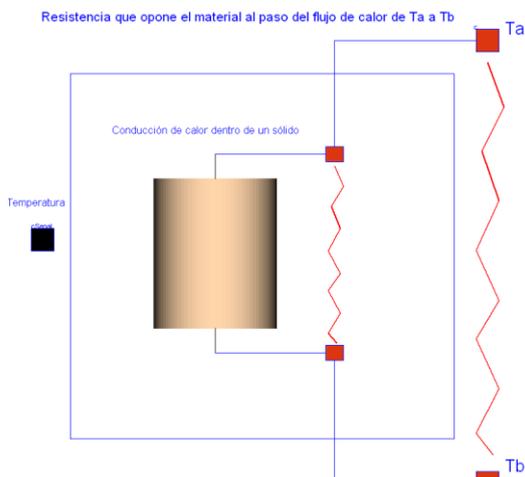
La modelización de la estructura se realiza mediante la discretización en volúmenes de control denominados sub-capas. Estos volúmenes de control están formados por la composición de modelos más pequeños que simulan el comportamiento mecánico y térmico del material, y a su vez estos están formados por elementos atómicos mecánicos y térmicos (véase Figura 4.4).



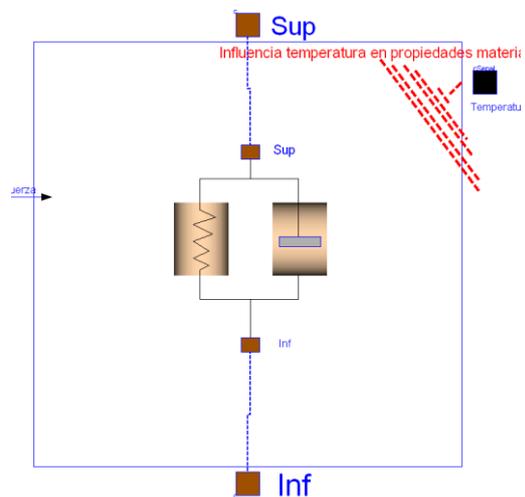
*Discretización de la capa*



*Modelado del comportamiento interno*



*Elemento atómico resistencia térmica*



*Elemento atómico visco-elástico*

**Figura 4.4 Volumen de control de la estructura formado por composición de modelos menores**

La interacción entre el dominio térmico y el dominio mecánico se lleva a cabo en el interior de la sub-capa a través del valor de la temperatura en cada instante. Este valor actúa sobre los comportamientos mecánicos, afectando a los parámetros de los elementos atómicos que los componen (véase Figura 4.5). Estos parámetros de los elementos atómicos (muelles y amortiguadores) se consideran por tanto variables discretas en el modelo global.

```

model Comp_ViscoElastico
  "Modelo que simula el comportamiento visco-elástico de un material. Está construido a partir del elemento atómico
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  extends FirmesCarreteras.Interfaces.ComportamientoMecanico;
  [
  [

  //*****
  //Estructura interna del comportamiento: elementos atómicos que lo forman.
  //*****
  //protected
  [
  [

  //*****
  //Parámetros internos:
  //*****
  public
  parameter Real Frecload( unit="Hz") = 1 "Frecuencia de carga.";
  parameter Real Tref( unit="°C") = 20
    "Temperatura de referencia para el cálculo del módulo dinámico de la mezcla.";
  parameter Real desfase( unit="°") = DatosCapa.desfase
    "Desfase del módulo dinámico de la mezcla.";

  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
  equation
  [
  [
  when dTemp>0 or dTemp<0 then

    //Se dispara la condición de evento de variación de los módulos con la temperatura y la frecuencia de la carga:
    EVL1.elementoElastico.Ke = pre(Ke);
    EVL1.elementoViscoso.b =
      FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloTemperaturaFrecuencia(
        Temp,
        Frecload,
        Tref)*Modelica.Math.sin(desfase*2*3.1415/360);
  end when;

  initial equation
  //Valor inicial de los módulos:
  pre(EVL1.elementoElastico.Ke) = Mc;
  //Valor del módulo de viscosidad:
  pre(EVL1.elementoViscoso.b) = b;

end Comp_ViscoElastico;

```

Figura 4.5 Condiciones de variación de los parámetros de los modelos atómicos

La variación del valor de las variables discretas del problema se dispara cuando se produce alguno de eventos siguientes:

- Cuando se comienza la simulación del problema,  $\text{time} > 0.5$ .
- Cuando se produce una variación del valor de la temperatura de la capa (se va muestreando cada cierto tiempo).
- Cuando se reinician las variables de estado del modelo,  $\text{time} > 0.9$  s para eliminar el peso de la estructura.

En los tipos de modelos que se implementan en este proyecto con la librería *FirmesCarreteras*, la modificación de los parámetros debido a la temperatura en tiempo de simulación se puede realizar aunque normalmente no se considera, ya que la dinámica de la respuesta del firme es más rápida que la de la variación térmica. No obstante pueden surgir otros estudios que aprovechen esta capacidad y los componentes desarrollados en la librería.

Se definen interfaces comunes con el objetivo de la reutilización de las clases. Las interfaces más relevantes consideradas en la librería son:

- La interfaz de los elementos atómicos mecánicos y térmicos.
- La interfaz de las fuentes de señal.
- La interfaz de los comportamientos, hay tres tipos de interfaces: para los comportamientos mecánicos, para los inerciales y para los térmicos.
- La interfaz de las sub-capas.
- La interfaz de las capas.

La interfaz de las sub-capas aprovecha también la propiedad de crear componentes reemplazables dentro de la clase sub-capa.

#### 4.2.2 Arquitectura de la librería

La librería *FirmesCarreteras* se encuentra estructurada en siete paquetes que contienen las clases y los componentes necesarios para la modelización de un firme de carreteras, su entorno y la carga a la que se ve sometida la estructura. En la Figura 4.6 se puede observar la arquitectura de la librería.

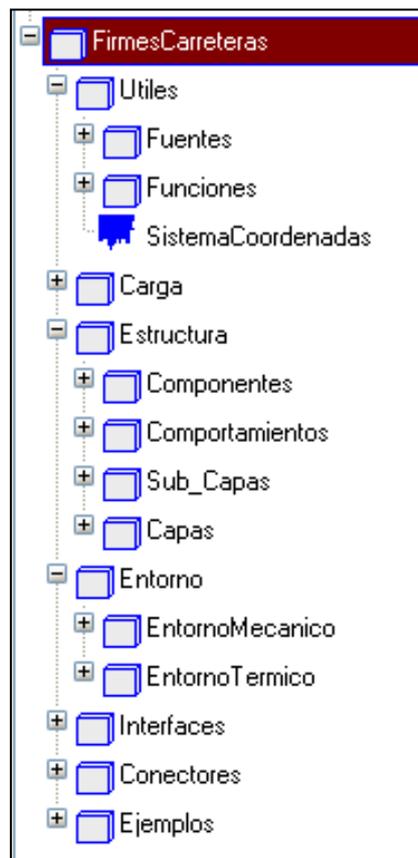


Figura 4.6 Arquitectura de la librería *FirmesCarreteras*

El paquete de trabajo denominado *Utiles* contiene una serie de componentes que van a servir para modelizar alguna de las partes del sistema así como las funciones que se utilizan en los modelos. Las *Fuentes* que se encuentran dentro del paquete de *Utiles*, permiten modelizar la dependencia temporal de alguna variable como puede ser la fuerza aplicada por los vehículos o la temperatura del entorno. La clase *SistemaCoordenadas* sirve para definir el sistema global de coordenadas empleado en los modelos de forma que todas las variables vectoriales puedan ser referenciadas en un sistema común.

Los siguientes tres paquetes *Carga*, *Estructura* y *Entorno* conforman el núcleo central de la librería y se tratarán en detalle en los puntos siguientes.

La librería contiene un paquete denominado *Interfaces* en el cual se agrupan todas aquellas clases parciales que pueden dar lugar por instanciación y especialización a distintos tipos de modelos que compartan las mismas interfaces para su conexión e interacción con el exterior. Estas clases parciales contienen conectores agrupados en el paquete *Conectores* que pueden ser *Mecanicos*, *Termicos* o de *Senal*. Cada tipo de conector permite la interacción de la clase que lo contiene en un dominio físico determinado con su entorno.

Por último el paquete *Ejemplos* contiene modelos creados para los procesos de validación de los distintos componentes de la librería (véase Capítulo 5) y como caso de estudio de modelos de respuesta de firmes creados mediante esta librería desarrollado en el Capítulo 6. Alguno de ellos se detalla en los apartados siguientes.

### 4.3 Modelado de la carga

La arquitectura de este paquete de la librería se presenta en la Figura 4.7.

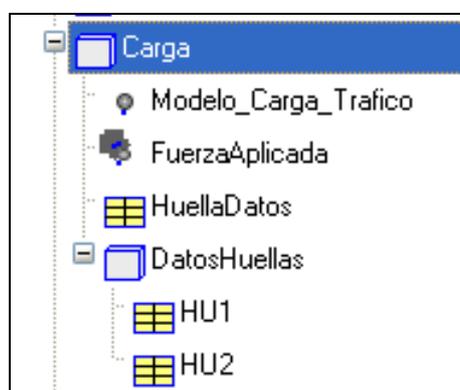


Figura 4.7 Arquitectura del paquete Carga

La carga que se aplica a la estructura del firme se puede modelizar de dos formas:

- A través de la clase denominada *FuerzaAplicada* y una fuente que simule la dependencia temporal de las fuerzas aplicadas sobre el firme.
- A través de la clase denominada *Modelo\_Carga\_Trafico*.

Las fuerzas aplicadas se simulan una en el eje vertical y otra en el eje horizontal. En el caso del eje vertical la programación de la clase *FuerzaAplicada* provoca que esta siempre sea positiva (véase Figura 4.8).

```

//*****
//Ecuaciones constitutivas:
//*****
equation
  cM.F = -f;
  if noEvent(cSenal.Signal < 0) then
    f[1] = 0;
    f[2] = 0;
  else
    f[1] = DatosHuella.Presion*S*Cr*(cSenal2.Signal);
    f[2] = DatosHuella.Presion*S*{(cSenal.Signal)^2};
  end if;
end FuerzaAplicada;
```

Figura 4.8 Modelado de la FuerzaAplicada

Como se trata de modelos en dos dimensiones (véase Capítulo 3), se deben definir las fuerzas aplicadas en ambas direcciones y su variación con el tiempo. Para ello se selecciona el tipo de huella que provoca el neumático en la estructura. Se ha modelizado la huella como una superficie circular homogéneamente cargada. Los tipos de huellas se almacenan como estructuras de tipo record definidas por *HuellaDatos* en el paquete *DatosHuellas*.

Además la frecuencia de aplicación de la carga está relacionada con la velocidad de los vehículos y es un parámetro que afecta al módulo de rigidez de la mezcla bituminosa. La variación de la frecuencia de carga con respecto a la velocidad del vehículo se encuentra contemplada en el modelo *Modelo\_Carga\_Trafico*. Este modelo está formado por la composición de elementos sencillos.

## 4.4 Modelado de la estructura

En la Figura 4.9 se presenta la arquitectura del paquete que se emplea para la modelización de la estructura del firme.

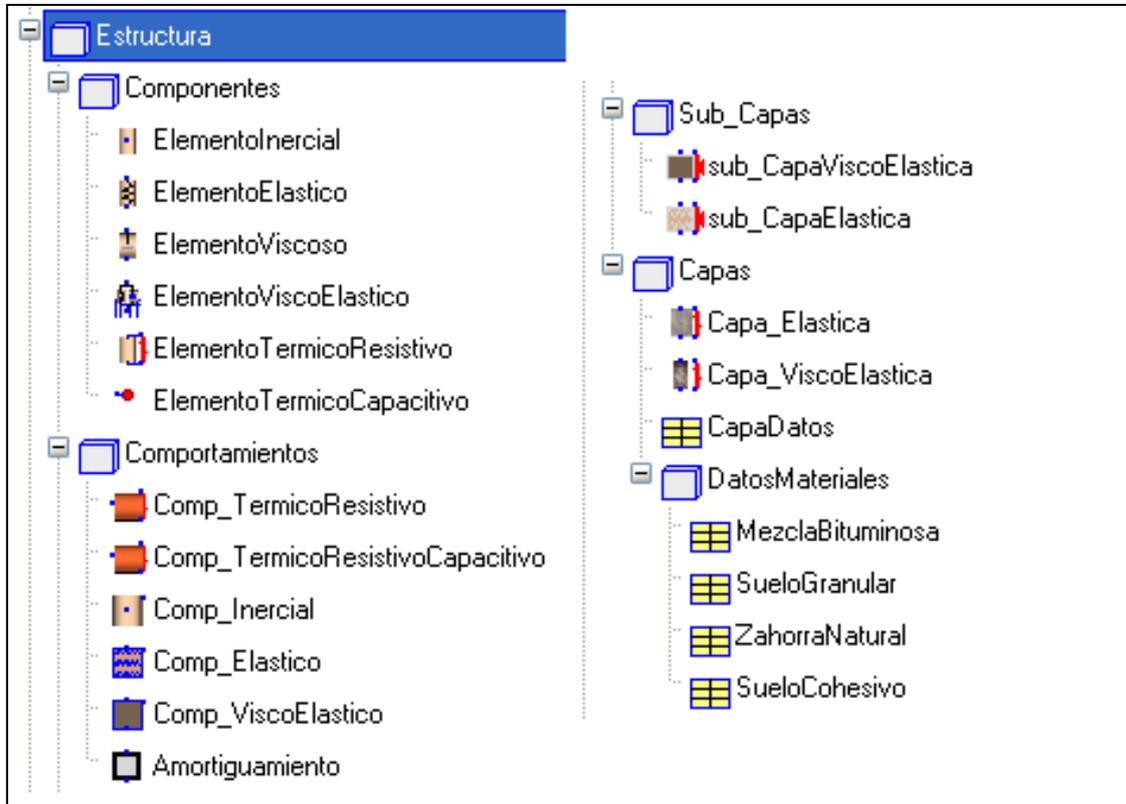


Figura 4.9 Arquitectura del paquete estructura

La estructura, es decir el firme, es la parte principal del modelo de respuesta ya que se quiere conocer la respuesta temporal de este subsistema al interactuar con los demás. La respuesta de la estructura está determinada por su comportamiento mecánico y térmico que resultan en un conjunto de variables tenso-deformacionales, tensiones y deformaciones, y la temperatura en su interior.

Este paquete está dividido en 4 subpaquetes en función de su tipología. El primer subpaquete denominado *Componentes* contiene los componentes atómicos mecánicos y térmicos necesarios para modelar el comportamiento mecánico de los materiales y el comportamiento térmico, tanto de los materiales que conforman las capas como del entorno que interacciona con la estructura.

Los elementos mecánicos básicos son muelles, amortiguadores e inercias, mientras que los térmicos son resistencias y capacitancias térmicas.

El siguiente subpaquete *Comportamientos* contiene las clases que modelan los distintos comportamientos mecánicos o térmicos de los materiales. Estos comportamientos se modelan como combinación de los elementos básicos (véase Figura 4.10).

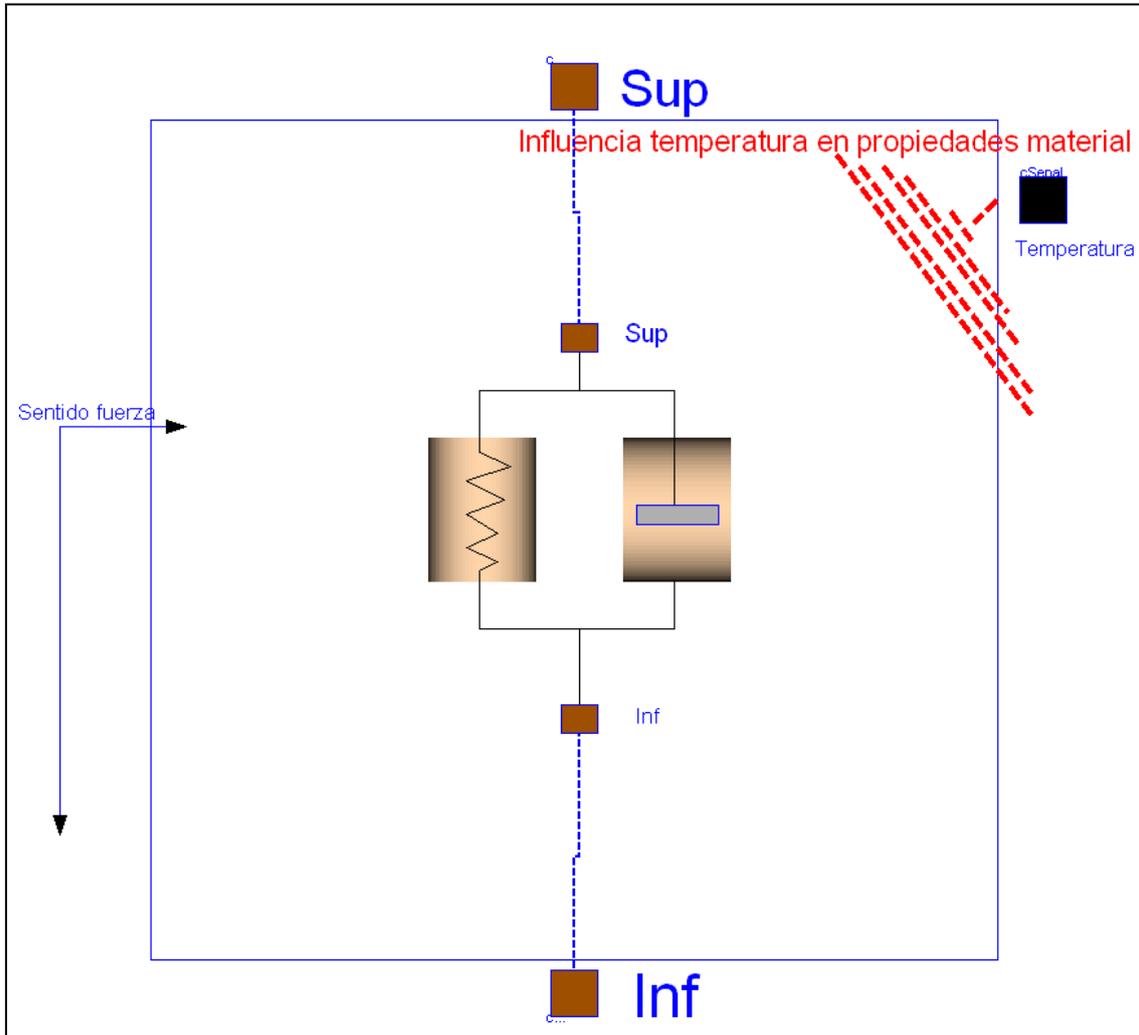


Figura 4.10 Modelización del comportamiento de un material visco-elástico

Los comportamientos mecánicos modelados en esta primera versión de la librería corresponden con comportamientos elásticos y viscoelásticos.

También se incluye dentro de ese paquete el comportamiento de tipo *Amortiguamiento* que modeliza el amortiguamiento estructural del material.

Dependiendo del tipo de comportamiento que presente el material, se puede modelar a partir de combinaciones en serie y paralelo de los elementos básicos. Lo mismo sucede en el caso de comportamientos térmicos.

Los comportamientos térmicos modelados dentro de este paquete son el fenómeno de transporte por conducción dentro del material y la variación térmica del material con respecto al tiempo debido al aumento de su energía intern

Los comportamientos mecánicos se pueden ver influenciados por la temperatura. Por ello tienen un conector de tipo *Senal*, que permite interconectar la parte térmica con la mecánica.

El siguiente subpaquete es el denominado *Sub\_Capas*. Las *Sub\_Capas* son clases que se pueden utilizar de forma independiente y que están formadas por un tipo de material el cual se comporta de una forma determinada en función de los comportamientos que lo compongan.

Las *Sub\_Capas* están formadas por la combinación de comportamientos mecánicos y térmicos. Al desarrollarse los modelos en dos dimensiones, se considera la *Sub\_Capa* como un sistema formado por tres comportamientos mecánicos y uno térmico. El comportamiento térmico afecta a los comportamientos mecánicos.

Dentro de los comportamientos mecánicos siempre existe el comportamiento inercial, que es el que permite considerar las fuerzas externas que afectan a los volúmenes de masa, como puede ser la gravedad o las cargas de tráfico, y tener en cuenta el tipo de material a través de su densidad. Este comportamiento inercial es el que recibe las fuerzas actuantes en la *Sub\_Capa* y su movimiento está condicionado por los comportamientos mecánicos del eje z, vertical, y del eje x, horizontales.

Los comportamientos horizontales se enlazan a clases llamadas *Pared* del paquete *Entorno* de forma que se pueda simular el confinamiento del material en la estructura (véase Figura 4.11).

La *Sub\_Capa* se modeliza con el objetivo de obtener las tensiones, deformaciones verticales y horizontales y la deflexión a distintas profundidades dentro de la capa. Estas están relacionadas con los movimientos de la masa inercial en las direcciones del sistema de ejes escogido. Y estos movimientos se encuentran a su vez ligados con las deformaciones producidas en cada uno de los comportamientos mecánicos existentes en la *Sub\_Capa*.

En cuanto a la variación de la temperatura dentro de la *Capa* se consigue mediante la conducción de la energía térmica a través de la *Sub\_Capa*. El flujo de calor que llega al conector superior de la *Sub\_Capa* fluye a través de la *Sub\_Capa* mediante el mecanismo de conducción que se encuentra modelizado por un elemento térmico resistivo.

La temperatura por tanto en la *Sub\_Capa* se encuentra en el conector  $T_a$  y en el conector  $T_b$ . Para considerar la variación de las propiedades de los elementos atómicos mecánicos con la temperatura se calcula una temperatura media dentro de la *Sub\_Capa*, cuyo valor se transfiere a los demás comportamientos a través de conectores de tipo *Senal*.

Todos los comportamientos de la *Sub\_Capa* se han definido como modelos redeclarables de forma que resulte sencilla su reutilización para modelar distinto tipo de materiales.

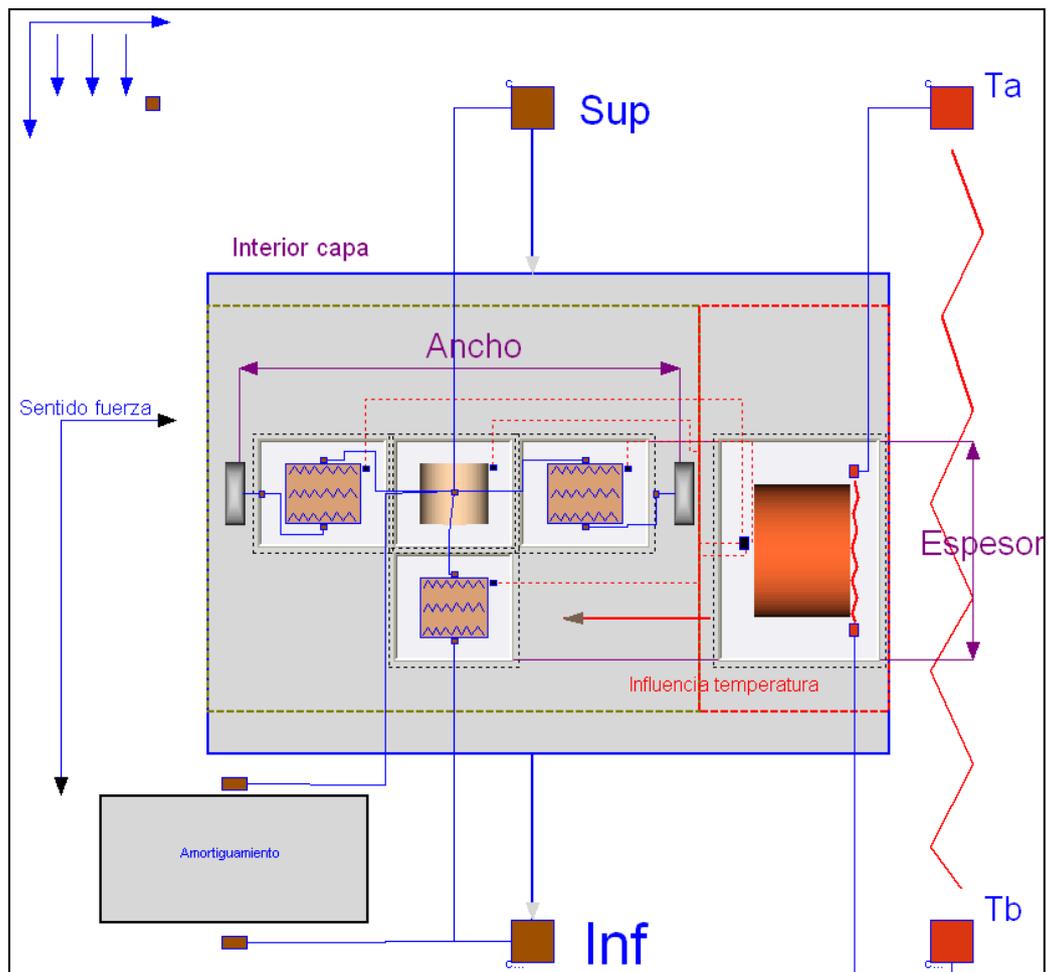


Figura 4.11 Modelización de una *Sub\_Capa*

Dentro de la *Sub\_Capa* se introduce también un comportamiento denominado *Amortiguamiento* que simula la disipación de energía mecánica debido un amortiguamiento de tipo estructural del material. Este amortiguamiento se debe al rozamiento interno de las partículas.

Se modeliza a través de un amortiguador viscoso. A nivel de *Sub\_Capa* lo que provoca es una disipación de energía mecánica por lo que la siguiente *Sub\_Capa* que se conecte a continuación se verá afectada por ello.

Para la *Sub\_Capa* se definen una serie de variables que se corresponden con las tensiones y deformaciones que se producen en el material y están definidas por los desplazamientos de la masa inercial y las deformaciones de los comportamientos mecánicos (véase Tabla 4.1).

**Tabla 4.1 Variables tensodeformacionales para cada sub\_capa**

Variable	Qué mide	Unidades
Deflexión ( $\delta$ )	Mide el desplazamiento en el eje z del componente inercial con respecto a su posición de inicio.	m
Deformación horizontal izquierda ( $\varepsilon_c$ )	Mide la deformación del componente mecánico izquierdo. Representa la deformación que se produce en ese sentido con el paso de la carga.	m/m
Deformación horizontal derecha ( $\varepsilon_c$ )	Mide la deformación del componente mecánico derecho. Representa la deformación que se produce en ese sentido con el paso de la carga.	m/m
Deformación vertical ( $\varepsilon_v$ )	Mide la deformación del componente mecánico en profundidad.	m/m
Tensión vertical ( $\sigma_v$ )	Mide la tensión (F/S) en el eje z ejercida por el comportamiento de profundidad sobre el componente inercial.	Pa
Tensión horizontal ( $\sigma_c$ )	Mide la tensión (F/S) en el eje x ejercida por el comportamiento lateral derecho sobre el componente inercial.	Pa

El último subpaquete de *Estructura* es el denominado *Capas*. Contiene las clases que modelizan una capa de la estructura del firme. Esta *Capa* está formada por 6 *Sub\_Capas* del mismo tipo de material, y el espesor total de la capa es un parámetro que al indicarse lo que provoca es que cada una de las 6 *Sub\_Capas* que componen el modelo de la *Capa*, tenga 1/6 del espesor total.

Las *Sub\_Capas* son clases que se pueden redeclarar dentro de la *Capa* lo que hace muy sencilla la creación de distintos tipos de capas (elásticas, plásticas, viscoelásticas, etc). En la Figura 4.12 se puede ver el interior de la clase *Capa*.

Los parámetros de los materiales que conforman la capa se encuentran agrupados en la clase record *CapaDatos*. Dentro del paquete *DatosMateriales* se encuentran definidos algunos de los materiales más comunes usados en el diseño de firmes.

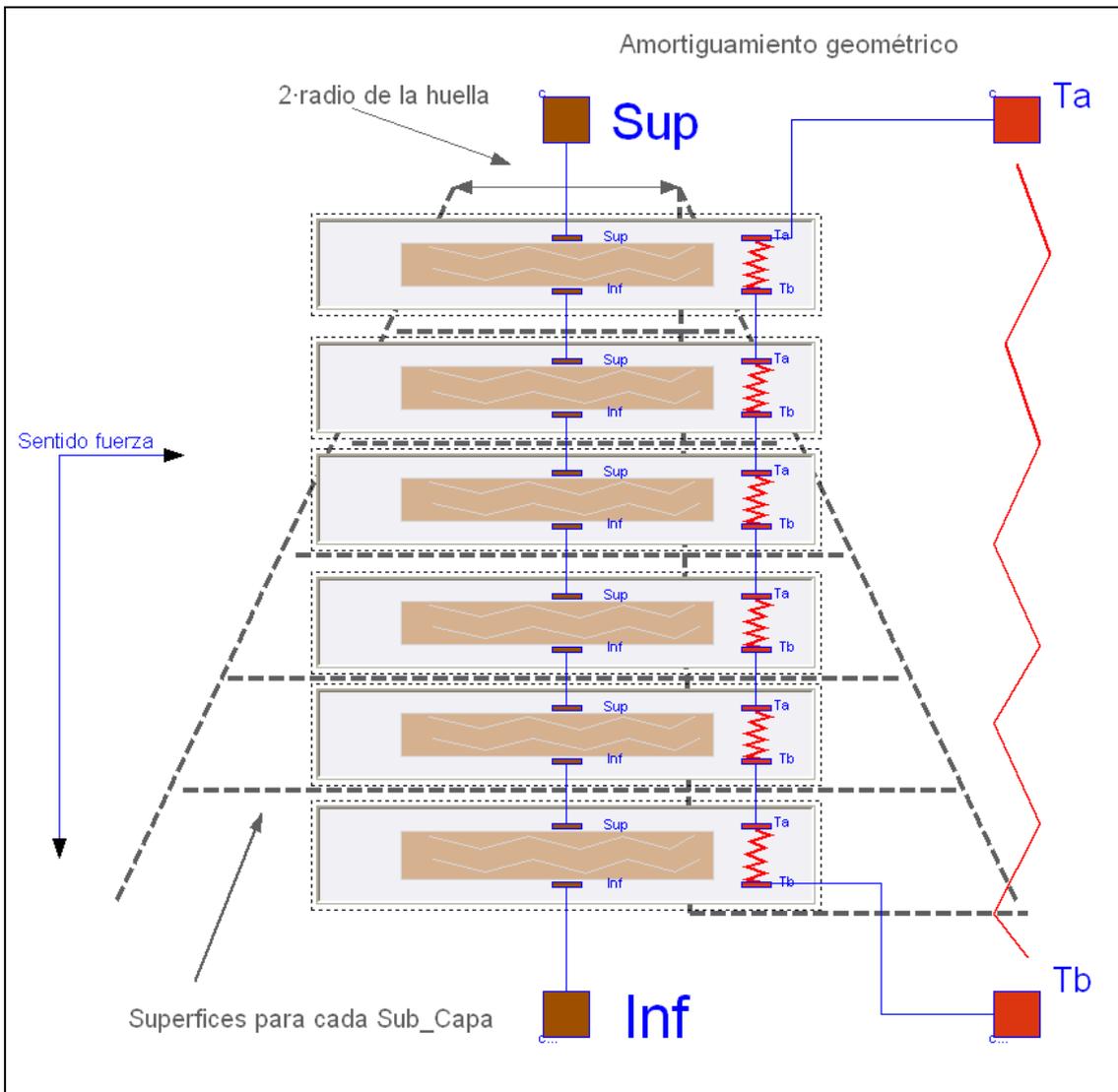


Figura 4.12 Modelización de la Capa a través de modelos más sencillos de Sub\_Capa

La *Capa* dispone de otro tipo de amortiguamiento, definido como amortiguamiento geométrico, que tiene que ver con la pérdida de energía de las vibraciones al alejarse de su foco emisor. Este comportamiento es simulado en la *Capa* mediante la variación de la superficie de influencia de la carga aplicada conforme se profundiza en la misma.

Los resultados de las tensiones y deformaciones en cada una de las *Sub\_Capas* que conforman la *Capa* se recogen en arrays de 6 dimensiones cada uno, al igual que los valores de las temperaturas.

## 4.5 Modelado del entorno

En la Figura 4.13 se puede observar la arquitectura del paquete utilizado para el modelado del entorno.

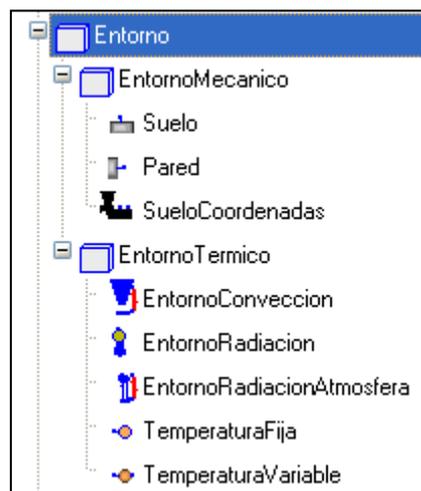


Figura 4.13 Arquitectura del paquete Entorno

El modelado del entorno se ha dividido en dos partes dependiendo del dominio físico al que haga referencia: el modelado del entorno mecánico y el modelado del entorno térmico.

El modelado del entorno mecánico contiene 3 clases: *Suelo*, *Pared* y *SueloCoordenadas*. El *Suelo* es la clase que modela un punto del espacio dentro del firme donde no se produce movimiento. Las tensiones se amortiguan dentro de la estructura.

La *Pared* lo que modela es el confinamiento del volumen de control que representa al material. El volumen de control que representa al material se entiende que se encuentra confinado, se considera que el ancho entre la pared izquierda y la pared derecha es igual a dos veces el radio del neumático. Las paredes no pueden desplazarse.

La clase *SueloCoordenadas* es un modelo compuesto por una clase *Suelo*, una clase *ElementoTermicoResistivo*, una clase *TemperaturaFija* y una clase *SistemaCoordenadas*. El objetivo es poder establecer la condición de contorno

necesaria para el cálculo del perfil de temperaturas dentro del firme; ya que se considera que a una profundidad determinada la temperatura no varía con el tiempo.

Para el modelado del entorno térmico se han modelizado los fenómenos de transporte térmico entre el entorno y la estructura más importantes. Estos son la radiación, la convección y la radiación atmosférica; estos fenómenos de transporte provocan el intercambio de flujos térmicos entre el aire y la superficie del firme.

El mecanismo de conducción de calor por conducción modeliza el fenómeno de transporte de energía térmica dentro de la estructura.

## 4.6 Modelos para validaciones y casos de estudio

Como último paquete de la librería *FirmesCarreteras* se encuentra el paquete *Ejemplos*. Este paquete contiene dos grupos de modelos de respuesta del firme desarrollados con distinto objetivo.

Por un lado el grupo de modelos que se encuentran en *Validaciones* se utilizan para la validación cualitativa de los componentes de la librería. Esta validación se realiza mediante comparación con resultados obtenidos por la bibliografía y con su comparación de funcionamiento teórico.

Por otro lado, se encuentran los modelos agrupados en *Casos\_de\_Estudio*. Estos se emplean con el objetivo de estudiar el comportamiento global de algunos sistemas físicos concretos, estructuras formadas por dos o más capas, variaciones térmicas en la superficie del firme, etc, y demostrar de este modo las capacidades de Modelica y Dymola para la modelización y simulación de este tipo de sistemas.

### 4.6.1 Modelos para la validación de los componentes de la estructura

Se ha realizado una validación cualitativa de los componentes que conforman los distintos subsistemas del sistema físico estudiado. La validación de los componentes ha sido una validación del correcto funcionamiento de los mismos y de la comprobación de los órdenes de magnitud de las variables obtenidas.

Para ello se componen modelos de validación de los componentes principales de los subsistemas del problema (véase Figura 4.14).

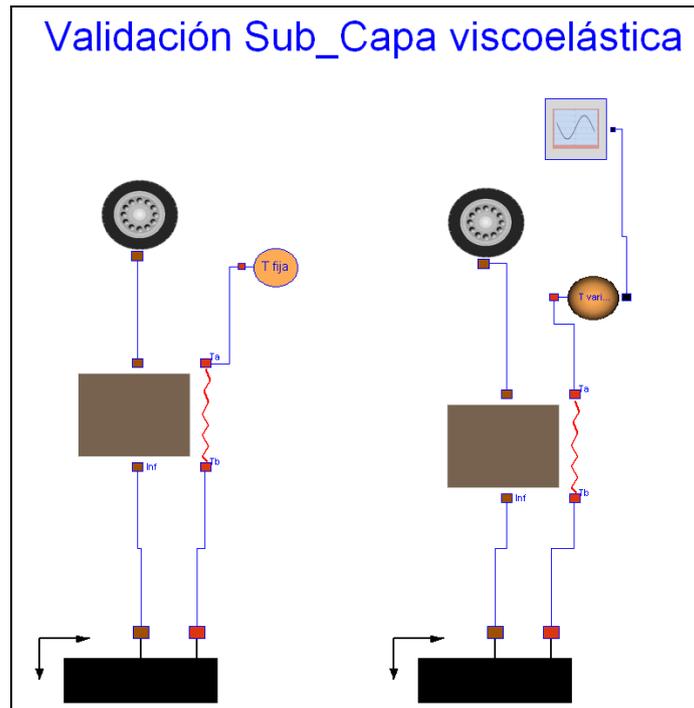


Figura 4.14 Modelo realizado para la validación de los componentes

Para mostrar las capacidades del modelado y simulación con Modelica y Dymola, se han desarrollado modelos agrupados en el paquete *Casos\_de\_Estudio*.

Uno de estos modelos se simula en detalle en el Capítulo 6 y se comparan los resultados obtenidos con los obtenidos mediante el programa BISAR (véase Figura 4.15).



Figura 4.15 Modelo para simulación de un caso real

También se encuentran casos de estudio de la parte térmica desarrollada (véase Figura 4.16).

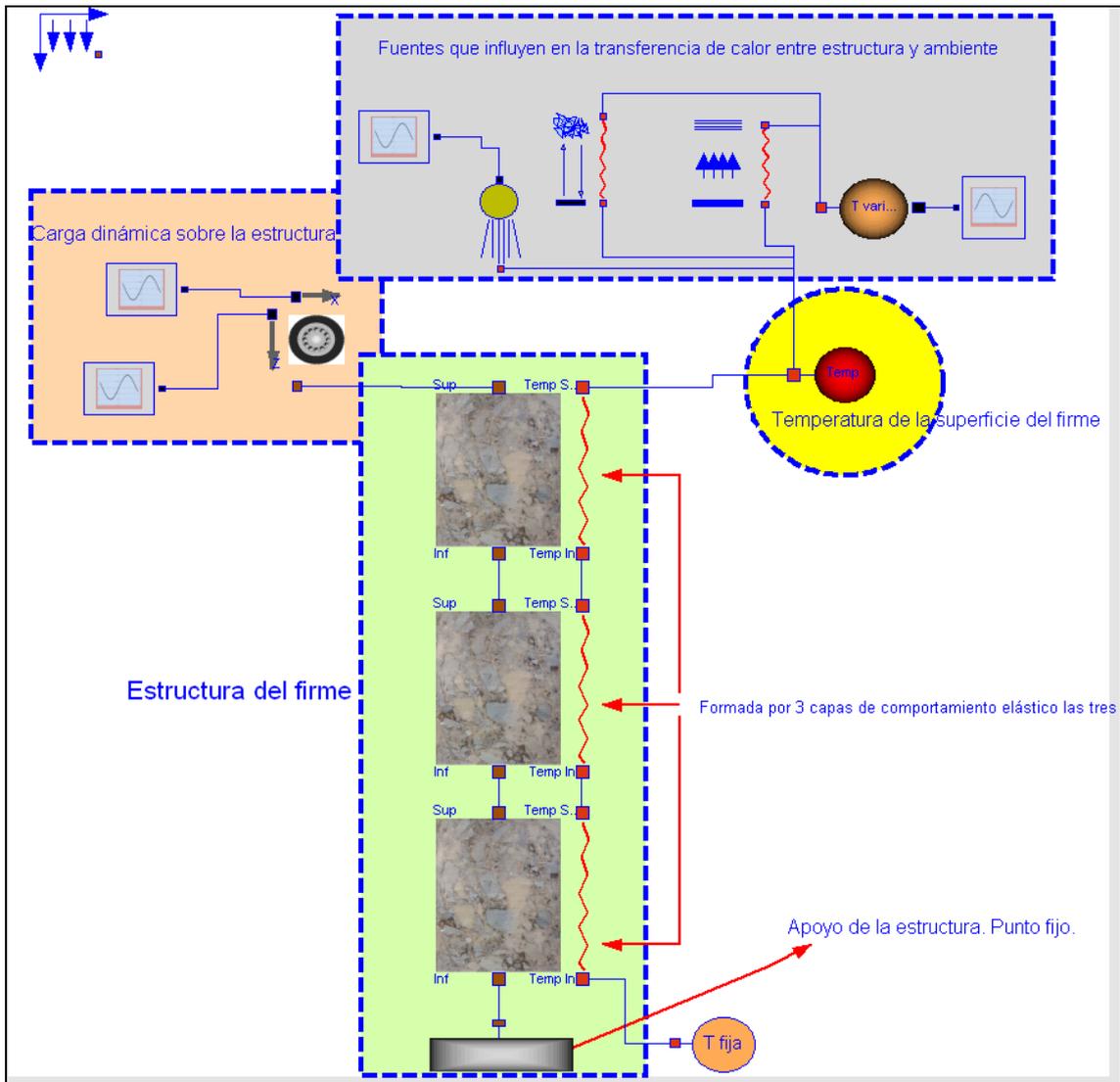


Figura 4.16 Modelo para la simulación de la temperatura en la superficie

Estos ejemplos también se pueden realizar para estudiar distintos tipos de aplicaciones de carga, estudios de sensibilidades de los parámetros de los materiales ante los cambios térmicos, etc.

## 4.7 Documentación librería

Se ha generado la documentación asociada a la librería a través de Dymola y se ha incluido en el Anexo A de este documento. En la documentación se encuentran las explicaciones de cada una de las clases y de los parámetros asociados a las mismas. Además se ha incluido el código Modelica de cada una de ellas.

La documentación de la librería está pendiente en traducirse al inglés para que pueda ser de ayuda a un mayor número de futuros usuarios de la librería.

## 4.8 Conclusiones

La librería *FirmesCarreteras* se ha desarrollado con el fin de poder componer modelos de respuesta de los firmes de carreteras. Esta librería contiene los elementos necesarios para modelar las tres partes fundamentales del sistema: la carga, la estructura y el entorno. Se han incluidos dos dominios físicos en este tipo de modelos, el mecánico y el térmico ya que las variaciones térmicas del entorno afectan al comportamiento mecánico de la estructura.

La clase principal de la librería es la *Sub\_Capa*, que viene definida por los distintos comportamientos mecánicos y térmicos del material que la compone. La idea principal es poder modelar distintos tipos de comportamiento de los materiales que se emplean en la construcción de este tipo de estructuras, de forma que se pueda estudiar cómo afecta a la respuesta del sistema. Para ello es fundamental la clase parcial *ComportamientoMecanico*, que puede instanciarse mediante el uso de elementos mecánicos básicos.

Se simulan también la amortiguación del material, debido a la fricción interna y debido a la pérdida de intensidad de una vibración al desplazarse por un medio cuando se aleja del foco emisor.

Los parámetros de los materiales de las capas se encuentran recogidos en distintas clases record que se encuentran almacenadas en el paquete *DatosMateriales*. Sucede lo mismo con los parámetros de la huella de los neumáticos, que se recogen en distintas clases record contenidas en el paquete *DatosHuellas*.

La modelización de la conducción del calor a través de la estructura se realiza en una sola dimensión, en la componente vertical.

La modelización del entorno se realiza tanto del dominio mecánico como del térmico. La parte mecánica tiene que ver con las condiciones de contorno de la estructura y la parte térmica con las fuentes de intercambio de calor entre la estructura y el ambiente.

Por último señalar que el paquete de ejemplos contiene modelos empleados en la validación de los componentes de la librería y modelos empleados para mostrar las capacidades del lenguaje Modelica en la modelización de este tipo de estructuras así como comprobar los resultados con otro tipo de modelos de respuesta contrastados y validados como BISAR.

# Capítulo 5 Validación de las distintas partes del sistema

## 5.1 Introducción

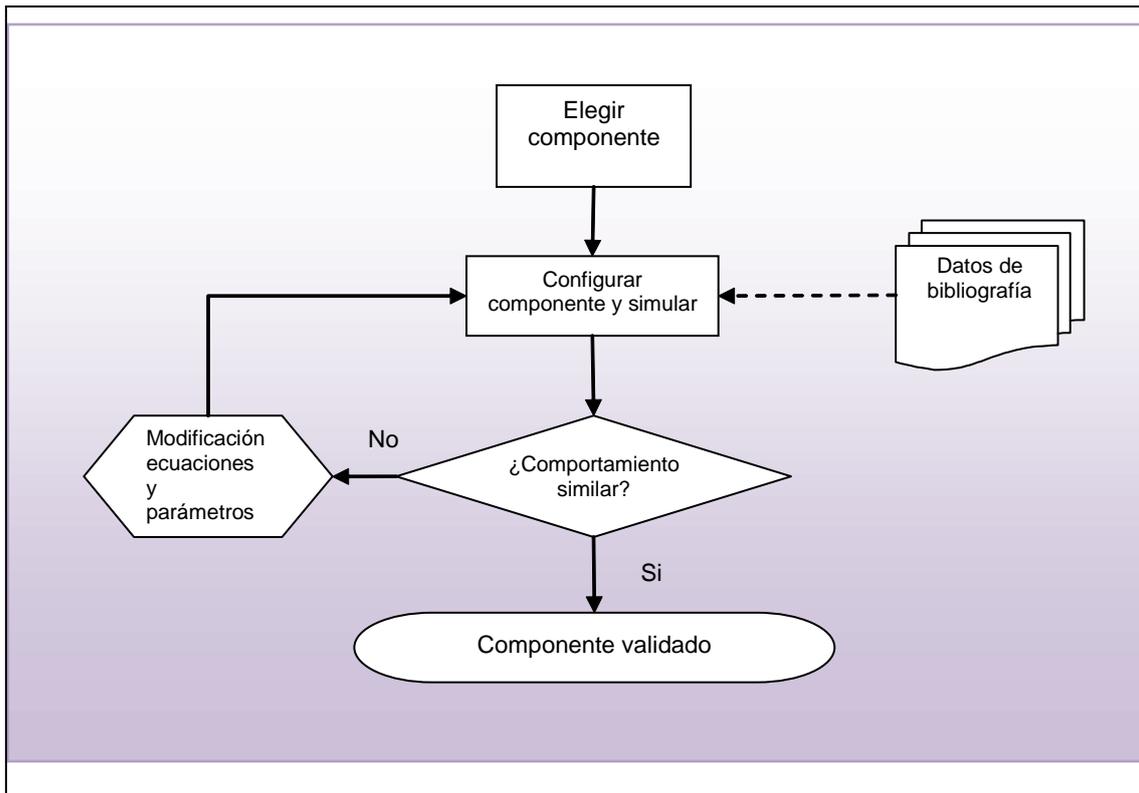
En este capítulo se realiza una validación cualitativa de los componentes principales del sistema que se está modelando.

El objetivo de la validación es que los modelos físicos reproduzcan lo más fielmente posible el comportamiento real del sistema modelado.

Primero se presenta el procedimiento seguido para la validación. A continuación se describe la validación de los componentes principales de cada una de las partes que intervienen en el modelo final de respuesta del firme.

## 5.2 Procedimiento de validación

Para la validación de los componentes que modelizan cada una de las partes que intervienen en el sistema se ha procedido según el esquema que se presenta a continuación (véase Figura 5.1).



**Figura 5.1 Procedimiento de validación seguido en este proyecto**

Lo primero que se realiza es la elección del componente a validar. Una vez que se tiene el componente, con apoyo de la bibliografía, se estudia el comportamiento que debe seguir y se configura variando sus parámetros, con el objetivo de obtener un resultado similar al teórico o experimental consultado a través de la bibliografía.

Se simula el modelo de validación con el tiempo necesario para observar la dinámica del sistema y se analiza la respuesta. En caso que se verifique el comportamiento teórico, se da por validado el componente, en caso contrario se estudia donde pueden encontrarse las diferencias para modificar las ecuaciones y parámetros del componente y se vuelve a realizar la validación.

A la vez que se realiza la validación se obtienen los parámetros, variables y componentes de cada clase que puedan ser encapsulados de forma que en el resultado final se encuentren visibles al usuario únicamente aquellos que son necesarios modificar para realizar el ajuste del modelo a distintas casuísticas. Esto permite realizar modelos más amigables para el usuario.

Cuando resulta imposible encontrar suficientes datos bibliográficos para realizar la validación de algún componente, entonces el comportamiento es validado por la persona que desarrolla la librería a través de los conocimientos y experiencia en el campo profesional en el que se utilizan este tipo de herramientas.

## 5.3 Validaciones de las cargas aplicadas

La fuerza ( $F$ ) provocada por el vehículo sobre la estructura se aplica a través de la huella del neumático ( $S$ ) en forma de presión ( $q = F/S$ ). Con la simulación de la carga aplicada se quiere conseguir:

- Simular la velocidad del paso del vehículo.
- Simular varios vehículos con misma carga, a la misma velocidad y separados entre ellos el mismo periodo temporal.
- Simular la fuerza que recibe la estructura durante el paso del vehículo.

La validación de las cargas aplicadas consiste en comprobar que la respuesta obtenida con las modelizaciones propuestas en este proyecto, disponibles en la librería *FirmesCarreteras*, simula todos los efectos enunciados anteriormente y reproduce el comportamiento real.

El paso de un vehículo provoca ondas de carga de tipo senoidal donde la frecuencia está relacionada con la velocidad del vehículo, como se explica en el Capítulo 3 (PROAS, 2013).

En el presente proyecto la carga se simula a través de dos ondas de tipo seno, una aplicada sobre el eje vertical, es decir la profundidad, y otra sobre el eje horizontal, es decir la dirección de avance del vehículo.

El sentido de avance del vehículo que se reproduce es el sentido de izquierda a derecha, sin embargo es posible invertirlo al emplear una carga de amplitud negativa sobre el eje horizontal.

Como la carga del vehículo en el eje vertical siempre provoca una fuerza en el mismo sentido, sólo se seleccionan los semiperiodos positivos de la fuente senoidal de forma que se logre reproducir el efecto del paso del vehículo en esta dirección.

Las cargas se pueden simular de dos formas:

- Mediante la selección de las clases necesarias para modelar la carga que se encuentran en los paquetes *Fuentes* y *Carga*. Método 1.
- Mediante la utilización del modelo denominado *Modelo\_Carga\_Tafico* que se encuentra dentro del paquete *Carga* y está compuesto por modelos de menor nivel. Método 2.

Para la validación de ambos métodos se emplea en modelo *Validacion\_ModeloCarga* que se encuentra dentro del grupo *Ejemplos* en *Validaciones.Val\_Carga*.

Se realizan tres simulaciones:

- Una primera simulación para comprobar que la fuerza simulada reproduce el efecto esperado.
- Una segunda simulación para comprobar que la carga vertical siempre se aplica en el mismo sentido y que la masa se mueve acorde a la aplicación de la carga.
- Una tercera simulación para comprobar que se puede reproducir el paso de varios vehículos sobre la estructura.

A continuación se presenta la parametrización de los modelos necesaria para conseguir los efectos deseados en las simulaciones que se van a realizar.

### 5.3.1 Método 1: ValidacionCarga1

La aplicación de las cargas a través del método 1 se lleva a cabo empleando la clase *FuerzaAplicada* del paquete *Carga* y dos clases del paquete *Fuentes* que representan el tipo de función temporal de la fuerza que se aplica sobre la estructura, en las dos direcciones consideradas, eje vertical y eje horizontal.

Para la modelización de la carga aplicada por los vehículos pesados se emplean dos fuentes de tipo senoidal, una conectada al eje vertical y otra conectada al eje horizontal del componente *FuerzaAplicada*, el cual se encuentra conectado al *elementoInercial* (véase Figura 5.2).

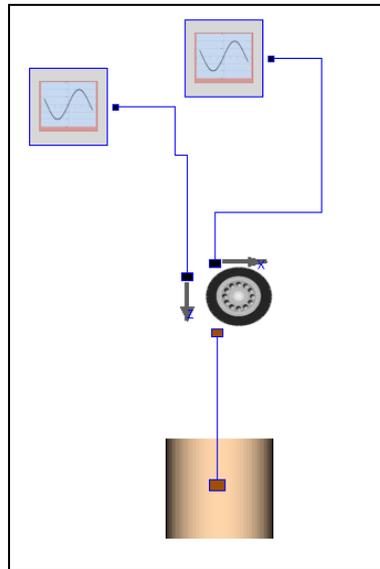
Los parámetros del componente *FuerzaAplicada* son los siguientes:

- **DatosHuella:** Se trata de una clase de tipo *Record* que contiene los valores de velocidad del vehículo, radio de la huella y la presión de los neumáticos.
- **Cr:** Coeficiente de rodadura. Este coeficiente modifica el valor de la fuerza aplicada en el eje horizontal ya que es el cociente entre la fuerza denominada resistencia a la rodadura<sup>3</sup> y la fuerza normal a la superficie de rodadura. Depende de las características del neumático y de las condiciones de adherencia de la carretera. Puede ser un valor fijo o una función. En este proyecto se usa como valor 0.012 que es el valor medio para los camiones sobre hormigón y asfalto (Heras Barras, 2010).

---

<sup>3</sup> Se trata de la fuerza horizontal resultante provocada en la superficie del firme, en la zona de interacción neumático-suelo (huella), debido a la fuerza que se debe aplicar paralela al suelo para que se mueva la rueda del vehículo.

- S: Representa la superficie de la huella del neumático y se calcula como si fuera una circunferencia de radio el valor seleccionado con el record *DatosHuella*.



**Figura 5.2 Ejemplo que simula la aplicación de una carga sobre una estructura mediante el método1**

La fuente senoidal de la carga vertical se programa de forma que la frecuencia de aplicación de la carga corresponda con una velocidad determinada. La frecuencia de la onda, por tanto, se obtiene a través del cálculo del tiempo de carga ( $l_t$ ) mediante la ecuación (3.11) a una profundidad  $d = 0$ . La frecuencia de la fuente senoidal aplicada será el doble del inverso del tiempo de carga ( $l_t$ ).

La fuente senoidal de la carga horizontal se programa con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de la carga vertical, de forma que simule la fuerza tangente sobre la estructura (véase Figura 5.3).

En las fuentes de tipo senoidal el parámetro *TiempoFin* indica el tiempo en el que se deja de reproducir la función. En caso de que se quieran simular, mediante este método, el paso de varios vehículos, se tiene que seleccionar el tiempo final correspondiente a dos veces el número de vehículos por la frecuencia de la función. Se puede ver en la Figura 5.3.

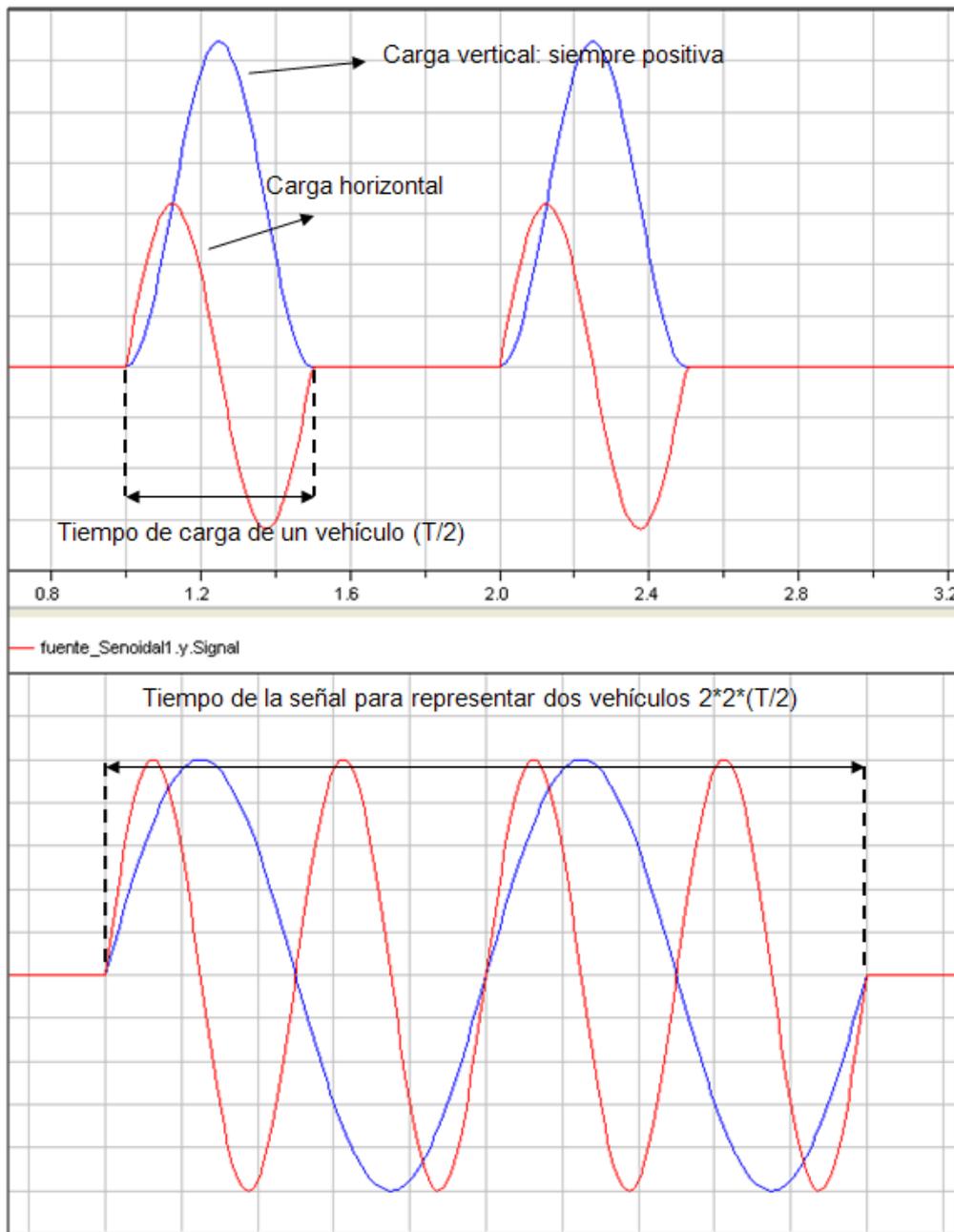


Figura 5.3 Simulación del paso de dos vehículos por el método1

El *elementoInercial* contiene los siguientes parámetros:

- rho: Representa la densidad del material. Sirve en el cálculo de la masa inercial del elemento.
- dy: Representa el espesor del elemento.
- S: Superficie de la huella del vehículo. El elemento inercial considerado tiene un volumen igual a  $S \cdot dy$ .
- pos: Marca la posición desde la superficie de la masa de material. En este caso es cero.

- r\_ini: Es un vector, resuelto en el sistema de coordenadas global, que representa la posición de la masa. La masa se modeliza como una masa concentrada en un punto.
- Inercia: Es un parámetro de tipo booleano que sirve para simular sin considerar la masa de los materiales cuando su valor es false.

### 5.3.2 Método 2: ValidacionCarga2

La aplicación de las cargas a través del método 2 se lleva a cabo empleando el modelo compuesto por las clases que modelizan las fuerzas aplicadas sobre la estructura, las funciones temporales que representan a esas fuerzas y la función que relaciona la frecuencia de la carga aplicada con la velocidad del vehículo (3.11). En la Figura 5.4 se puede ver la aplicación de la carga a través de este método al *elementoInercial*.

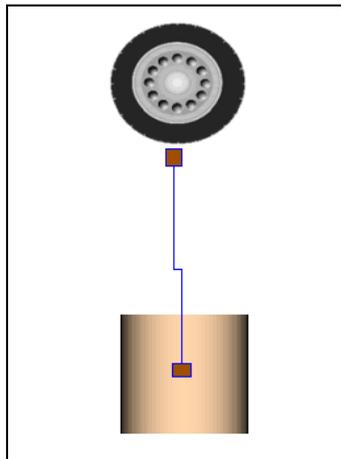


Figura 5.4 Ejemplo que simula la aplicación de carga sobre la estructura

En este caso, los parámetros visibles al usuario son los siguientes:

- DatosHuella: Parámetro de tipo Record para seleccionar la tipología de la carga aplicada sobre la estructura.
- TiempoIni: Tiempo en el que se empiezan a aplicar las cargas.
- Amplitud\_z: Valor que representa la amplitud de la onda senoidal que simula la aplicación de carga sobre el eje vertical. Normalmente es igual a 1 ya que el modelo de *FuerzaAplicada* calcula la amplitud que se debe emplear en función de los datos de presión y superficie aportados por *DatosHuella*.
- Amplitud\_x: Valor que representa la amplitud de la onda senoidal que simula la aplicación de carga sobre el eje horizontal. Normalmente es igual a 1. Si se quiere invertir el sentido del vehículo, se hace negativa la amplitud.

- Cr: Coeficiente de rodadura. Puede ser un valor fijo o una función. En este proyecto se usa como valor 0.012 (Heras Barras, 2010).
- n: Este valor indica el número de vehículos que se quieren simular.

Como se puede observar, este método es más cómodo para el usuario. En ambos métodos para variar las condiciones de la fuerza aplicada por los vehículos se selecciona entre los distintos tipos de records de tipo *HuellaDatos* que contienen los parámetros relacionados con la presión de contacto, superficie y velocidad del vehículo.

### 5.3.3 Resultados validación aplicación de la carga

Los resultados obtenidos corresponden con los valores esperados, ya que las cargas se comportan como funciones senoidales, la aplicada sobre el eje horizontal con el doble de frecuencia que la vertical. En el caso de la vertical sólo se contemplan los semiperiodos en los que la carga se aplica en sentido positivo del eje vertical. Se puede observar (véase Figura 5.3) como el paso de dos vehículos se simula espaciando temporalmente la señal. Esto se consigue eliminando la parte negativa de la función seno que representa a la carga vertical.

Los resultados obtenidos concuerdan con los valores esperados y simulan todos los efectos especificados anteriormente.

Las fuerzas que se producen sobre la estructura tienen siempre sentido positivo, en el caso de las fuerzas verticales, y la frecuencia es doble, en el caso de la fuerza horizontal, donde el sentido es positivo cuando el vehículo se acerca al punto de cálculo y negativo cuando se aleja.

El movimiento del *elementoInercial* (véase Figura 5.5 y Figura 5.6) en ambos ejes y para los dos métodos es el esperado. Se puede observar la forma de S del movimiento en el eje horizontal debido a la aplicación de la fuerza en ambos sentidos y el efecto del peso de la masa del elemento inercial.

En el caso del movimiento en el eje vertical, La gráfica central representa la diferencia entre los resultados obtenidos con el método 1 y con el método 2. La mayor diferencia es de 1 cm en el eje horizontal y 4 m en el eje vertical. El error se produce debido a que la fuerza aplicada mediante los dos métodos no es exactamente la misma. Ello puede deberse al redondeo. La fuerza aplicada en cada caso (método 1 y método 2) tiene un valor máximo de 63699.8 y 63701.7 N para el eje x y de 763.986 y 764.484 N para el eje z respectivamente.

### 5.3 Validaciones de las cargas aplicadas

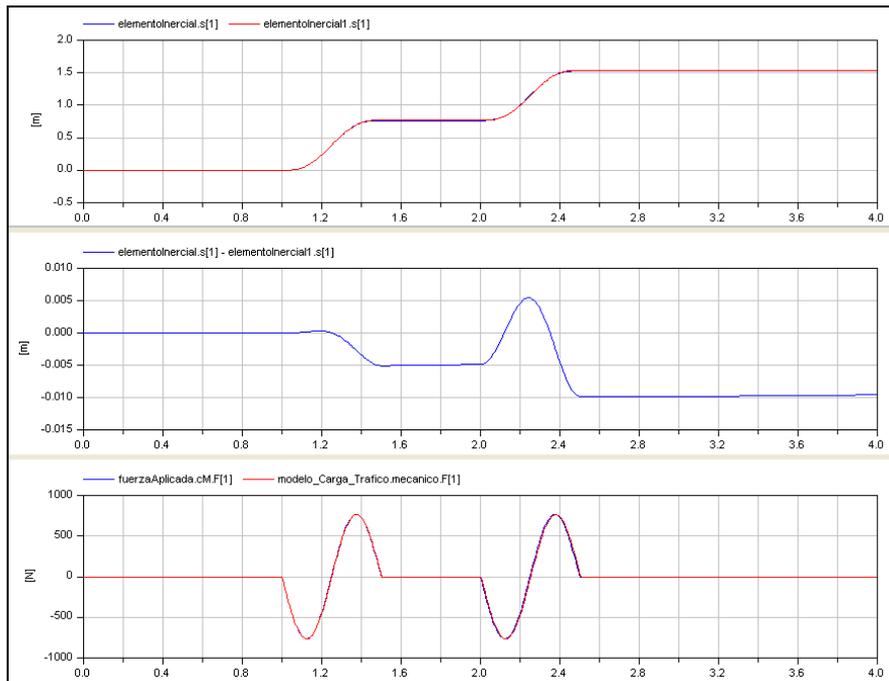


Figura 5.5 Movimiento de la masa de material ante la aplicación de carga en el eje x

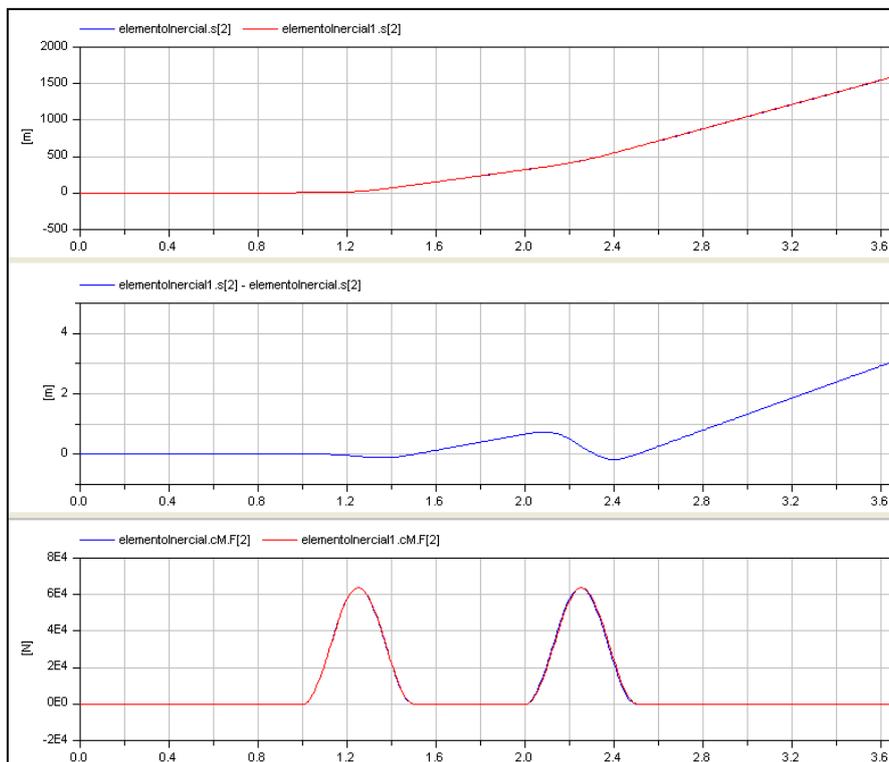


Figura 5.6 Movimiento de la masa de material ante la aplicación de la carga en el eje z

Las deformaciones y tensiones que provoca la carga varían con la velocidad en condiciones reales, a medida que aumenta la velocidad, disminuyen las deformaciones y tensiones provocadas en la estructura, lo que conlleva un menor daño (Pérez Ayuso,

Cadavid Jáuregui, Navareño Rojo, García Carretero y Marrón Fernández, 2013). Como se verá más adelante, ello se debe principalmente al comportamiento viscoelástico de la mezcla bituminosa, más que a la propia fuerza dinámica aplicada.

Cuando la frecuencia de carga es muy elevada, es decir para velocidades grandes, la simulación de la onda senoidal introduce errores apreciables en el valor de la carga simulada cuando se emplea el intervalo de integración por defecto en la simulación con Dymola de 500 (véase Figura 5.7).

El módulo de la fuerza total aplicada para dos velocidades diferentes (azul  $v = 120 \text{ km/h}$  y rojo  $v = 10 \text{ km/h}$ ) varía debido a los errores en la simulación de las funciones de tipo senoidal que se encuentran en los gráficos inferiores.

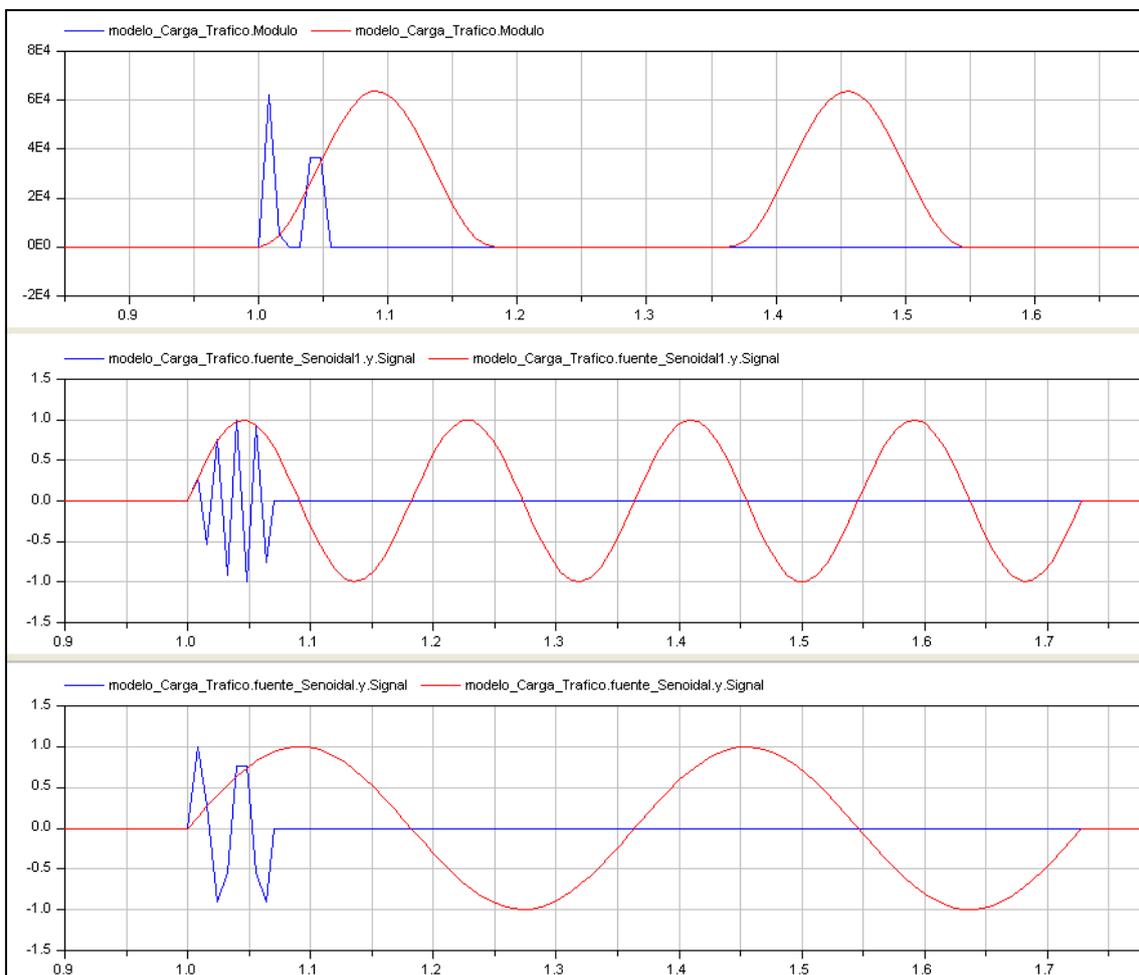


Figura 5.7 Módulo de la fuerza total aplicada al variar la velocidad. Intervalo de simulación de 500

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de los módulos de la fuerza aplicada sobre el elemento inercial en cada pasada de los vehículos.

Tabla 5.1 Errores en la reproducción de la fuerza aplicada con la velocidad

Velocidad (km/h)	Módulo de la fuerza aplicada vehículo 1 (N)	Módulo de la fuerza aplicada vehículo 2 (N)	Valor absoluto de la diferencia entre módulos (N)
3.4	63689.8	63701.7	11.9
5	63699.3	63706.6	7.3
10	63540.7	63688.5	147.8
15	63571.1	63647.4	76.3
20	63686.9	63135.3	551.6
30	63686.5	63125.7	560.8
40	63576.8	60436.8	3140
60	63278.6	56933.9	6344.7
80	54956.6	63540.1	8583.5
100	55471.4	45375.8	10095.6
120	62416	36480.3	25935.7

La diferencia entre el valor del módulo se hace notable a partir de velocidades mayores a 30 km/h como se puede ver en el gráfico de la Figura 5.8.

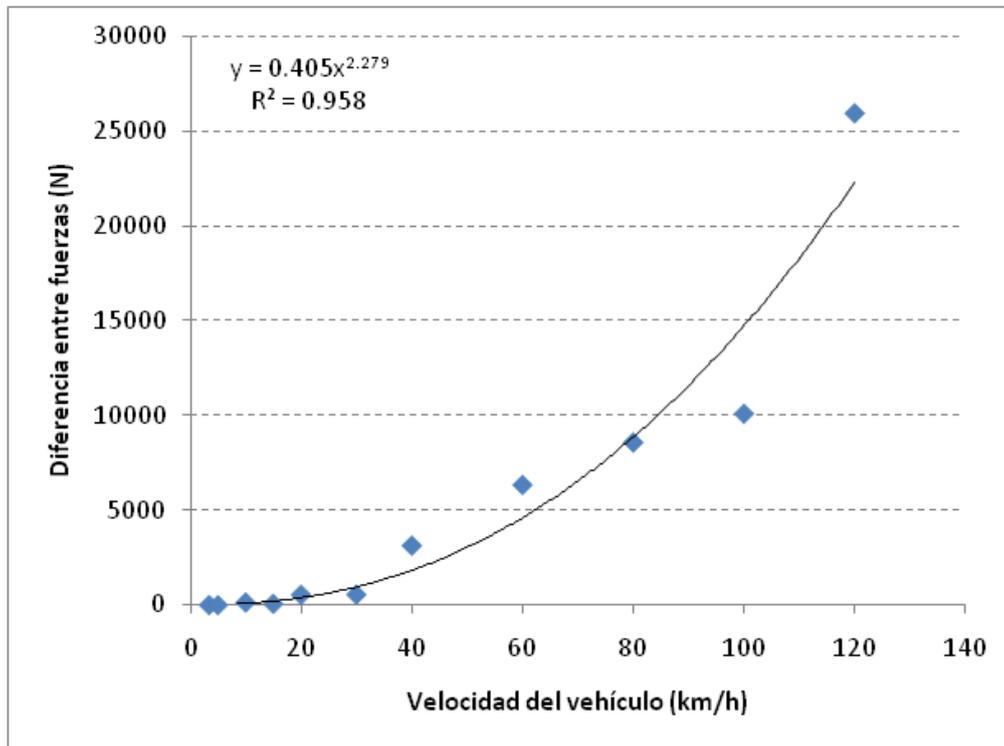


Figura 5.8 Errores cometidos para la fuerza aplicada en función de la velocidad

El comportamiento se ajusta a una función de tipo polinómica de grado 2.279. Estos errores se deben al número de intervalos de integración utilizados.

Si se aumenta el intervalo de integración de 500 a 5000, las ondas senoidales se reproducen bien para las frecuencias comprendidas entre 0.1 Hz y 30 Hz (véase Figura 5.9) que son las frecuencias habituales como representativas del paso del vehículo (Mateos Moreno, 2003).

Por lo tanto se debe tener en cuenta el intervalo de integración al simular este tipo de modelos, ya que las velocidades mayores a 30 km/h no se reproducen bien para el intervalo por defecto que presenta Dymola.

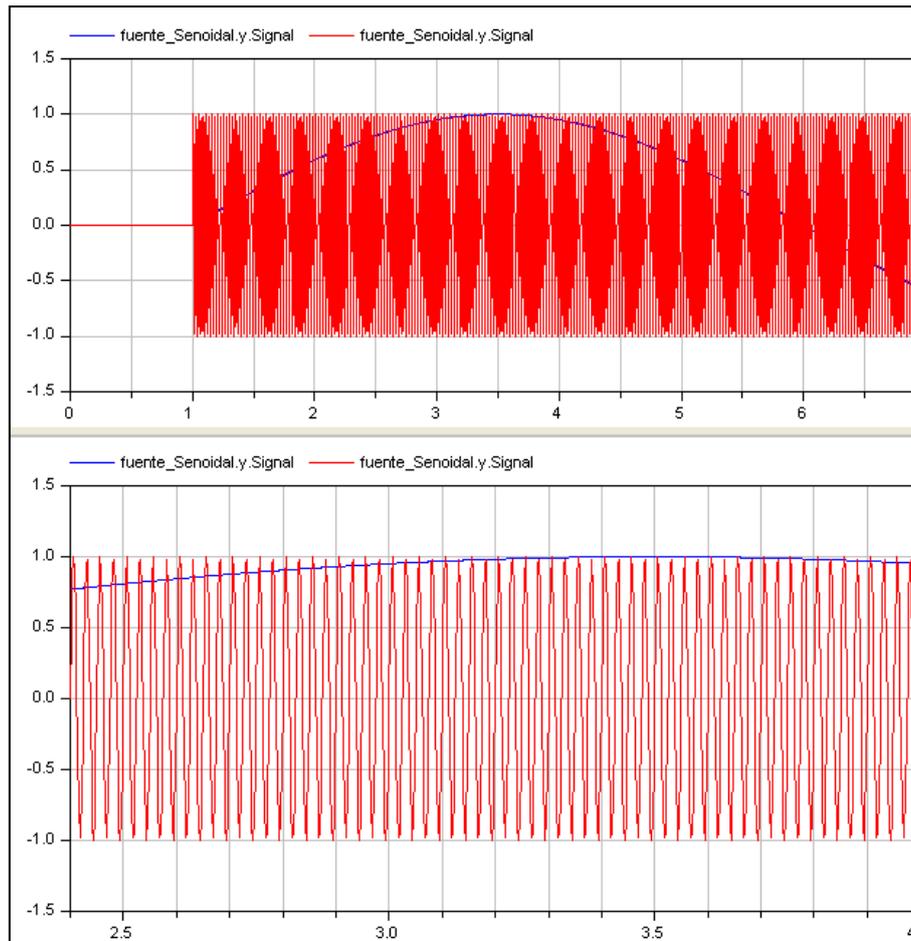


Figura 5.9 Señal senoidal de 0.3 Hz y 40 Hz para un intervalo de integración de 5000

También hay que tener en cuenta que a mayores valores del intervalo de integración la simulación requerirá mayor tiempo computacional.

## 5.4 Validaciones de las estructuras

La validación de las estructuras se realiza comenzando por los modelos más pequeños, que modelizan los comportamientos mecánicos y térmicos de los materiales, hasta los modelos más complejos que modelizan la capa completa de material.

### 5.4.1 Validación de los comportamientos

Los comportamientos que se han modelizado en una primera versión de la librería *FirmesCarreteras* son los siguientes:

#### Comportamientos mecánicos

Comportamiento inercial: este comportamiento permite tener en cuenta la inercial del material. El comportamiento inercial planteado es puntual, es decir se concentra la masa en un punto. Esta masa se puede desplazar en el plano formado por las dos direcciones del sistema de coordenadas establecido.

La validación del componente inercial consiste en comprobar el movimiento de la masa de material al aplicarle una fuerza externa. En la modelización del comportamiento inercial se tiene en cuenta la fuerza debido a la aceleración de la gravedad, que es constante en el tiempo y en sentido positivo en el eje vertical.

El sistema de coordenadas escogido (véase Figura 3.15) provoca que los movimientos positivos en el eje vertical sean en el sentido hacia abajo.

El modelo empleado para la validación del componente se encuentra dentro del grupo *Ejemplos.Validaciones.Val\_Estructura* y se denomina *Validacion\_Comp\_Inercial*.

Este modelo está compuesto por tres modelos que simulan la aplicación de la fuerza del vehículo sobre el componente de las tres formas posibles:

- Aplicación de la carga solamente en el eje vertical.
- Aplicación de la carga en ambos ejes.
- Aplicación de la carga solamente en el eje horizontal.

El componente inercial tiene los siguientes parámetros:

- DatosCapa: Se trata de un parámetro de tipo record *CapaDatos* que contiene las propiedades y parámetros de cada uno de los materiales que se usan en las capas.
- pos: Define la posición vertical dentro de la capa.
- dz: Define el espesor del componente inercial.
- S: Superficie de la huella sobre la que se aplica la fuerza del vehículo.
- N\_comp: Vector que indica el número de componentes en serie en el eje x y en el eje z. Este parámetro se utiliza para dividir el espacio cuando un comportamiento está formado por modelos más pequeños que tienen dimensiones en alguno de los ejes.
- r\_ini: Es el vector de posición de la masa inercial resuelto en el sistema de coordenadas global.
- Inercia: Parámetro de tipo booleano que indica si se tiene en cuenta en el modelado la masa. Valor true indica que es considerada.

Muchos de los parámetros que se utilizan para el modelado de los comportamientos se ocultan al usuario cuando se van encapsulando en otros modelos mayores, como sucede cuando se encuentra dentro de la clase *Sub\_Capa*.

En la Figura 5.10 se presentan los resultados de la simulación del modelo durante 3 segundos para la posición del comportamiento inercial en el eje horizontal. La carga es producida por un único vehículo.

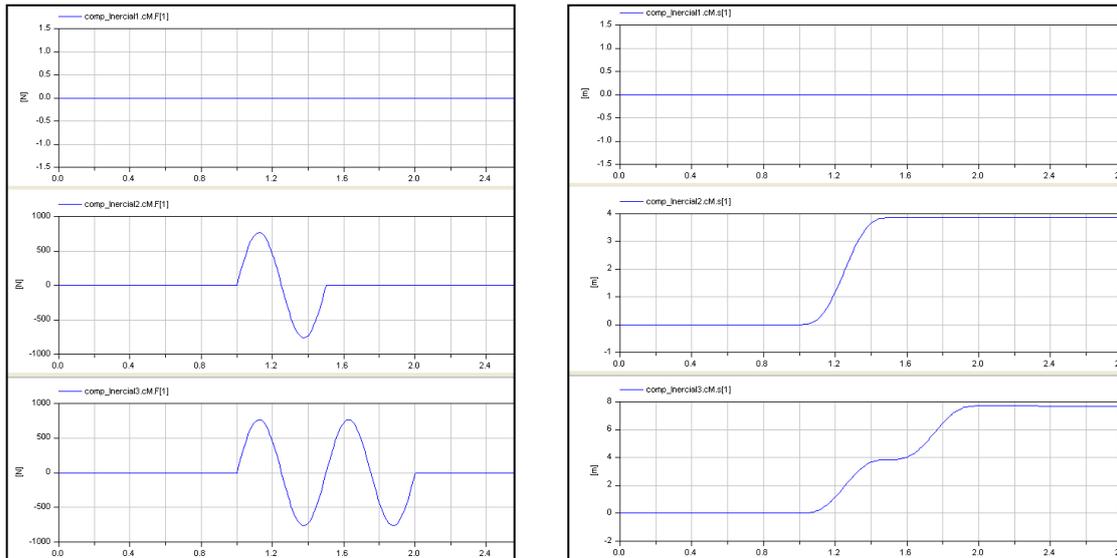


Figura 5.10 Comportamiento de la masa inercial en el eje horizontal

Hay que señalar lo que sucede al no aplicar fuerza en el eje vertical. En ese caso, por la programación que se ha hecho de la clase *FuerzaAplicada*, aunque se simule un único vehículo se producirá una carga horizontal doble, como la de la tercera gráfica de la izquierda en la Figura 5.10. Esto se debe a que no se cumple la condición necesaria para simular únicamente los semiperiodos de la carga vertical, lo que condiciona el resultado de la simulación de la carga en el eje horizontal.

Cuando se cumple esa condición las fuerzas se hacen cero, se puede ver en el código de la clase *FuerzaAplicada*:

```

//*****
//Ecuaciones constitutivas:
//*****
equation
  cM.F = -f;
  if noEvent(cSenal.Signal < 0) then
    f[1] = 0;
    f[2] = 0;
  else
    f[1] = DatosHuella.Presion*S*Cr*(cSenal2.Signal);
    f[2] = DatosHuella.Presion*S*((cSenal.Signal)^2);
  end if;

  a;
end FuerzaAplicada;

```

Esto no se corrige ya que la fuerza que siempre se va a simular es la vertical, por lo que no supone un inconveniente en el modelo de este tipo de sistemas, pero si es necesario tener conocimiento de esta limitación.

En la Figura 5.11 se presentan los resultados de la simulación de la posición del material en el eje vertical.

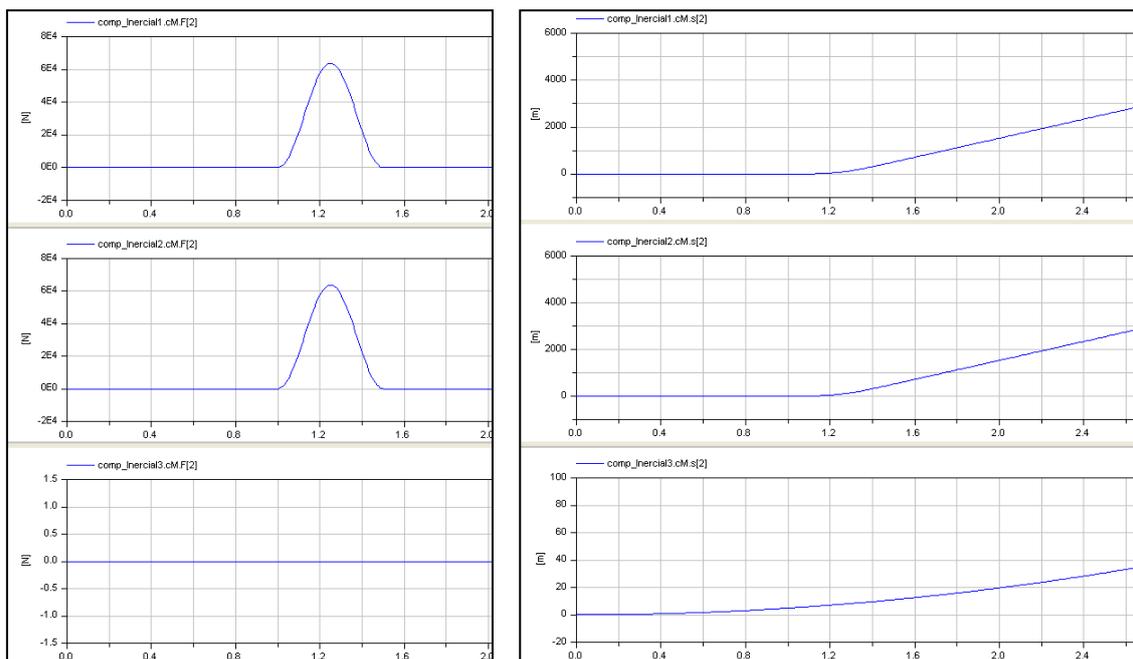


Figura 5.11 Comportamiento de la masa inercial en el eje vertical

Se puede observar, en la tercera gráfica de la Figura 5.11, como se aprecia el movimiento en el eje z debido a la fuerza de la gravedad, ya que el sistema no se encuentra en equilibrio al inicio. Se trata de una fuerza constante que se aplica solamente en el eje z y que provoca el movimiento en forma de S en el eje horizontal (véase Figura 5.10 tercera gráfica).

Esto se evitará al modelizar la capa de la estructura, ya que el peso se tendrá en cuenta únicamente para calcular el confinamiento del material y establecer las condiciones iniciales del sistema, que son condiciones de reposo hasta la aplicación de la carga debido al paso del vehículo.

Las fuerzas verticales aplicadas en el sentido positivo provocan un movimiento de la masa positivo. Las fuerzas verticales no se pueden aplicar en sentido negativo debido a la forma en que está programada *FuerzaAplicada*, en caso de que se aplique una amplitud negativa el resultado es un retardo en la aplicación de la carga (véase Figura 5.12).

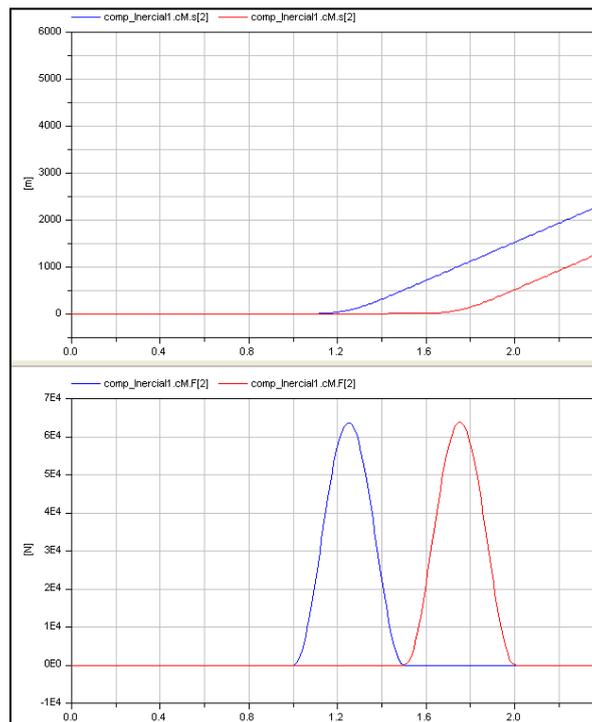


Figura 5.12 Movimiento de la masa ante la aplicación de una fuerza vertical

La curva roja corresponde a la carga aplicada parametrizada con una amplitud en el eje z negativa y la azul con una amplitud positiva. En ambos casos la carga aplicada es siempre positiva lo que provoca es un retardo en la respuesta del movimiento de la masa debido al semiperiodo de la función seno seleccionada.

Comportamiento elástico: este comportamiento modela el comportamiento de un material que bajo la aplicación de una fuerza se deforma sin ningún retardo temporal y una vez que la fuerza cesa, la recuperación de la forma original es instantánea. Se modela mediante el elemento atómico muelle.

La validación del componente elástico consiste en simular la deformación que se produce en el comportamiento al aplicarle una fuerza externa. Se realiza una

comprobación de la deformación que se produce, teniendo en cuenta un componente inercial y sin componente inercial.

El modelo empleado para la validación se encuentra dentro del grupo *Ejemplos.Validaciones.Val\_Estructura* y se denomina *Validacion\_Comp\_Elastico*.

Este modelo está formado por dos modelos menores que representan el sistema formado por una masa y un resorte representado en la Figura 5.13.

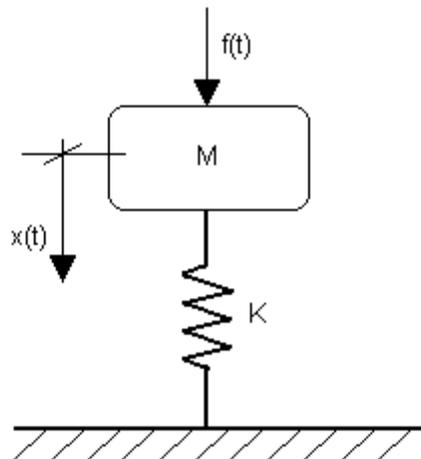


Figura 5.13 Sistema masa-muelle

Donde la constante de elasticidad del muelle partido por la superficie sobre la que se aplica la carga externa es igual al módulo de Young del material (5.1).

$$E = \frac{k}{S} \rightarrow \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.1)$$

En este proyecto se emplea el módulo de compresibilidad, que para un comportamiento elástico y lineal se relaciona con el módulo de Young a través de la ecuación (3.6). En este proyecto es a su vez multiplicado por el coeficiente de anisotropía del material, de forma que se tiene en cuenta esta propiedad.

Uno de los modelos no considera la masa por lo que no tiene componente inercial conectado, la fuerza se aplica directamente sobre el comportamiento elástico. La fuerza aplicada únicamente es en sentido vertical.

Los parámetros del comportamiento elástico son los siguientes:

- DatosCapa: Se trata de un parámetro de tipo record *CapaDatos* que contiene las propiedades y parámetros de cada uno de los materiales que se usan en las capas.
- dy: Longitud del comportamiento elástico en su estado de reposo.
- S: Superficie sobre la que se aplica la fuerza.

- N\_comp: Vector que indica el número de componentes en serie en el eje x y en el eje z. Este parámetro se utiliza para dividir el espacio cuando un comportamiento está formado por modelos más pequeños que tienen dimensiones en alguno de los ejes.
- r\_inicio: Vector unitario que representa la dirección y el sentido de la posición inicial del elemento, resuelto en el sistema de coordenadas global.
- Suelo: Este parámetro booleano sirve para indicar si estamos modelizando el comportamiento de un suelo, en caso que su valor sea true, o de otro tipo de material en caso contrario.
- Posicion: Indica la posición en la que se encuentra dentro de la capa. Si el valor es 1 o 2 se considera que las deformaciones se producen en el eje horizontal y al parámetro de la constante del muelle se le asigna el valor del módulo de rigidez. Cuando el valor es 3 se considera que las deformaciones se producen en el eje vertical por lo que se le asigna el valor del módulo de compresibilidad a la constante elástica del muelle.
- Capa: Parámetro de tipo booleano que indica si el comportamiento se está usando dentro de una capa. Es importante que este valor se cambie a false ya que su valor por defecto es true.

Para la validación se realizan tres tipos de simulaciones:

- Aquellas en las que se varía la constante elástica del muelle y se deja fija la carga. Los valores del módulo de Young se escogen dentro del rango de valores de los materiales que se usan en carreteras.
- Aquellas en las que se aplican valores de carga crecientes. Al igual que en el caso anterior, se contemplan cargas que se presentan en este tipo de fenómenos.
- Aquellas en las que se modifica la frecuencia de la carga aplicada.

En la Tabla 5.2 se presentan los resultados del primer tipo de simulaciones para los dos modelos el inercial y el no inercial.

**Tabla 5.2 Resultados variando el módulo de Young y manteniendo fija la carga**

<b>Modelo inercial</b>					
Fuerza aplicada simulada (Fs)	Módulo de Young (E)	Módulo de compresibilidad (K)	Deformación (def)	F=K·S·def	Desviación abs(Fs+F)
6.38E+04	6.00E+07	2.25E+08	-5.35E-03	-6.38E+04	1.75E-03
6.37E+04	1.00E+08	3.75E+08	-3.21E-03	-6.37E+04	3.88E-02
6.37E+04	1.20E+08	4.50E+08	-2.67E-03	-6.37E+04	7.50E-03
6.34E+04	1.00E+09	3.75E+09	-3.19E-04	-6.34E+04	1.02E-01
6.30E+04	6.00E+09	2.25E+10	-5.28E-05	-6.30E+04	3.58E-02
6.30E+04	1.00E+10	3.75E+10	-3.17E-05	-6.30E+04	4.37E-02
<b>Modelo no inercial</b>					
Fuerza aplicada simulada (Fs)	Módulo de Young (E)	Módulo de compresibilidad (K)	Deformación (def)	F=K·S·def	Desviación Abs(Fs+F)
6.37E+04	6.00E+07	2.25E+08	-5.34E-03	-6.37E+04	7.48E-02
6.37E+04	1.00E+08	3.75E+08	-3.20E-03	-6.37E+04	3.50E-02
6.37E+04	1.20E+08	4.50E+08	-2.67E-03	-6.37E+04	4.45E-02
6.37E+04	1.00E+09	3.75E+09	-3.20E-04	-6.37E+04	3.50E-02
6.37E+04	6.00E+09	2.25E+10	-5.34E-05	-6.37E+04	7.48E-02
6.37E+04	1.00E+10	3.75E+10	-3.20E-05	-6.37E+04	3.50E-02

En la Tabla 5.3 se presentan los valores obtenidos para el segundo tipo de simulaciones.

**Tabla 5.3 Resultados variando la carga aplicada y manteniendo el módulo**

<b>Modelo inercial</b>					
Fuerza aplicada simulada (Fs)	Módulo de Young (E)	Módulo de compresibilidad (K)	Deformación (def)	F=K·S·def	Desviación abs(Fs+F)
2.65E+04	1.00E+08	3.75E+08	-1.33E-03	-2.65E+04	5.00E-03
4.14E+04	1.00E+08	3.75E+08	-2.08E-03	-4.14E+04	7.50E-03
6.37E+04	1.00E+08	3.75E+08	-3.26E-03	-6.48E+04	1.09E+03
9.56E+04	1.00E+08	3.75E+08	-4.81E-03	-9.56E+04	4.75E-02
<b>Modelo no inercial</b>					
Fuerza aplicada simulada (Fs)	Módulo de Young (E)	Módulo de compresibilidad (K)	Deformación (def)	F=K·S·def	Desviación abs(Fs+F)
2.65E+04	1.00E+08	3.75E+08	-1.34E-03	-2.65E+04	9.75E-02
4.14E+04	1.00E+08	3.75E+08	-2.08E-03	-4.14E+04	3.25E-02
6.37E+04	1.00E+08	3.75E+08	-3.25E-03	-6.45E+04	8.09E+02
9.55E+04	1.00E+08	3.75E+08	-4.81E-03	-9.55E+04	4.75E-02

En la Figura 5.14 se puede observar la deformación que se produce al variar la frecuencia de carga, se han representado dos frecuencias correspondientes a velocidades de 3 km/h y 10 km/h.

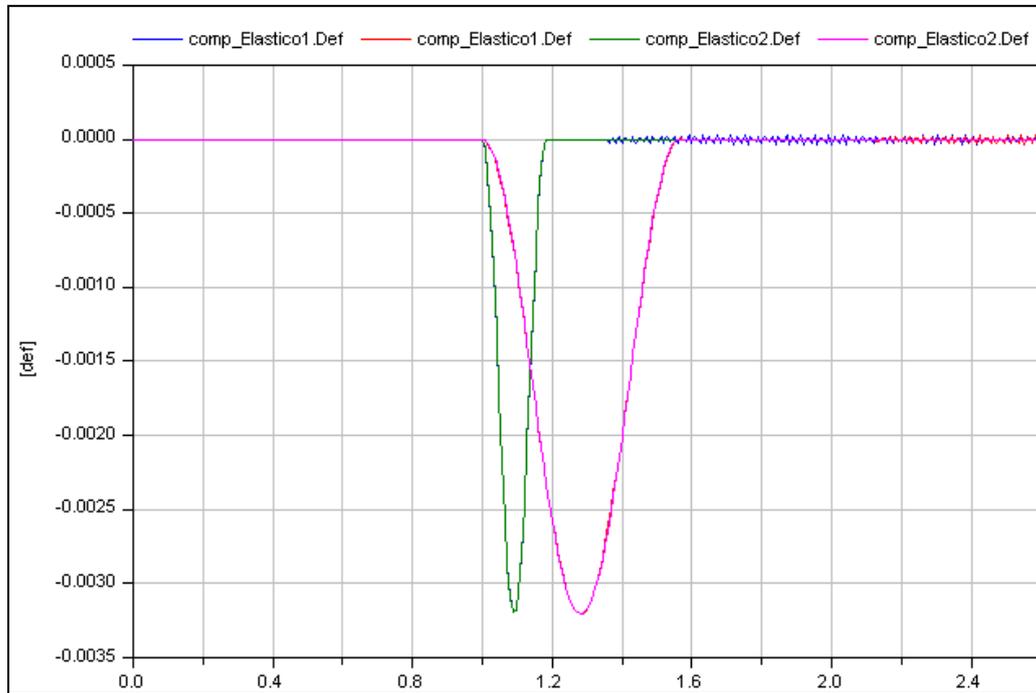


Figura 5.14 Deformaciones a diferente frecuencia de carga

Se observa como apenas varía la deformación con la frecuencia de carga. Los errores que se cometen a frecuencias altas tienen que ver con la simulación de la función senoidal, como ya se ha comentado, en caso de que el intervalo de integración escogido sea de 500 o menor. Comparando las deformaciones a 120 km/h y a 3 km/h aparecen diferencias apreciables debido al intervalo de integración empleado.

Como se puede observar en la Figura 5.14 y en las Tabla 5.2 y Tabla 5.3, los resultados de las simulaciones efectuadas muestran que el elemento que representa el comportamiento elástico del material, se comporta de manera coherente: ante aplicaciones de carga crecientes la deformación es mayor, al igual que al disminuir su módulo, y las deformaciones que se producen son negativas porque se trata de compresiones, es decir el material acorta su dimensión vertical.

La curva tensión-deformación sigue un comportamiento completamente elástico y lineal (véase Figura 5.15).

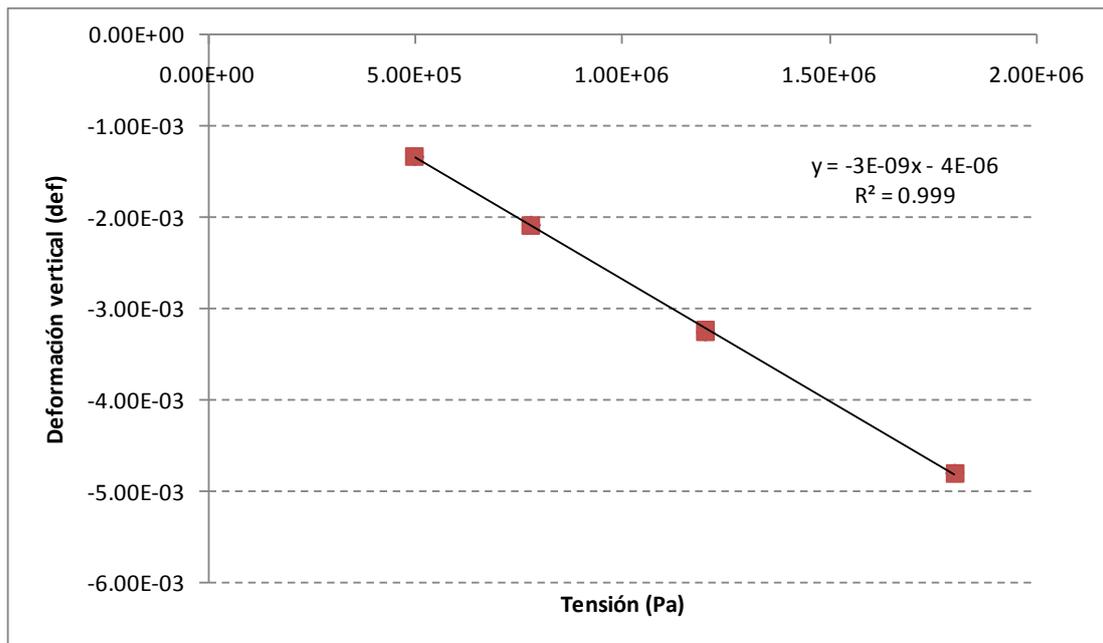


Figura 5.15 Curva tensión-deformación del comportamiento elástico

Comportamiento viscoelástico: este comportamiento se caracteriza porque presenta un desfase entre la aplicación de la carga sobre el material y la deformación que se produce. Además la deformación varía con el tiempo. Este comportamiento se modela a partir de la unión de un muelle y un amortiguador en paralelo formando el modelo de Kelvin-Voight (3.23).

Los parámetros propios (sin tener en cuenta los heredados a través de la interfaz) del comportamiento viscoelástico son:

- Frecload: Este parámetro representa la frecuencia de la carga aplicada ya que esta varía con la velocidad del vehículo.
- Tref: Esta temperatura de referencia se aplica en la ecuación de variación del módulo dinámico de la mezcla bituminosa con la frecuencia de carga y la temperatura.
- Desfase: Desfase entre la carga oscilatoria aplicada y la deformación del componente. Se emplea en la analogía entre los parámetros del modelo de Kelvin-Voight y el módulo dinámico de la mezcla.

Para la validación del comportamiento se realiza el ensayo de fluencia (Maestro Garriga, 2008), ya que es fácilmente reproducible con la librería. Para ello se aplica un pulso de carga de tipo impulso, con una duración del mismo de un segundo.

Este ensayo se realiza sobre el componente sin aplicar las ecuaciones de variación del módulo con la temperatura (3.29).

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

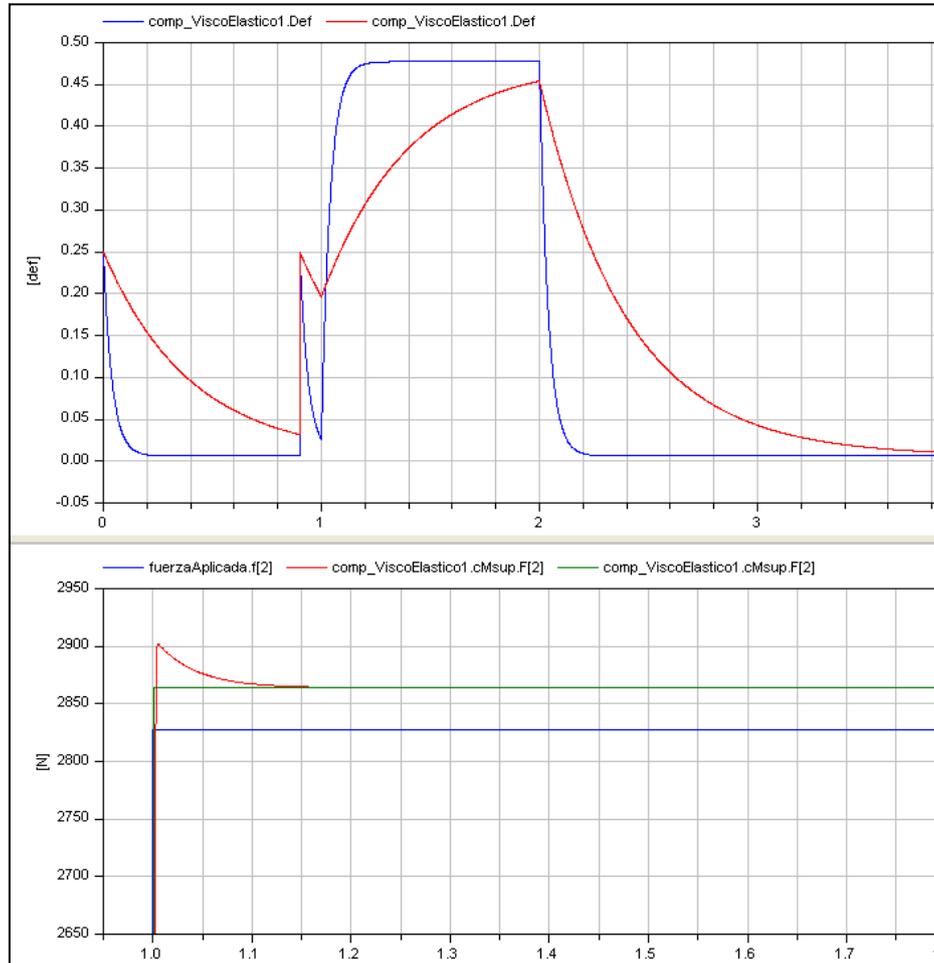


Figura 5.16 Comprobación del ensayo de fluencia

Como se puede observar en la Figura 5.16 al aumentar el valor del coeficiente de viscosidad el modelo fluye más, lo que provoca una disminución en su deformación. Los picos que aparecen en el  $t = 0.9$  s están relacionados con el problema del reinicio que se explicará, y se le dará una solución para las capas, más adelante.

En la Tabla 5.4 se presentan los valores de los parámetros del modelo de Kelvin-Voight para cada una de las gráficas.

Tabla 5.4 Parámetros del modelo de Kelvin-Voight

	Gráfica roja	Gráfica azul
Valor del módulo de elasticidad del muelle ( $E$ )	$2 \cdot 10^6$ Pa	$2 \cdot 10^6$ Pa
Valor del coeficiente de viscosidad ( $\eta$ )	$2 \cdot 10^7$ Pa·s	$2 \cdot 10^6$ Pa·s

Para establecer la analogía entre los parámetros del modelo y las propiedades de la mezcla escogida en este proyecto, es decir su módulo complejo, se realiza el ensayo oscilatorio.

En este ensayo se obtiene la variación del módulo con la frecuencia de aplicación de carga. El esfuerzo aplicado debe ser pequeño para mantenerse en el rango de respuestas lineales (Maestro Garriga, 2008). La tensión que se aplica es de tipo sinusoidal.

Cuando se aplica una carga sinusoidal, aparece un desfase ( $\delta$ ) entre la carga y la deformación provocada. Este desfase para los materiales viscoelásticos es menor a  $\frac{\pi}{2}$ .

De este ensayo se obtiene el denominado módulo complejo de la mezcla bituminosa (3.8). Este módulo complejo contiene una parte real ( $E' = E^* \cdot \cos\delta$ ) denominada módulo de almacenamiento, que está relacionada con la parte de la energía que puede recuperarse, por lo tanto está relacionada con la parte elástica; y otra parte imaginaria ( $E'' = E^* \cdot \sin\delta$ ) denominada módulo de pérdidas y está relacionada con la energía que se disipa, por tanto con la parte viscosa. De este modo el módulo complejo se puede expresar de la forma (Maestro Garriga, 2008):

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (5.2)$$

Este módulo depende de la temperatura y la frecuencia de aplicación de carga. Se puede construir una curva característica del material, denominada curva maestra (3.29) la cual permita conocer el módulo dinámico para cualquier combinación de temperatura y frecuencia (García S., 2012).

Una vez que se conoce el módulo dinámico del material, el desfase y la curva maestra, se puede realizar una analogía con el modelo de Kelvin-Voight.

De los distintos ensayos que se realizan para la caracterización de un material viscoelástico, se obtienen una serie de funciones que se pueden relacionar entre sí y de las cuales se pueden obtener los parámetros del modelo de Kelvin-Voight en función de los valores del módulo complejo y de la frecuencia de aplicación de carga (Maestro Garriga, 2008). De este modo los parámetros del modelo de Kelvin-Voight (módulo elástico  $E$  y viscosidad  $\eta$ ) para una mezcla bituminosa se pueden expresar del siguiente modo:

$$E = E'(\omega) = E^*(\omega) \cdot \cos\delta \quad (5.3)$$

$$\eta = \frac{E''(\omega)}{\omega} = \frac{E^*(\omega) \cdot \sin\delta}{\omega} \quad (5.4)$$

Conociendo la curva maestra de la mezcla, que nos proporciona el valor de  $E^*(\omega)$ , y el desfase ( $\delta$ ) entre la tensión y la deformación se pueden ajustar los parámetros del modelo de Kelvin-Voight.

En este trabajo se hace uso de los datos de la bibliografía (García S., 2012) para ajustar estos valores. La curva maestra (3.29) que se emplea en este trabajo corresponde a (García S., 2012) con los siguientes datos de los parámetros:

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
3.416678	-0.53483	0.602195	0.788306

(5.5)

Y con una función de factor de cambio de temperatura:

$$\log(a_T) = -0.1443 \cdot (T - T_0) \quad (5.6)$$

Para una temperatura de referencia de 25°C.

A continuación se realiza una simulación del comportamiento viscoelástico con variación de frecuencia y de temperatura. Es necesario para esta simulación que el valor de los intervalos de integración sea de 50.000 y la tolerancia 1e-6 para poder apreciar correctamente las frecuencias altas.

En la Figura 5.17 se presenta la variación de la deformación provocada en la mezcla cuando varía la temperatura.

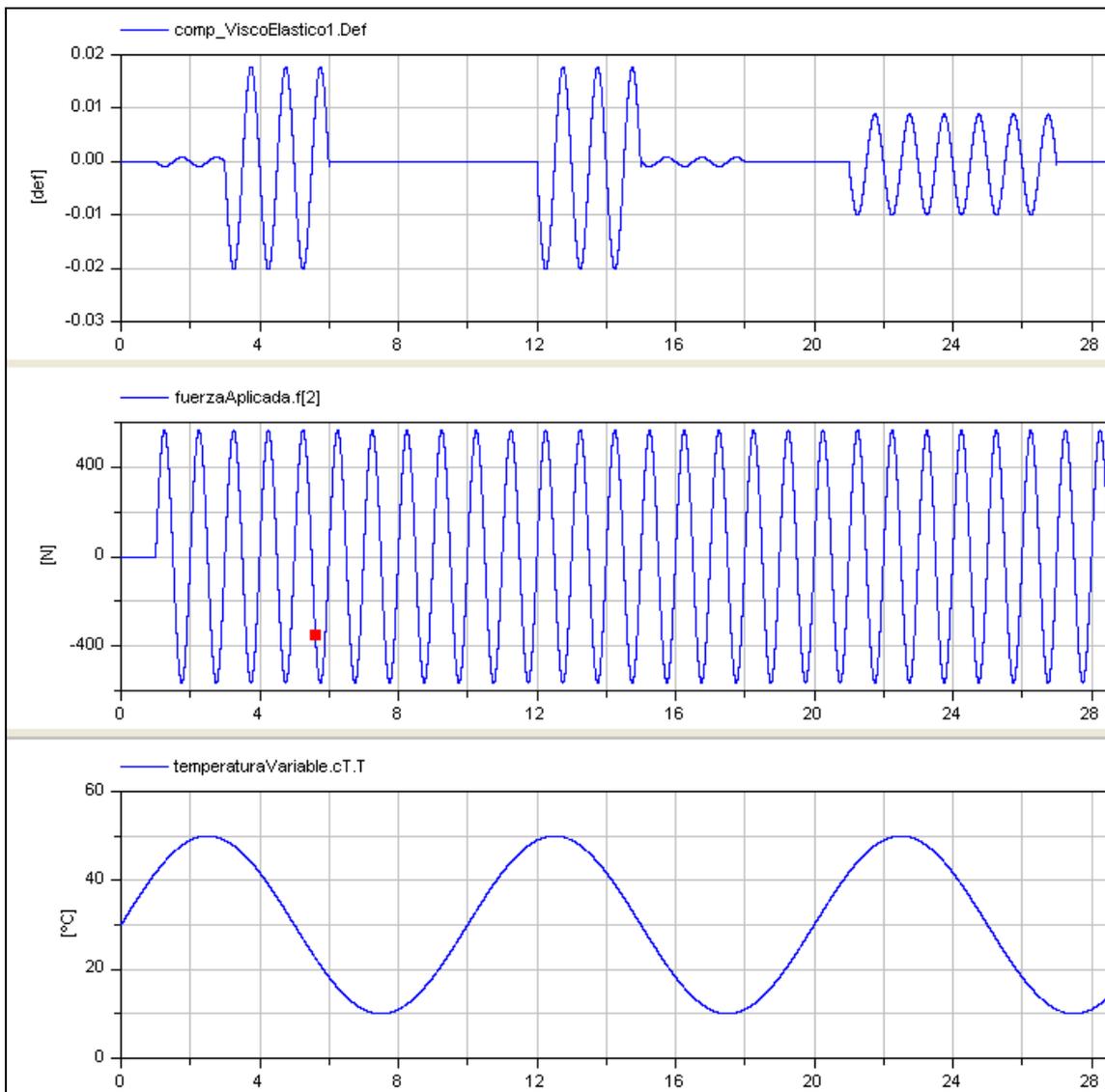
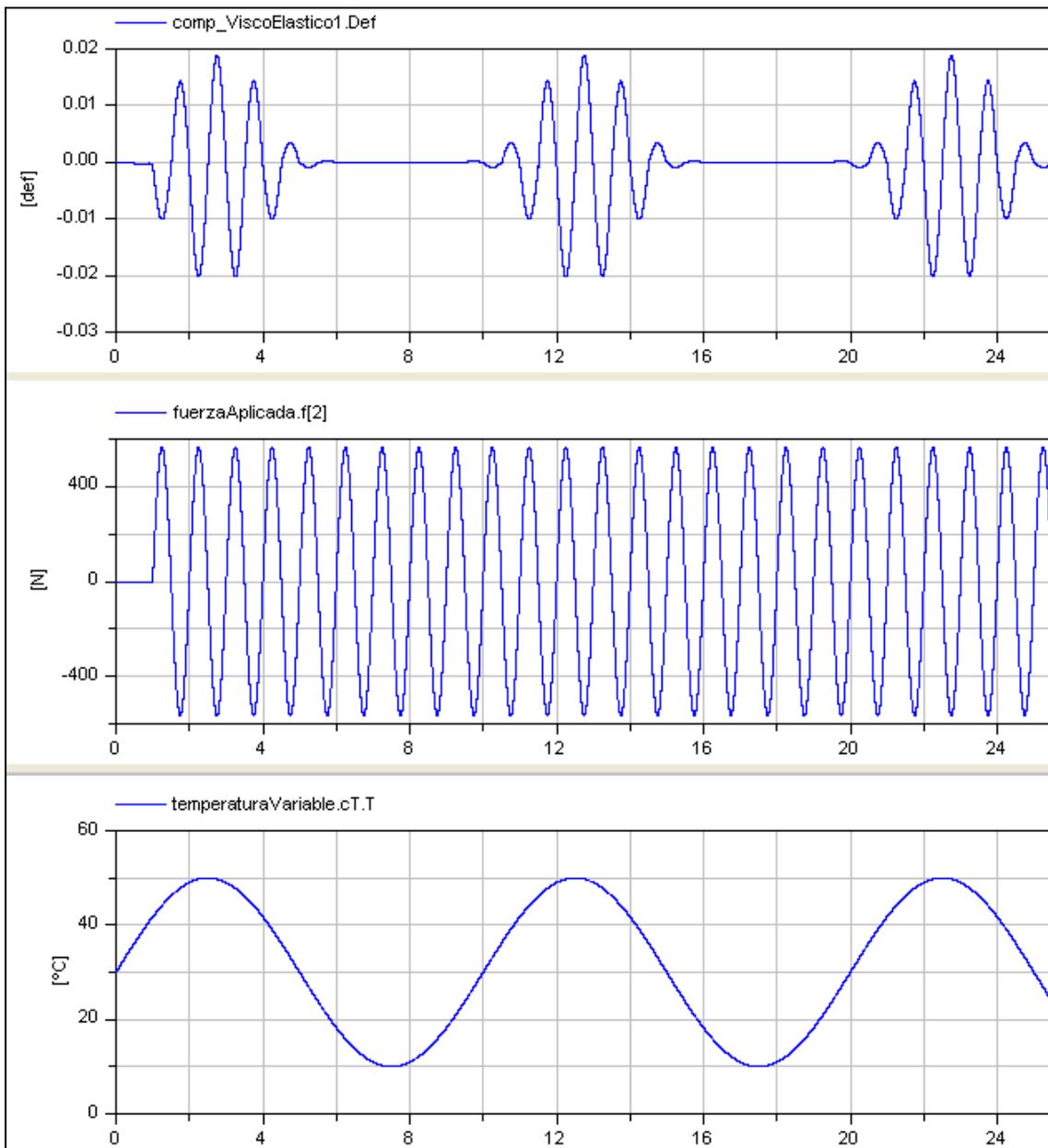


Figura 5.17 Variación de la deformación de la mezcla con la temperatura a una frecuencia de 1 Hz

La variación del módulo debido al cambio térmico se obtiene a través del muestreo del cambio de temperatura cada cierto tiempo. El periodo de muestreo se determina mediante un parámetro de la sub-capa denominado  $n$ . Este es modificable. Para ello se hace uso de la función de Modelica `sample()`. Variando  $n$  se puede seguir a la variación térmica de forma más precisa (véase Figura 5.18):



**Figura 5.18** Variación de la deformación debido a la variación del módulo por la temperatura a 1 Hz

Cuando se varía la frecuencia también varía el módulo de la mezcla, por lo que se pueden apreciar los cambios mostrados en la Figura 5.19 en el valor de la deformación:

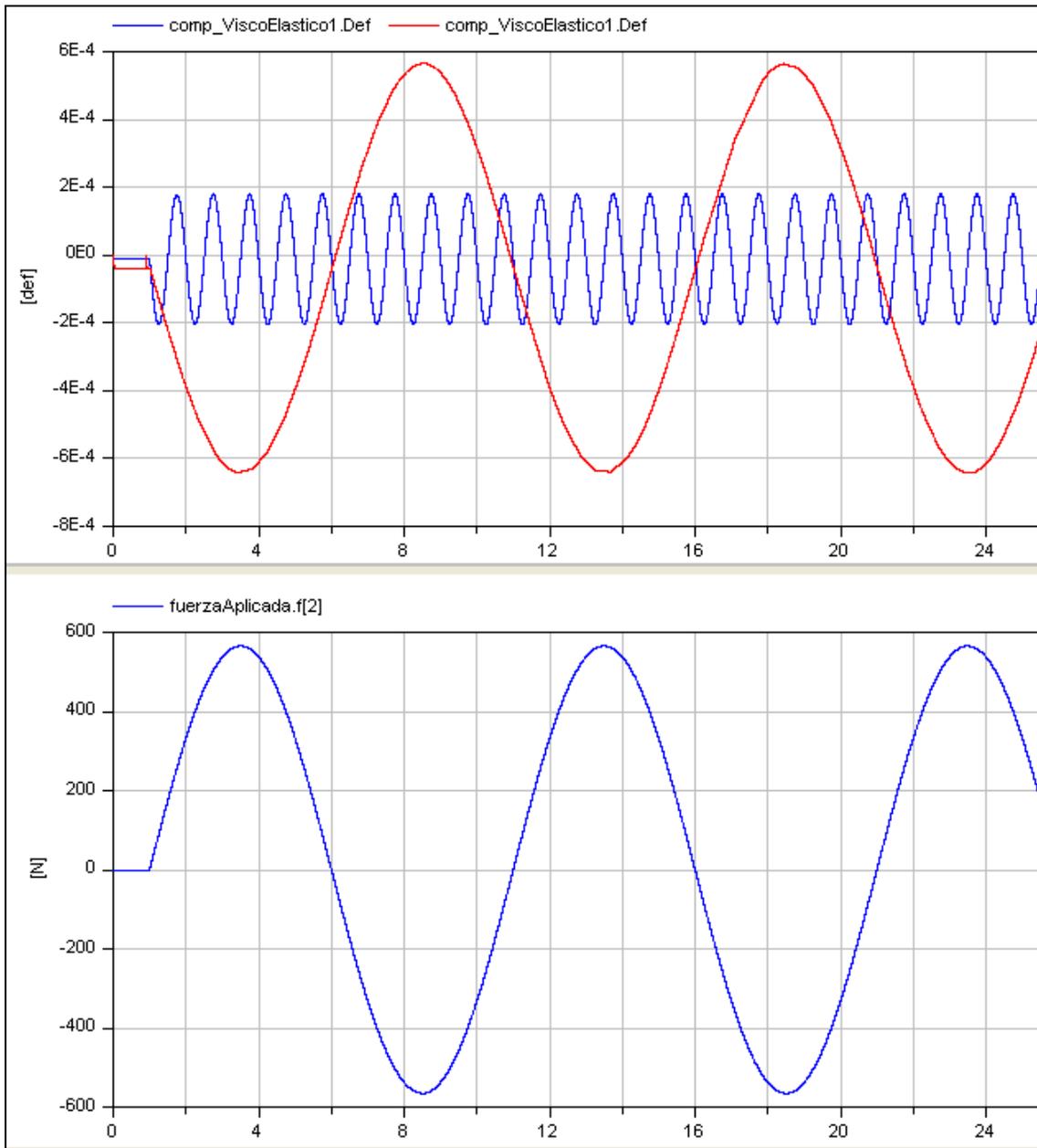


Figura 5.19 Variación de la deformación debido a la variación de la frecuencia de carga

Queda de esta forma validado el comportamiento viscoelástico.

### Comportamientos térmicos

Los comportamientos térmicos modelados, son en su mayor parte, fenómenos de transporte de flujo de calor entre la superficie del firme y el entorno que se caracteriza a través de la temperatura del aire. También se modeliza el transporte de calor por conducción a través del sólido de forma que se establece el perfil de temperaturas dentro de la estructura. La validación de todos estos componentes se realiza conjuntamente en validación del entorno térmico.

Comportamiento de resistencia térmica: con este comportamiento se modela la conducción de calor a través de un sólido. Está modelado mediante la ley de Fourier de la conducción de calor en un medio debido a una diferencia de temperaturas según (3.36).

Los parámetros de este tipo de comportamiento son:

- K: Conductividad térmica del material (W/m·°C).
- dy: Longitud del elemento resistivo dentro de la capa sólida (m). debe ser igual al espesor de la sub-capa.

Este modelo se conecta entre los planos de control de entrada a una sub-capa y de salida de la misma. Se refleja el transporte del flujo a través de la sub-capa. Las temperaturas que se obtienen corresponden con los planos de control superior e inferior del volumen representado por la sub-capa. De esta forma se obtiene el perfil de la temperatura de la capa a distintas profundidades.

La temperatura que se utiliza dentro de la capa corresponde al valor medio de las temperaturas de los planos de control (véase Figura 5.20).

```

model Comp_TermicoResistivo
  "Modelización de la propagación de la temperatura a través del material de la capa."

  //*****
  //Herencia:
  //*****
  extends Interfaces.ComportamientoTermico;

  //*****
  //Estructura interna del comportamiento: elementos atómicos que lo forman.
  //*****
  [ ]

  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
  equation
  [ ]
  cSenal.Signal=(cTsup.T+cTinf.T)/2;
end Comp_TermicoResistivo;

```

Figura 5.20 Se establece una temperatura intermedia entre los planos de control

El valor de esta temperatura se comparte con los comportamientos mecánicos e inerciales a través de un conector de tipo *Signal*.

Para la parte del entorno se crean las clases que modelizan el transporte por convección, radiación solar y radiación atmosférica. En todos los casos excepto en el caso de la radiación solar el transporte de calor se realiza entre el aire, caracterizado

por su temperatura y la superficie del firme. En el caso de la radiación solar se trata de un flujo neto de calor absorbido por el firme.

Conducción de calor mediante convección: este mecanismo de transferencia de calor entre el aire y la superficie del firme se modela mediante la ecuación (3.33). El parámetro que se emplea es el coeficiente de convección ( $h_c$ ) en  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

Conducción de calor debido a la radiación atmosférica: los parámetros que se emplean en esta clase son:

- $E_a$ : Coeficiente de absorción de la superficie del firme de radiación de onda larga.
- $E_e$ : Coeficiente de emisión de este tipo de radiación por parte de la superficie del firme.

Flujo de calor neto debido a la radiación solar absorbido por el firme: la superficie del firme absorbe parte de la radiación directa del Sol y parte la refleja. La parte reflejada viene determinada por el albedo ( $\alpha$ ) que es el parámetro que caracteriza a esta clase.

Comportamiento de capacidad térmica: este comportamiento modela la variación de la temperatura con el tiempo. Se trata de un elemento que simula el cambio de temperatura que experimenta un cuerpo debido al aumento de su energía interna. Por tanto se trata de una capacitancia que lo que provoca es la simulación de la dinámica de la variación de la temperatura en un cuerpo con el tiempo. Introduce un retardo en la respuesta de las temperaturas a lo largo de la estructura del firme.

Este comportamiento se emplea para la resolución de la ecuación de balance energético que se produce en la superficie del firme, de forma que se obtiene la variación temporal de la temperatura de un elemento diferencial de la superficie del firme.

Debido a que los modelos de respuesta tienen una dinámica más rápida que los cambios térmicos, normalmente se empleará un perfil de temperaturas instantáneo cuando se simulen los modelos.

Los parámetros que caracterizan esta clase son:

- $C$ : es la capacidad térmica del material ( $kg/m^3$ ).
- $\Delta t_x$ : se trata de la longitud del elemento de la superficie del firme (m). Se usa el primer centímetro de la misma.

- Datos: que es un record con los datos del material del que modeliza este comportamiento.

### **Comportamiento de disipación de energía mecánica (amortiguamiento)**

Se ha modelizado un tipo de comportamiento de disipación de energía con el fin de modelizar el amortiguamiento estructural del material debido a la fricción entre las partículas. Se trata de la modelización de un fenómeno de transporte de energía mecánica entre los planos de control del elemento inercial de la sub-capa y el elemento inercial de la siguiente. Establecen la magnitud y el sentido de la energía mecánica intercambiada.

La disipación de energía en el sistema se modeliza a través de un amortiguador dispuesto dentro de la sub-capa conectando al componente inercial con el conector inferior, que es el que se conecta al elemento inercial de la siguiente sub-capa.

La validación se realiza mediante el modelo denominado *Validacion\_Amortiguamiento* que se encuentra dentro de *Ejemplos.Validaciones.Val\_Estructura*. En el modelo se representan dos modelos, uno de ellos para modelizar el amortiguamiento en el eje z y el otro en el eje x (véase Figura 5.21).

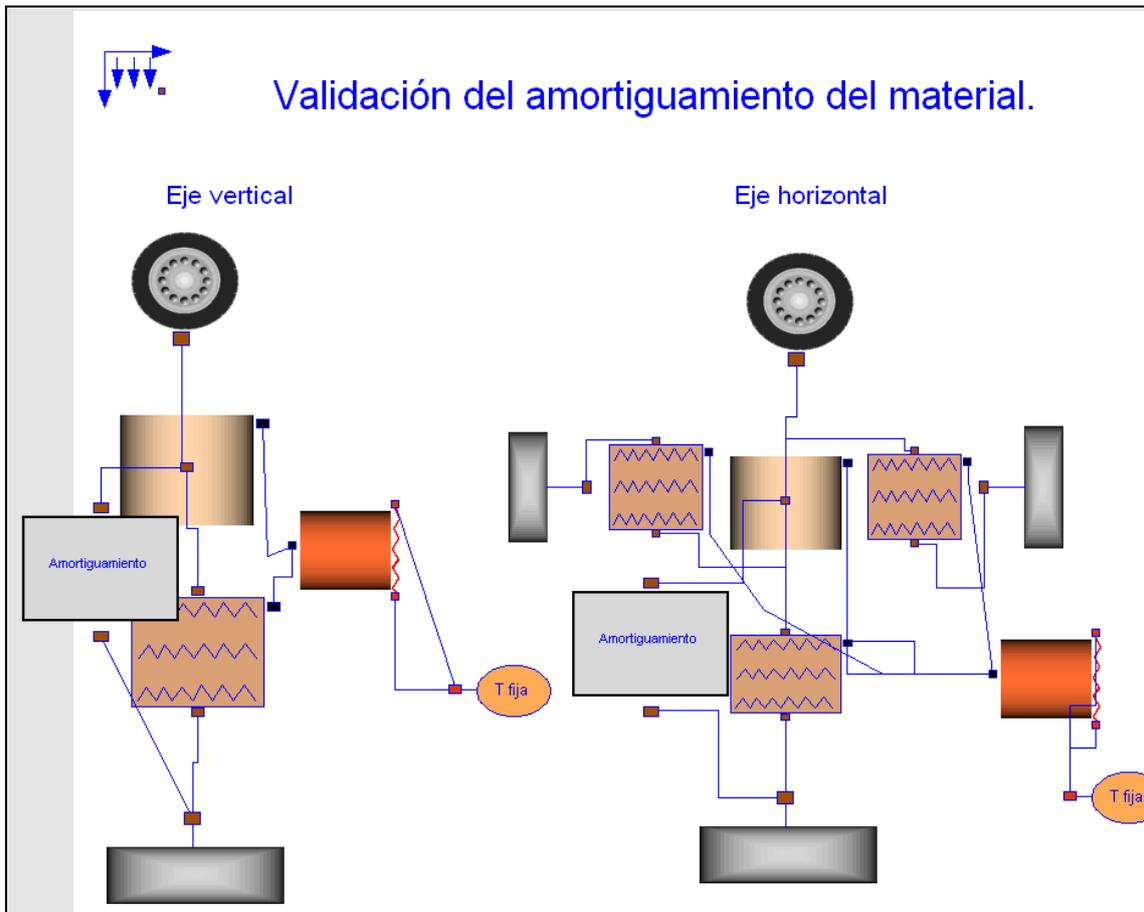


Figura 5.21 Modelo de validación del amortiguamiento estructural

Los parámetros del componente amortiguamiento estructural son los siguientes:

- Pos: Posición vertical dentro de la capa (heredado de otra clase: adherencia).
- Amort\_x: Coeficiente de ajuste para amortiguamiento en el eje horizontal.
- Amort\_z: Coeficiente de ajuste para amortiguamiento en el eje vertical.
- Masa: Masa del elemento inercial.
- E: Módulo de Young del material.
- Poisson: Coeficiente de Poisson del material.

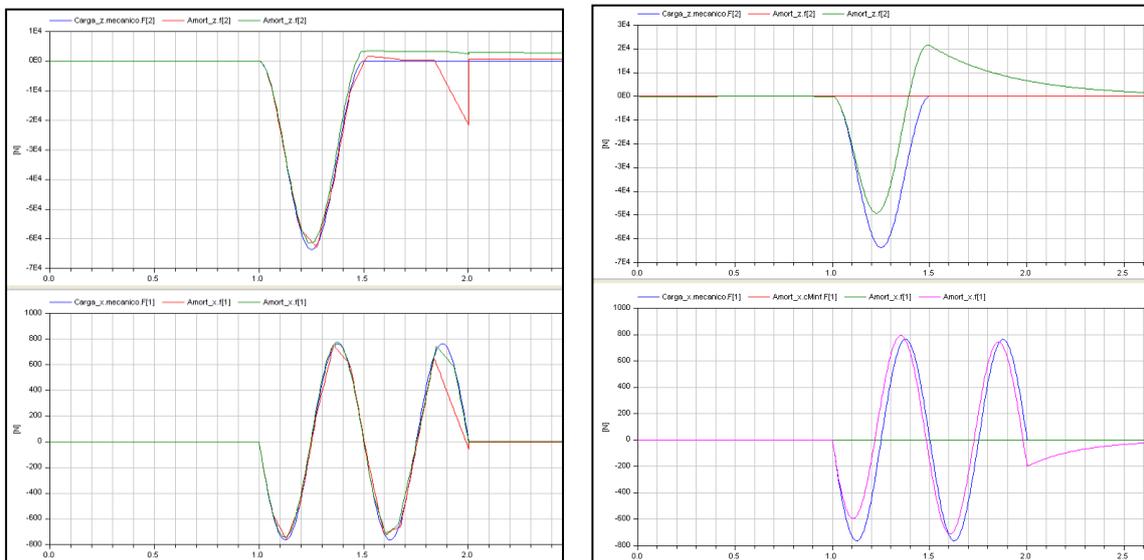
La modelización del amortiguamiento estructural se realiza según las ecuaciones (5.7). La elección de dos únicos parámetros  $amort_x$  y  $amort_z$  se realiza por simplicidad y después de realizar una prueba para conocer la sensibilidad de las combinaciones siguientes:

$$\begin{aligned} f[1] &= (amort_x \cdot G + Masa) \cdot v[1] \\ f[2] &= (amort_z \cdot K + Masa) \cdot v[2] \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} f[1] &= (G + \text{amort}_x \cdot \text{Masa}) \cdot v[1] \\ f[2] &= (K + \text{amort}_z \cdot \text{Masa}) \cdot v[2] \end{aligned} \quad (5.8)$$

En la Figura 5.22 se puede observar como al variar, en el caso del grupo de ecuaciones (5.8), gráfica de la izquierda, los parámetros no se produce amortiguamiento. Las gráficas rojas corresponden a coeficientes de amortiguamiento de  $1.2 \cdot 10^{10}$  y las verdes de  $10^{-13}$ . Lo que indica la poca sensibilidad que presenta esta combinación de coeficientes de ajuste.

Sin embargo, una variación en los parámetros de 0.1 a 0 (gráfica de la derecha Figura 5.22) da como resultado una variación en el amortiguamiento muy grande para el grupo de ecuaciones (5.7). Lo que indica una mayor sensibilidad a los cambios con lo que se considera más conveniente para realizar los ajustes del modelo.



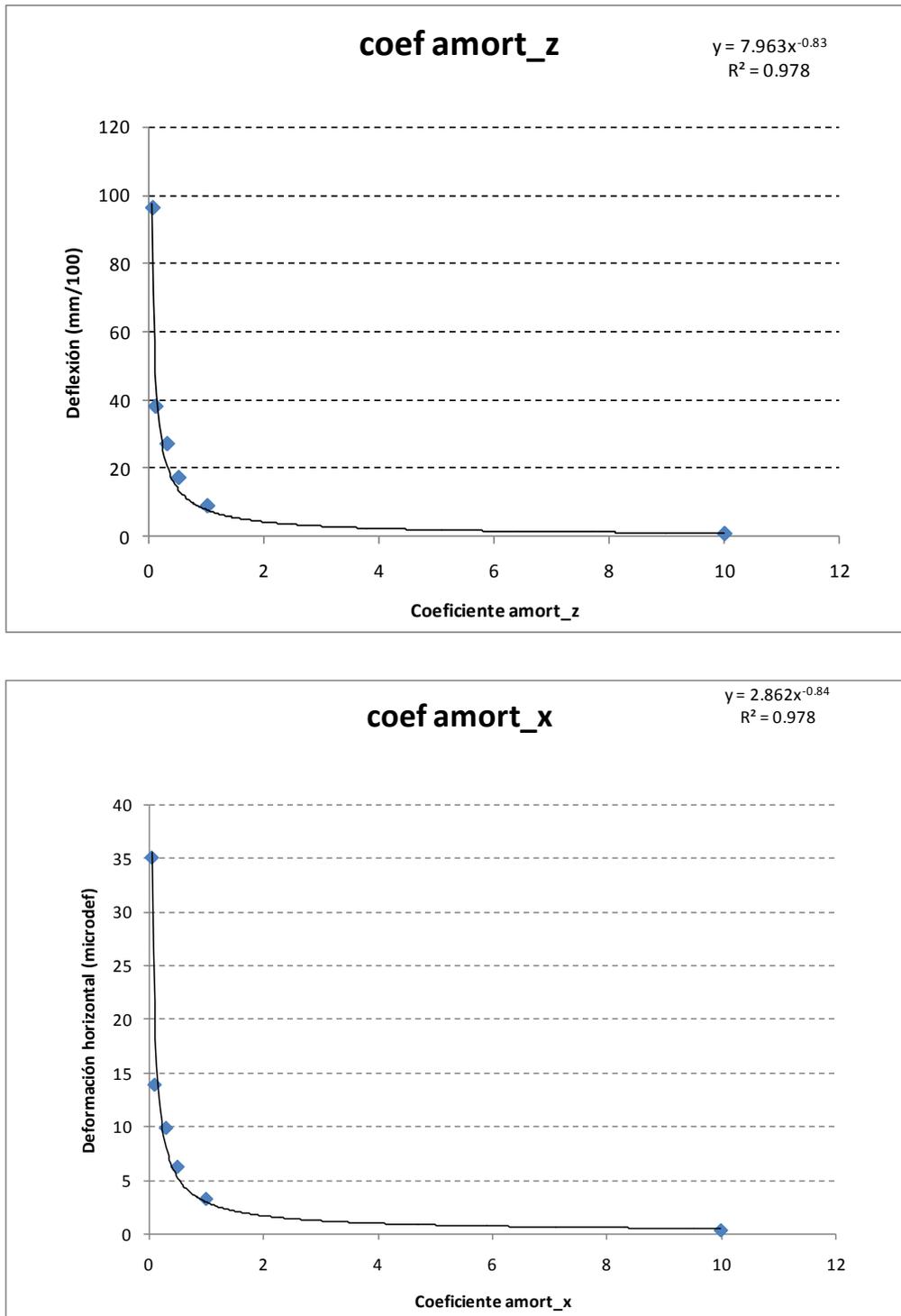
**Figura 5.22 Amortiguamiento con parámetros aplicados a la masa o a los módulos**

De esas pruebas se concluye que las ecuaciones (5.7) presentan mayor sensibilidad que las (5.8) por lo que resultan más adecuadas como parámetros de ajuste. Los parámetros siempre tienen que ser positivos.

A continuación se realiza un análisis de los efectos que provoca la variación de los parámetros en el valor de la carga aplicada.

Primero se realiza la variación de los parámetros de forma independiente, es decir que en uno de los modelos aplica fuerza en el eje vertical y se modifica el coeficiente de amortiguamiento para ese eje. En el otro modelo se aplica fuerza en el eje horizontal y la vertical se hace cero y se varía el coeficiente para ese eje.

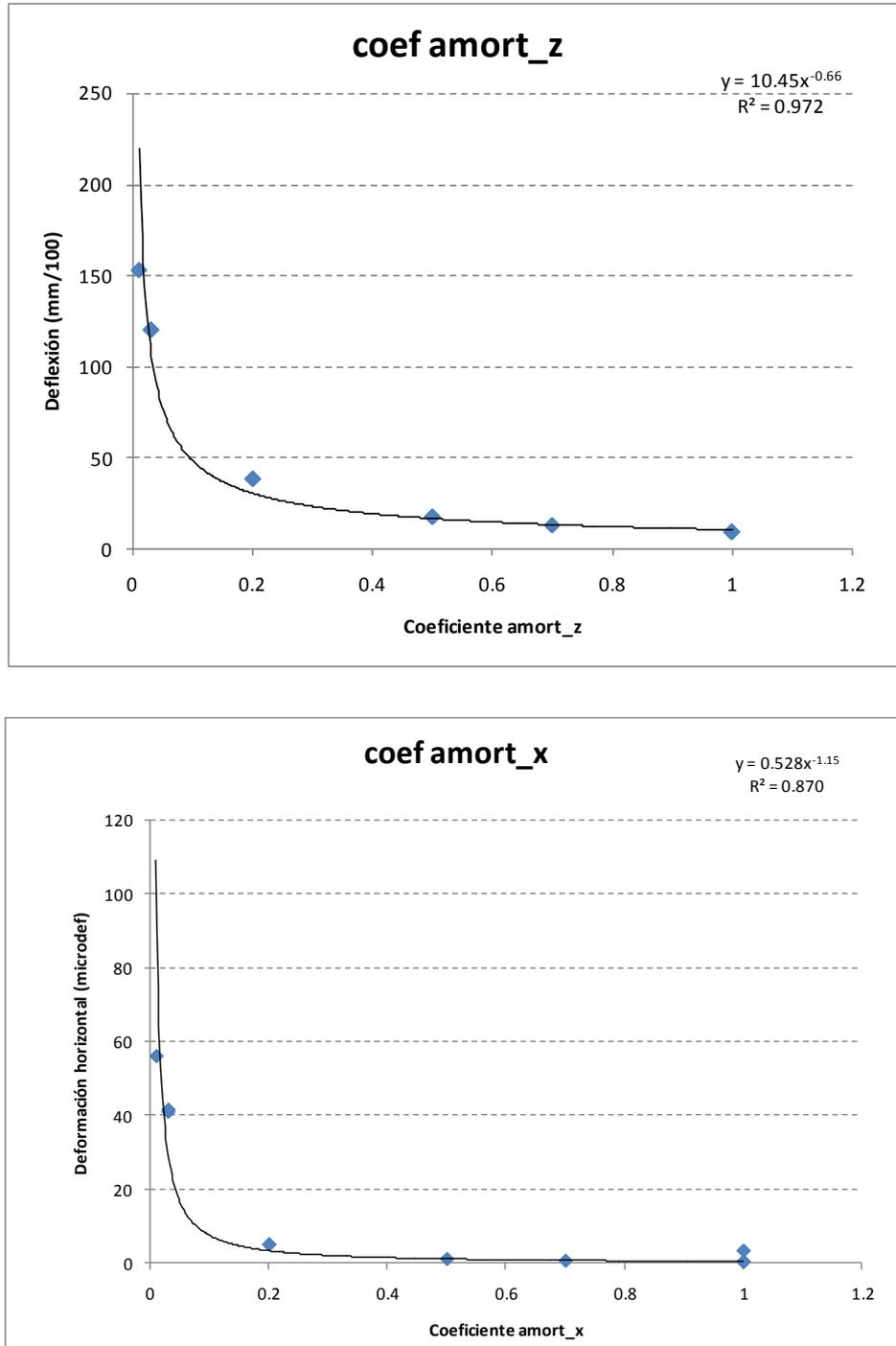
Los resultados obtenidos de la variación de la deflexión y a la deformación horizontal con los coeficientes se presentan en la Figura 5.23.



**Figura 5.23 Variación deflexión y deformación horizontal con los coeficientes de amortiguamiento aplicados independientemente**

A continuación se realiza un estudio del efecto conjunto del valor de los coeficientes cogiendo valores iguales y valores distintos, intercambiando los valores para ver como

afecta a la deflexión y la deformación horizontal. En la Figura 5.24 se presentan las correlaciones encontradas.



**Figura 5.24 Variación deflexión y deformación horizontal con los coeficientes de amortiguamiento aplicados conjuntamente**

No se encuentran correlaciones significativas entre variables cruzadas. No es suficiente con disponer de las correlaciones, es necesario observar la forma de la

curva para cada una de las variables puesto que se introduce un desfase que provoca una variación en la forma de la curva.

#### 5.4.2 Validación de las sub-capas

Se realiza la validación de las sub-capas considerando el dominio mecánico y el dominio térmico. Por una parte se valida el aspecto mecánico, es decir se calculan las tensiones, deformaciones y deflexiones que se producen en las sub-capas al aplicarse una determinada carga sobre la estructura. Por otra parte se valida el aspecto térmico, se comprueba que funciona la modelización de la conducción de calor a través de la sub-capa.

Las sub-capas están formadas por comportamientos mecánicos, térmicos y de amortiguación. Es la base de la capa, las tensiones y deformaciones de la capa son las tensiones y deformaciones de capa una de las sub-capas que la forman.

Las sub-capas que se han modelizado en una primera versión de la librería *FirmesCarreteras* son las siguientes:

Sub capa elástica: Esta sub-capa se encuentra compuesta por los siguientes componentes:

- Un comportamiento inercial.
- Tres comportamientos elásticos, dos en el eje horizontal uno en el vertical.
- Un comportamiento térmico resistivo.
- Un amortiguamiento estructural.

La sub-capa elástica representa un material elástico, con anisotropía horizontal y con variación del módulo de rigidez debido al confinamiento. El peso del material se tiene en cuenta en el comportamiento inercial.

Los módulos de los elementos elásticos de la capa no varían con la temperatura, no se han considerado pero sería sencilla su inclusión.

En cuanto a la variación del módulo con la profundidad se varía el módulo de rigidez ( $G$ ), el de los componentes elásticos del eje horizontal, para simular el confinamiento del material, mientras que el módulo en profundidad, módulo de compresibilidad ( $K$ ) se mantiene constante pero multiplicado por el valor de la anisotropía del material, para tenerla en cuenta. La anisotropía del material es un parámetro que se encuentra almacenado en la clase record de tipo *CapaDatos*.

Los parámetros que deben ser modificados para la simulación de la sub-capa son:

Espesor: indica el espesor de la sub-capa (m).

- posicion\_capa: indica la profundidad dentro de la capa a la que se encuentra (m).
- numero\_subcapa: este parámetro es necesario para realizar un amortiguamiento geométrico cuando está dentro de una capa pero debe estar a cero en caso de usarla de forma independiente.
- DatosCapa: se selecciona el tipo de material.
- DatosHuella: se selecciona el tipo de huella sobre la que se aplica la fuerza.

Para la validación del comportamiento de la sub-capa se utiliza el modelo denominado *Validacion\_Sub\_Capa\_Elastica*.

Está formado por tres modelos que representan materiales con diferente módulo de Young, por lo que varía su módulo de rigidez y su módulo de compresibilidad. La carga se aplica primero únicamente sobre el eje vertical y por último en ambos ejes. Se comparan los resultados obtenidos. Lo que debe suceder es que las deformaciones sean menores para aquellas sub-capas que tenga un mayor módulo de Young (véase Figura 5.25). En este caso la carga aplicada es únicamente vertical.

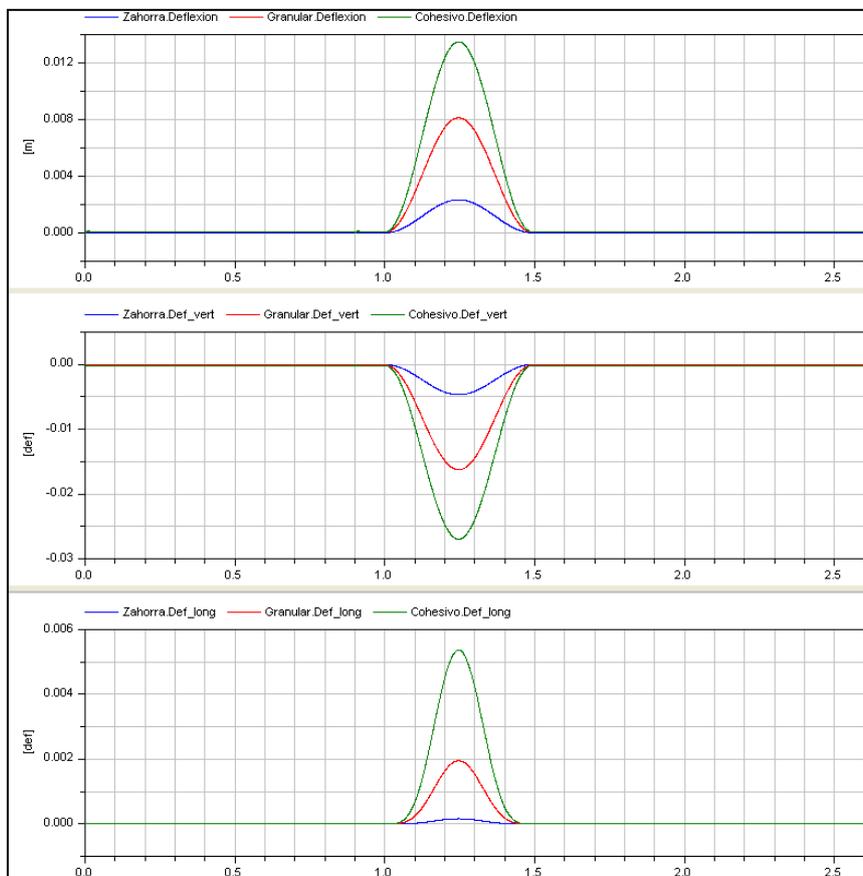


Figura 5.25 Deformaciones producidas en la sub-capa

Como se puede ver en la Figura 5.25 las deformaciones y deflexiones se encuentran ordenadas en función de la calidad del suelo, las zahorras tienen módulos mayores que los granulares y los granulares que los cohesivos. Según los datos simulados en el proyecto.

Se comprueba que se producen las deformaciones de forma coherente: las deflexiones se representan positivas ya que indican el avance en profundidad de la superficie del suelo, y en este sistema de coordenadas hacia abajo es positivo. Las deformaciones verticales son negativas ya que representan una compresión del material y las deformaciones longitudinales son tracciones ya que se aplica una fuerza vertical pura que produce la tracción del comportamiento mecánico longitudinal.

En cuanto a las tensiones verticales y horizontales en la Figura 5.26 se puede observar como las tensiones verticales son positivas, ya que se aplican en sentido positivo del eje z, provocan compresión en el material, y son iguales en todos los casos, salvo una pequeña diferencia porque se considera el peso del material, no se ha eliminado de la sub-capa, por lo que para el material más pesado, la zahorra, la tensión sufrida es mayor. Además no se produce amortiguamiento ya que la tensión sufrida por el paso del vehículo se aplica directamente a la sub-capa.

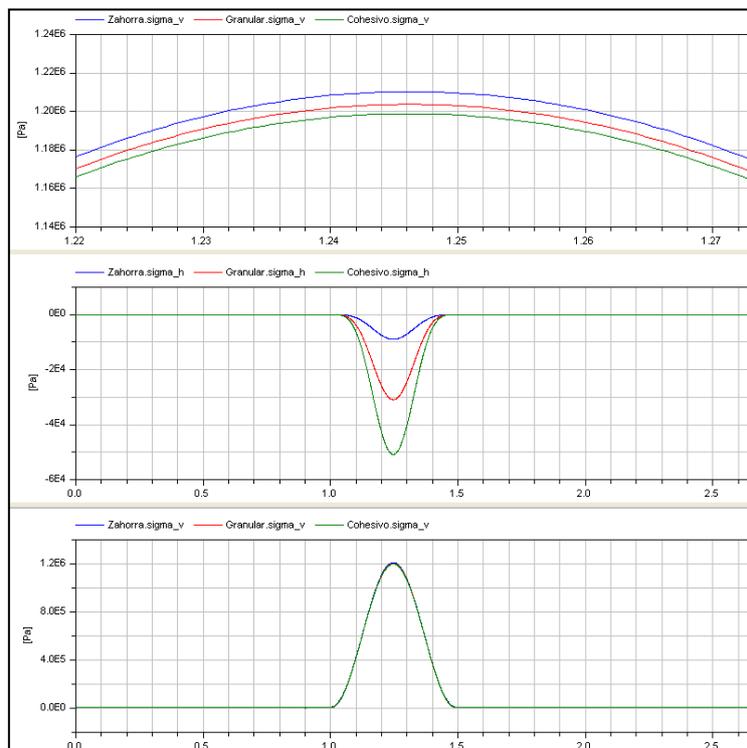


Figura 5.26 Tensiones verticales y horizontales con carga vertical

En cuanto a las tensiones horizontales, de nuevo se encuentra que el comportamiento es el esperado, ya que al no existir fuerza aplicada en el eje horizontal, las tensiones

corresponden con la fuerza que soportan los comportamientos horizontales al aplicarse una fuerza vertical pura, y son negativas porque estiran al material, son tensiones de tracción. Al variar los módulos de rigidez de los suelos se produce de nuevo la ordenación, el suelo con menor módulo de rigidez (cohesivo) sufre mayores tensiones de tracción.

Cuando la carga se aplica en ambos ejes sucede lo que se puede ver en la Figura 5.27. Las deformaciones y deflexiones son iguales en valor pero las deformaciones longitudinales son distintas en valor y en la forma. En valor la diferencia es muy pequeña (del orden de  $70 \mu def$ ) pero en la forma se aprecia una primera compresión del material debido a la propagación de la fuerza en el eje horizontal de izquierda a derecha. Además el valor máximo de tracción se encuentra desplazado temporalmente respecto al valor de la fuerza vertical, debido a que la fuerza horizontal se hace cero y cambia de sentido cuando la fuerza vertical es máxima.

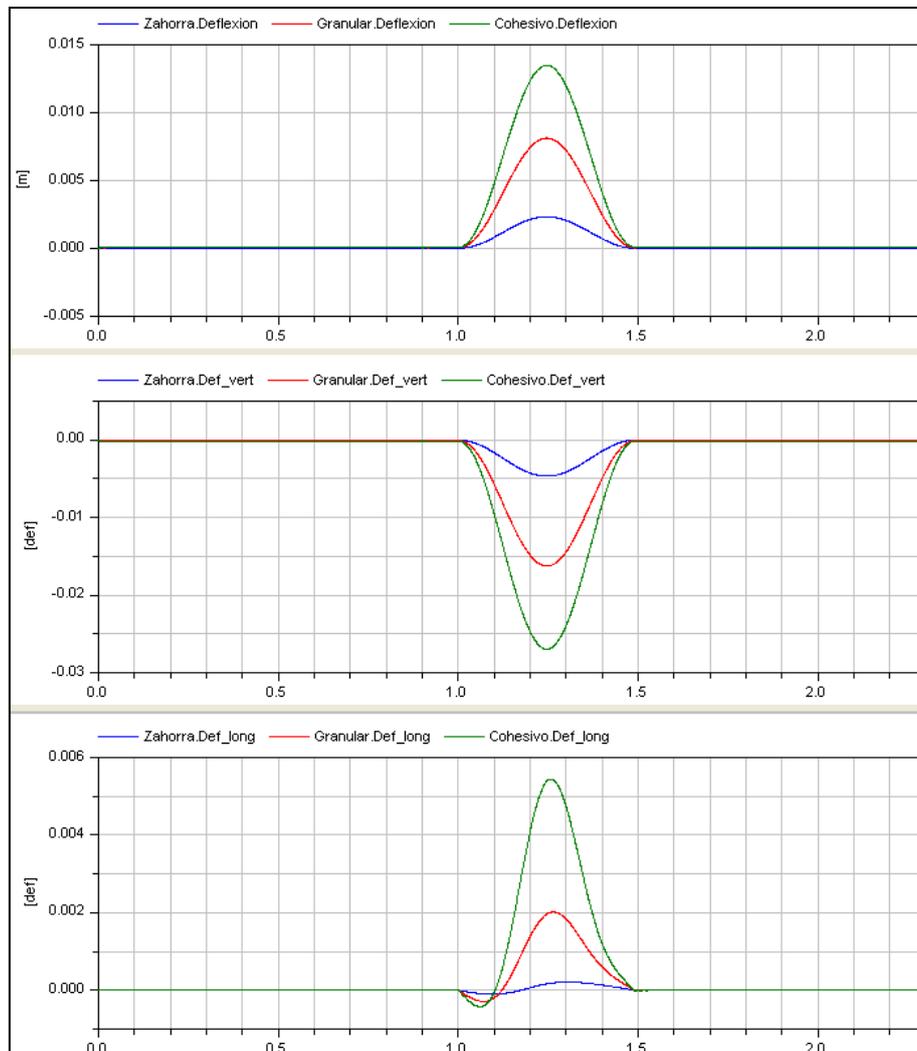
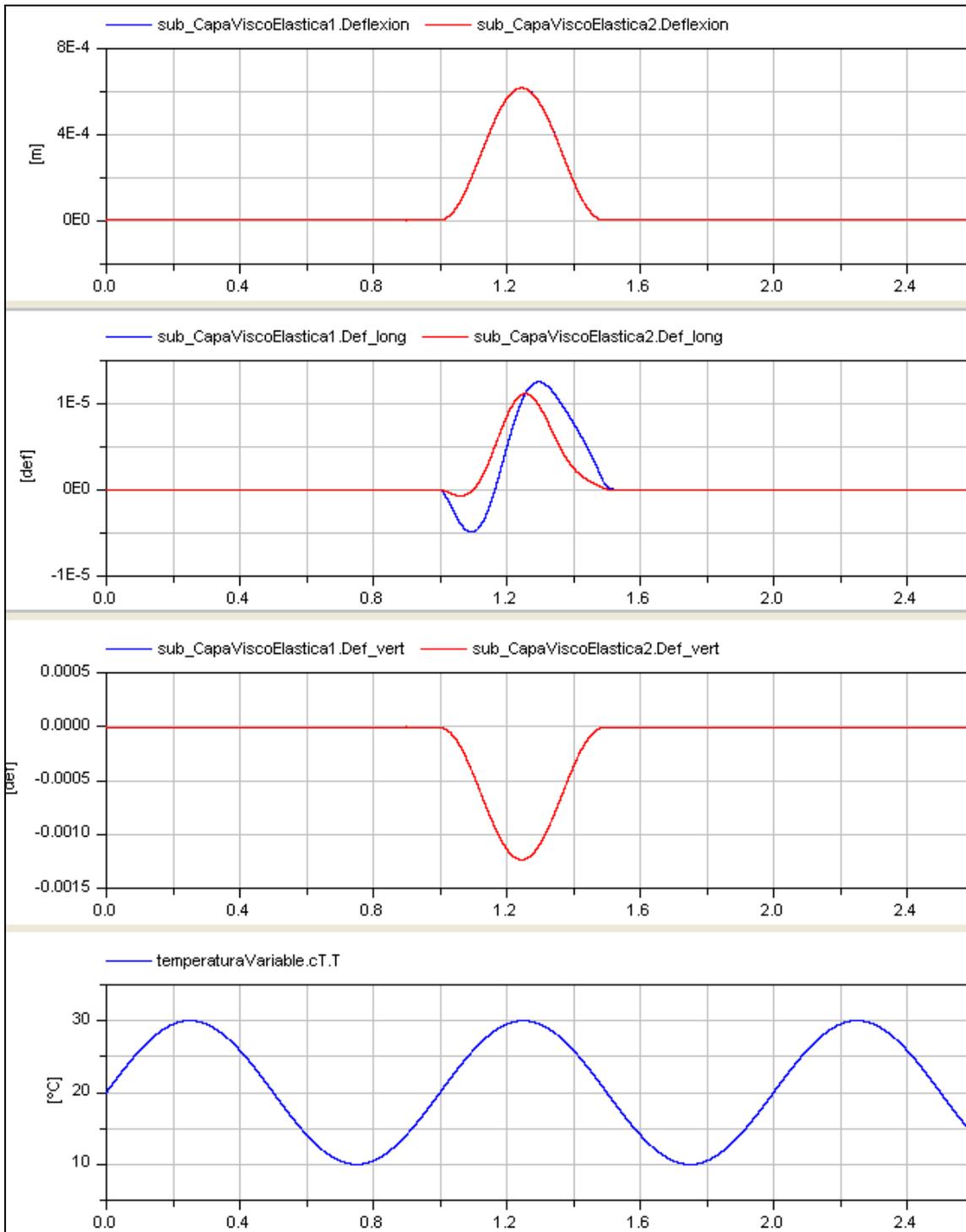


Figura 5.27 Deformaciones producidas al aplicar carga en ambos ejes

Sub capa viscoelástica: Esta sub-capa está compuesta por los siguientes componentes:

- Un comportamiento inercial.
- Tres comportamientos mecánicos, dos en el eje horizontal de tipo visco elástico y uno en el vertical de tipo elástico.
- Un comportamiento térmico resistivo.
- Un amortiguamiento estructural.

La sub-capa viscoelastica se valida mediante *Validacion\_Sub\_Capa\_Viscoelastica*. Este modelo contiene dos modelos en los cuales la única diferencia entre ellos es la variación térmica del modelo de la Figura 5.28 de gráfica roja. Se puede observar el cambio de la deformación horizontal debido a la variación térmica.



**Figura 5.28** Diferencias entre la respuesta en deformaciones horizontales debido a la variación con la temperatura

En la Figura 5.29 se observa la variación de la deformación horizontal con la variación de la velocidad del vehículo. Se aprecia la forma característica de este tipo de curvas, una primera compresión seguido de una tracción.

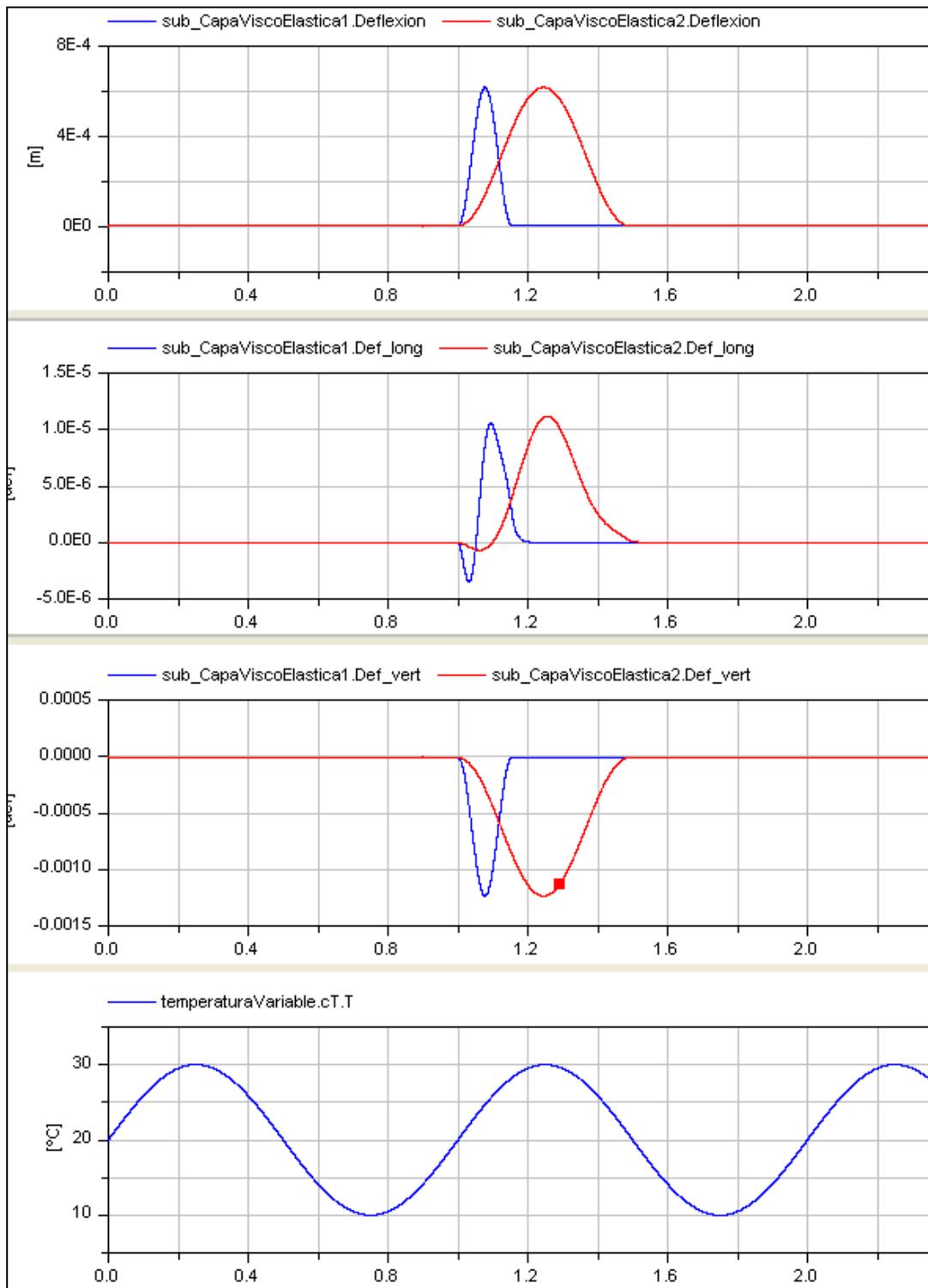


Figura 5.29 Variación de la deformación horizontal debido a la variación de la velocidad del vehículo

La deflexión y la deformación vertical apenas varían, su comportamiento está regido por el modelo elástico.

### 5.4.3 Validación de las capas

En esta primera versión de la librería se implementan dos tipos de capas: una capa elástica y una capa visco-elástica.

Las capas se componen de 6 sub-capas de espesor igual a la sexta parte del espesor de la capa. Se contempla el amortiguamiento geométrico dentro de la capa. Para ello se varía la superficie vertical sobre la que se aplica la carga, de forma que se produzca una disminución de las tensiones conforme se profundice en la capa.

Para poder ajustar este tipo de amortiguamiento, la capa cuenta con un parámetro denominado ángulo. Este parámetro hace referencia al ángulo formado por el borde de la huella y la línea de influencia de la carga sobre la estructura con la profundidad (véase Figura 4.12).

La discretización de las capas se realiza para obtener los valores de deformación y tensión a distintas profundidades dentro de la capa, de forma que se pueda simular la distribución de las mismas.

Las capas contienen los siguientes parámetros:

Espesor: Espesor en metros de la capa que estamos modelizando.

- DatosHuella: Record que contiene los datos de la huella del neumático.
- DatosCapa: Record que contiene los parámetros de los materiales. Se selecciona el material que se quiera simular.
- Suelo: Indica si el material debe tratarse como un suelo, ya que tiene confinamiento y anisotropía o no. True indica que es un suelo false lo contrario.
- Pos: Indica la posición en vertical de la capa dentro de la estructura. En metros desde la superficie.
- Inercia: Indica si se tienen en cuenta los efectos inerciales. (En desuso).
- Capa: Indica si se trata de una capa para aplicar el amortiguamiento geométrico dentro de la capa.
- angulo: Ángulo que sirve para ajustar el amortiguamiento geométrico.
- n: Periodo de muestreo de las variaciones de temperatura en el entorno.

Las capas son estructuras que se ven sometidas a la fuerza de la gravedad pero no se produce desplazamiento debido a la misma, pero sí debe tenerse en cuenta para el cálculo de la tensión de confinamiento inicial debido al peso propio, que provoca variación en el módulo de rigidez de los suelos.

Para solucionar este problema se propone el empleo de un modelo de estructura variable a nivel del componente *elementoInercial*. Una vez que se dispara el evento que provoca el efecto del confinamiento de los suelos, se reinician las variables de estado, posición y velocidades de las masas inerciales, y se elimina la fuerza provocada por el peso, para poder simular unas condiciones iniciales de la estructura en estado de reposo. Esto se puede ver en la Figura 5.30.

```

//*****
//Ecuaciones constitutivas que relacionan las variables de la clase:
//*****
algorithm
  when initial() then
    peso_v := FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Longitud(dy*rho*Sist.gravedad);
  end when;

  when time>0.9 then
    reinit(s, r_ini);
    reinit(v, {0,0});
    peso_v :=0;
  end when;

equation
  cM.s = s;
  if noEvent(Inercia) then
    v = der(s);
    a = der(v);
    cM.F[1]/(S) = rho*dy*(a[1]);
    cM.F[2]/(S) = rho*dy*(a[2]+peso_v/(dy*rho));
  else
    v = {0,0};
    a = {0,0};
    cM.F = {0,0};
  end if;

  a;
end ElementoInercial;

```

Figura 5.30 Eliminación del peso de la estructura al reiniciar las variables de estado

Se verá de nuevo con más detalle en el Capítulo 6.

La **capa elástica** está formada por composición de 6 sub-capas de tipo elástico.

La validación de la capa elástica consiste en la comprobación mediante un programa de tipo multicapa, elástico y lineal, de que las deformaciones y tensiones obtenidas en las diferentes profundidades de las capas tienen un mismo comportamiento y un valor similar. El programa que se va a utilizar es el BISAR. El BISAR está basado en la solución de Burmister al problema de la distribución de tensiones y deformaciones al aplicar una carga sobre la estructura. El problema es que considera la carga estática, mientras que en Modelica se considera dinámica, no considera la masa del suelo y lo considera isótropo.

Pese a todas las hipótesis que difieren entre un programa y el modelo desarrollado con Modelica, puede aportar una idea del correcto funcionamiento de la capa.

Para ello se plantea el siguiente sistema:

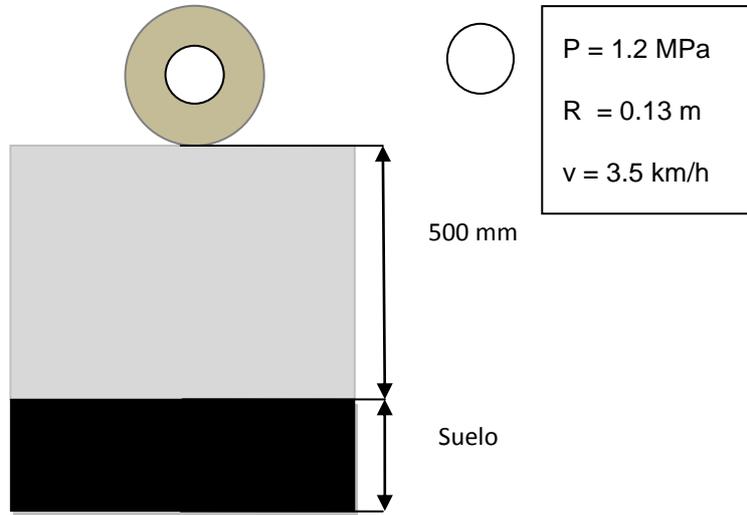


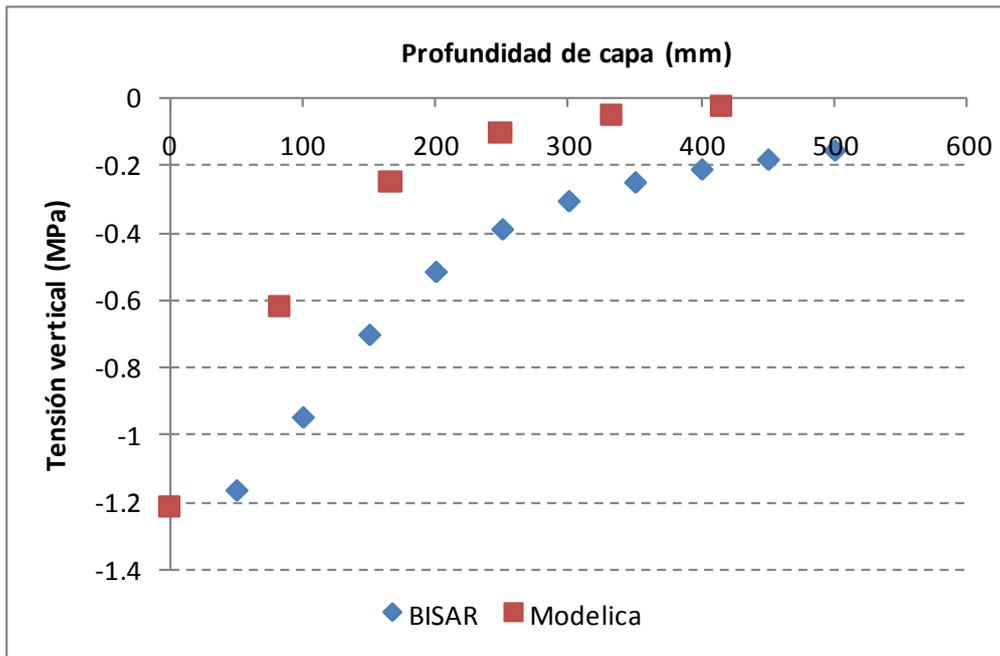
Figura 5.31 Estructura formada por una capa elástica encima de un suelo rígido

En la Figura 5.32 se presentan los resultados obtenidos para las deformaciones, tensiones y deflexiones con Modelica y con BISAR.

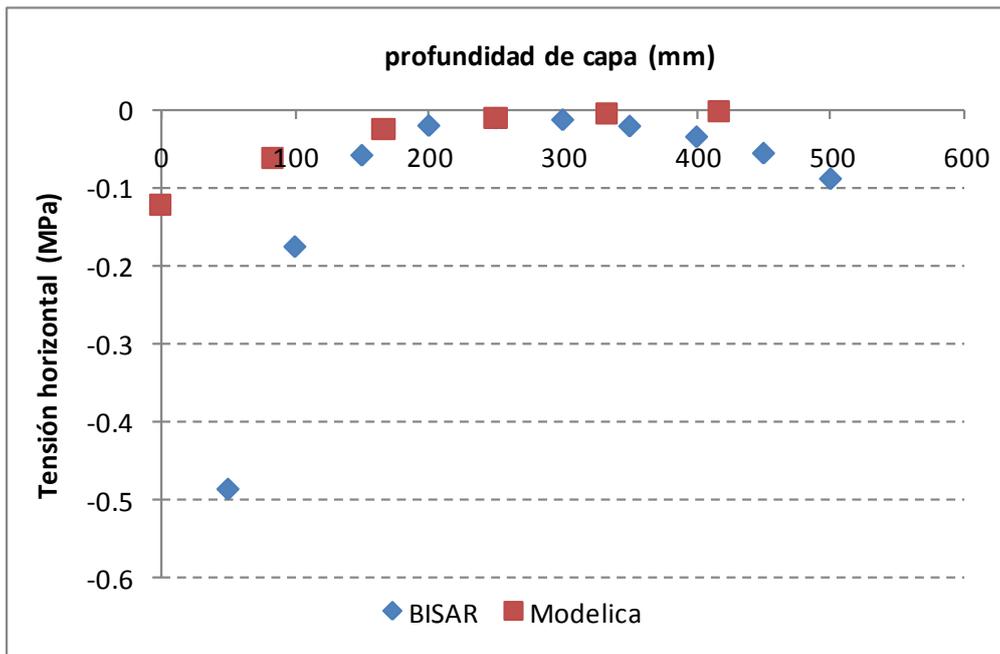
Los parámetros de la capa después de realizar el ajuste del amortiguamiento resultaron:

Amort_x	Amort_z	Angulo
0.03	0.01	9

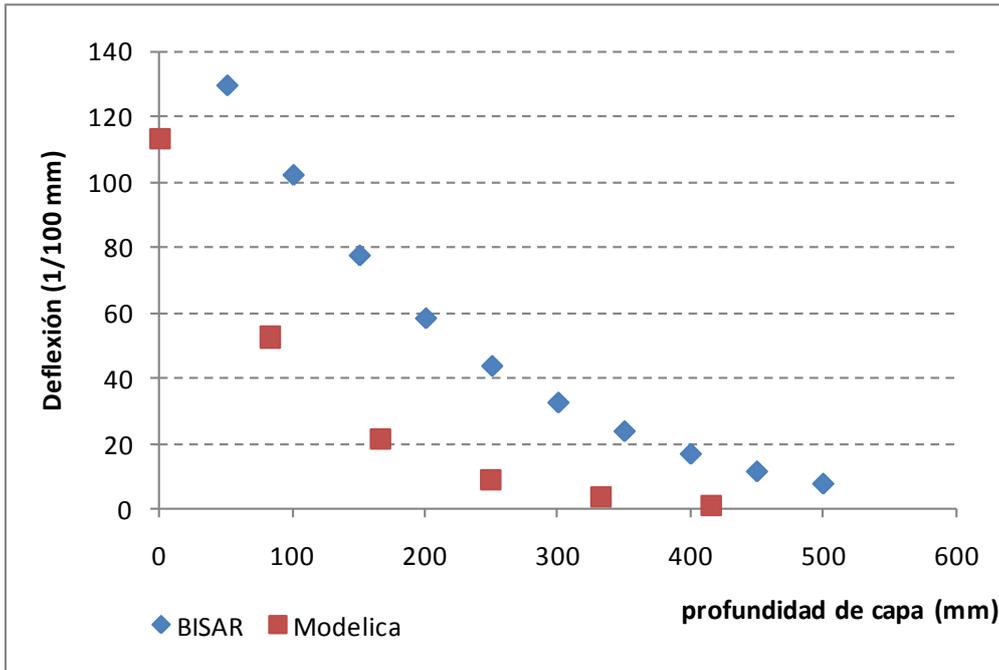
Se puede observar que los puntos de cálculo no son los mismos. Pero si que se advierte un comportamiento similar de las tensiones y deformaciones. La tensión horizontal en BISAR se ha comparado con la tensión vertical por el coeficiente de empuje del suelo en Modelica, ya que la tensión horizontal en Modelica no es comparable a la de BISAR.



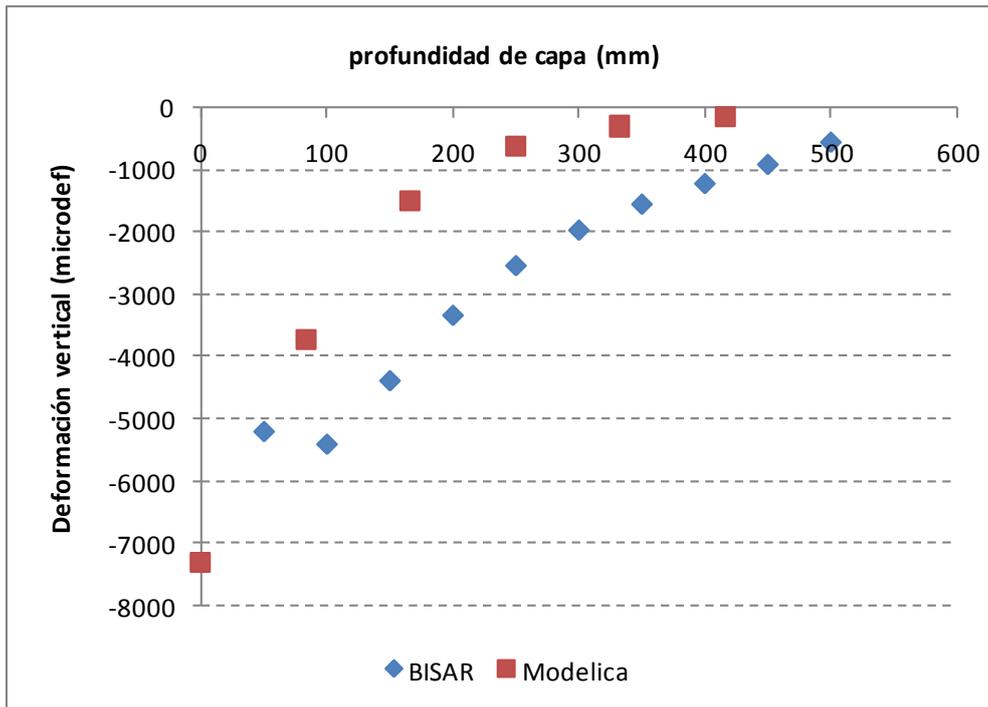
Tensión vertical medida a distintas profundidades dentro de la capa



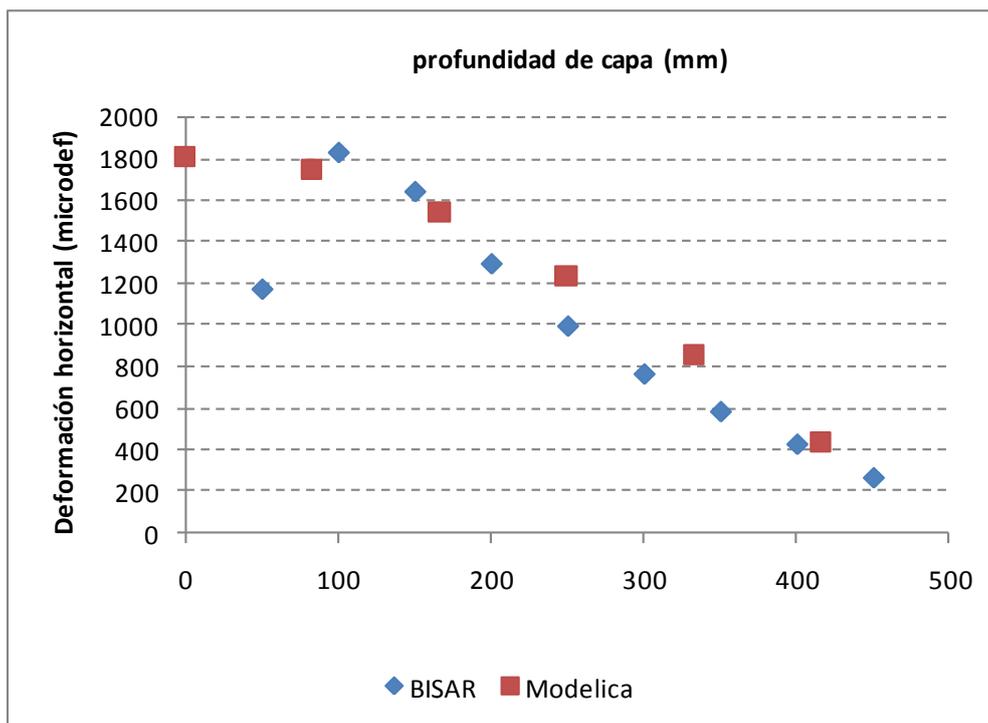
Tensión horizontal medida a distintas profundidades dentro de la capa



*Deflexión medida a distintas profundidades dentro de la capa*



*Deformación vertical medida a distintas profundidades de la capa*



*Deformación horizontal medida a distintas profundidades de la capa*

**Figura 5.32 Resultados del BISAR y de Modelica para la capa elástica**

Por todo lo anterior se considera que la capa elástica presenta el comportamiento esperado.

La **capa viscoelástica** está formada por la composición de 6 sub-capas de ese tipo de comportamiento.

La validación de la capa viscoelástica se realiza mediante el modelo de validación de capa viscoelastica que se encuentra en el paquete de validaciones de estructura. Para tener una idea aproximada del funcionamiento de la capa, debido a que no se ha contado con valores experimentales, se escoge de la bibliografía consultada el artículo "The visco-elastic multilayer program VEROAD" de P. C. Hopman (Hopman, 1996). En este artículo se presentan los principios matemáticos que rigen un programa de cálculo de firmes denominado VEROAD, que tiene en cuenta la viscoelasticidad de la mezcla bituminosa.

En este programa se utiliza un modelo mecánico para simular la viscoelasticidad, el modelo de Burgers. Este se emplea para simular el comportamiento viscoelastico en las direcciones horizontales. En la vertical se supone que el comportamiento de la mezcla es elástico y está regido por el módulo de compresibilidad.

Se realiza una simulación con los parámetros del componente lo más parecido posible a los empleados por Hopman en la validación de las deformaciones longitudinales y transversales. En este caso se compara el resultado con la forma y el valor aproximado de deformación en el fondo de la capa de mezcla bituminosa, en este caso en la sub-capa 6.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. En la Tabla 5.5 se presenta la parametrización del modelo en Modelica, lo más similar posible a las condiciones de Hopman descritas en la Tabla 1 del artículo.

**Tabla 5.5 Características de la carga, el firme y el material**

<b>Velocidad: 5.5 km/h</b>		<b>Presión contacto: 0.70 MPa</b>	
<b>Temperatura: 23 °C</b>		<b>Radio: 158.5 mm</b>	
<b>Esesor capa:</b>	$G = 2837 \text{ MPa}$	$\eta = 71 \text{ MPa}\cdot\text{s}$	
<b>148 mm</b>	$K = 9000 \text{ MPa}$		

Por debajo de la capa de mezcla se sitúa el suelo completamente inmóvil. En el caso de Hopman la mezcla se asienta sobre una capa infinita de suelo.

Se realizó el ajuste de los parámetros hasta obtener la forma de la curva buscada con. Se consigue con los siguientes valores para los parámetros:

Amort_x	Amort_z	Angulo	Desfase
$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$26.6^\circ$	$60^\circ$

En la Figura 5.33 se presenta el resultado de la curva obtenida en el fondo de la capa de mezcla y la curva de Hopman. Hay que tener en cuenta que Hopman calcula la curva en distancia mientras que el modelo Modelica en tiempo. Los valores de deformación máxima son 0.56 mm/m en Modelica y unos 0.25 mm/m Hopman.

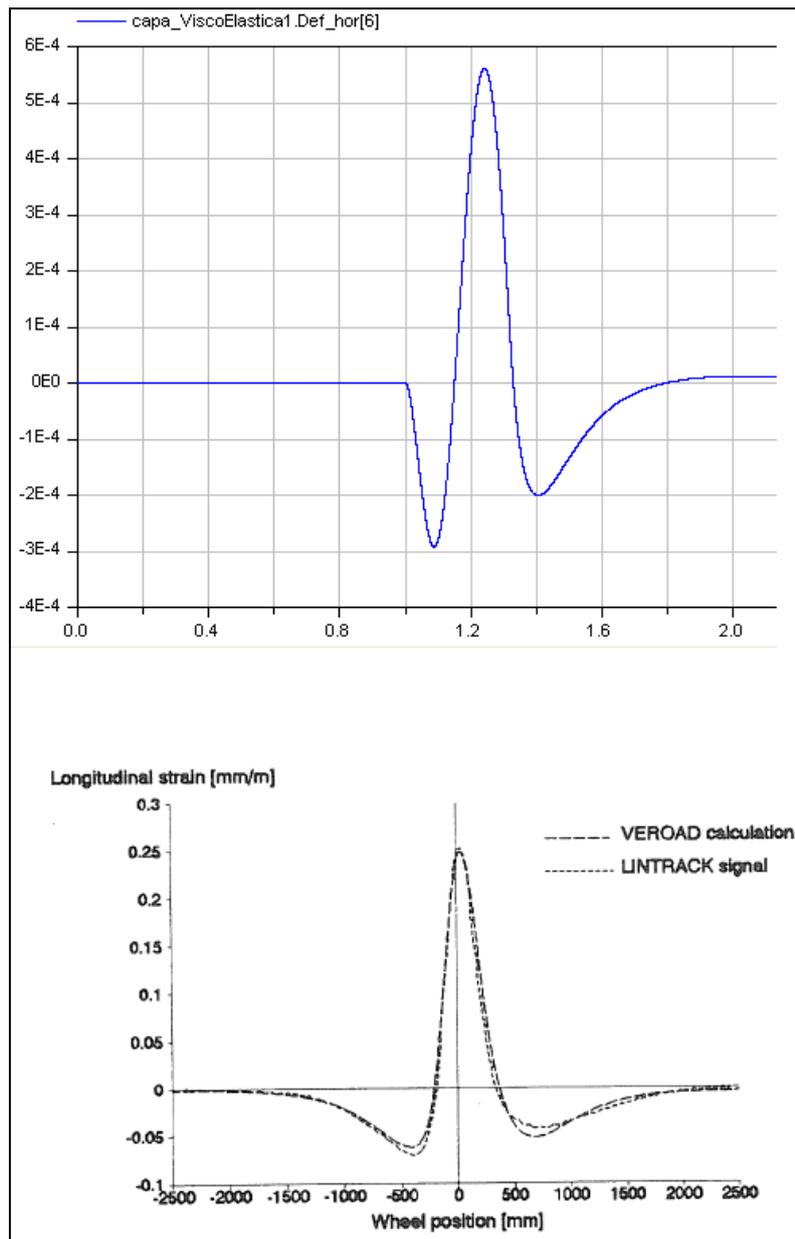
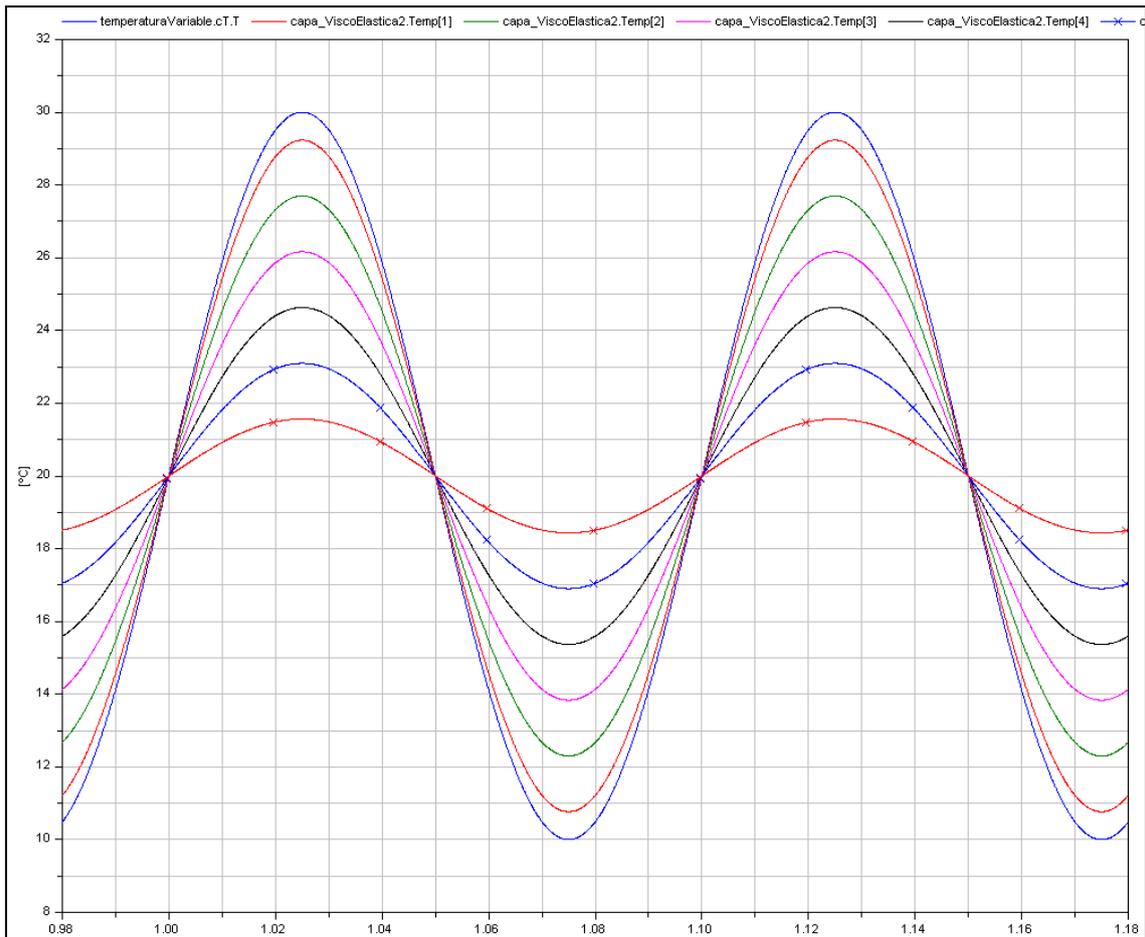


Figura 5.33 Curva de deformación horizontal en Modelica y por VEROAD

Si bien es cierto que no se han establecido las mismas condiciones y se han ajustado los valores del amortiguamiento exclusivamente para tratar de reproducir la curva, el hecho de que sea capaz de simular los efectos de compresión inicial y final y que los valores se encuentren dentro de un orden de magnitud similar, da una idea del buen comportamiento de la capa.

En cuanto a la parte térmica, en la Figura 5.34 se puede observar el perfil de temperaturas dentro de la capa de mezcla. Se observa la inversión térmica que se produce cuando la temperatura del aire baja por debajo de la temperatura fija del suelo.



**Figura 5.34** Temperaturas a distintas profundidades dentro de la mezcla bituminosa

Las tensiones y deformaciones verticales presentan un comportamiento normal con la profundidad de la capa. Los tiempos de simulación son de unos 3 o 4 segundos, y las condiciones de intervalo de integración y tolerancia son de 50.000 y  $10^{-6}$  respectivamente.

## 5.5 Validaciones del entorno

La validación del entorno se realiza desde el punto de vista tanto mecánico como térmico. Es importante el correcto funcionamiento de estos elementos ya que establecen las condiciones de contorno en el proceso de simulación del modelo, establecen el comportamiento del modelo en sus límites mecánicos y térmicos.

### 5.5.1 Validación del entorno mecánico

En la parte mecánica se realiza una comprobación del comportamiento esperado de los elementos modelados, es decir que no permitan el movimiento de una masa si esta se encuentra conectada directamente a ellos.

Para ello se realiza el siguiente modelo de validación que se puede ver en la Figura 5.35. Se conecta un elemento de masa al modelo de la carga y a las clases que modelizan el comportamiento de los suelos y las paredes. Para la clase *SueloCoordenadas* se introduce un elemento resistivo térmico que representa el mecanismo de conducción del calor a través de un material, y este a su vez se encuentra conectado a una fuente de temperatura variable para simular las variaciones de la temperatura en el elemento resistivo. No se tiene en cuenta la dinámica de la conducción del calor, se considera que los cambios son instantáneos.

Los parámetros de los suelos y las paredes son los mismos:

- posicion\_z: Valor de la posición en el eje z con respecto al sistema de coordenadas global.
- posicion\_x: Valor de la posición en el eje x con respecto al sistema de coordenadas global.

En el caso del *SueloCoordenadas* se tienen además los siguientes:

- Tfija: Temperatura fija en el suelo.
- dz: Espesor del elemento de resistencia térmica. Sirve para fijar una temperatura constante en el suelo y a la profundidad deseada.
- DatosHuella: Permite el cálculo de la superficie de la huella para limitar el volumen de suelo que representa.
- DatosCapa: Para obtener los valores necesarios para modelar la conducción de calor.

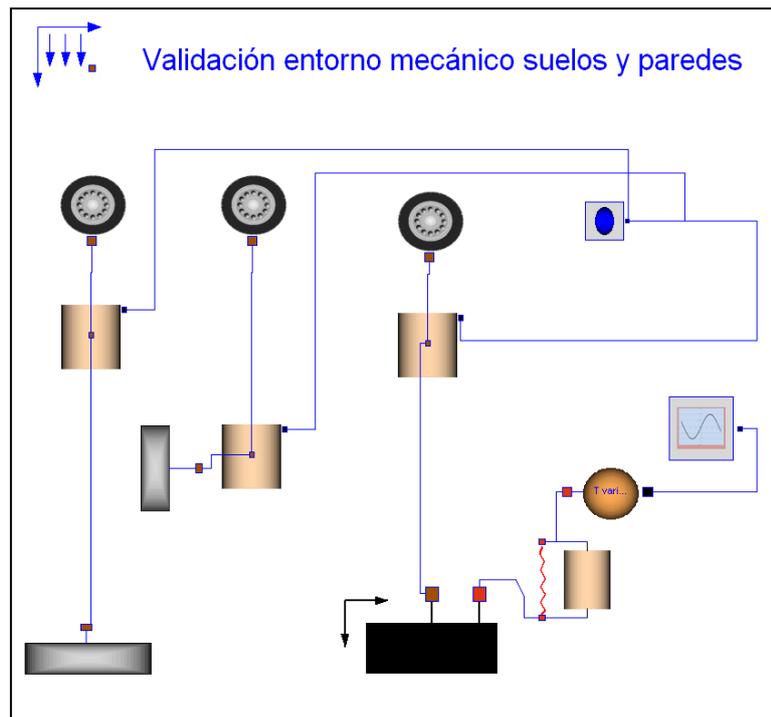


Figura 5.35 Validación del entorno mecánico de los suelos

Después de modelar el sistema durante 3 segundos se comprueba que las componentes de la posición correspondientes al comportamiento inercial han permanecido constantes. Debe funcionar de este modo ya que la única forma que tiene la masa de moverse es a través de los comportamientos mecánicos; al conectarla directamente al suelo o a la pared se queda bloqueada en ambas direcciones.

Por otra parte se comprueba, en el caso del suelo con la temperatura incorporada, que al variar la temperatura externa, los valores de las temperaturas del elemento térmico resistivo y de la superficie del suelo varían (véase Figura 5.36). La única que no varía es la temperatura de referencia que representa el fondo del suelo y que es un valor constante.

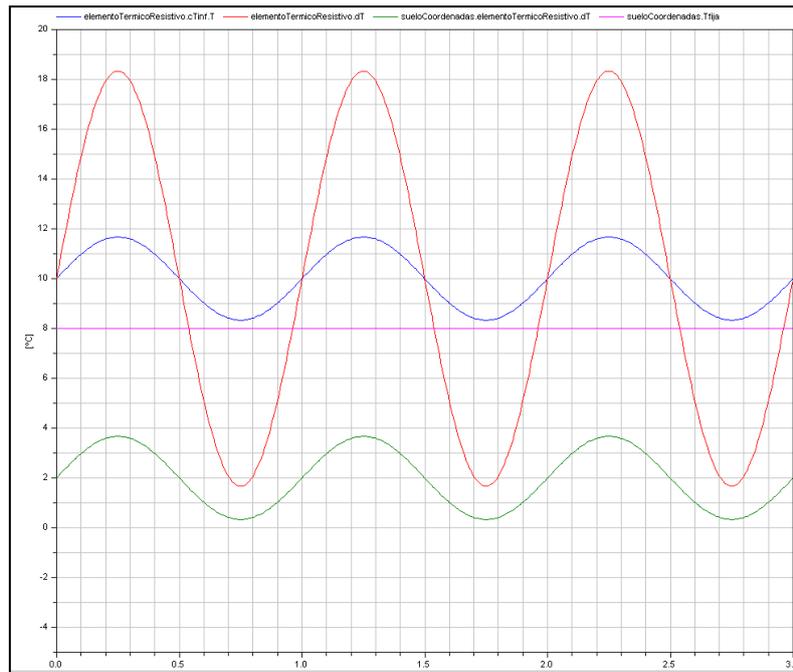


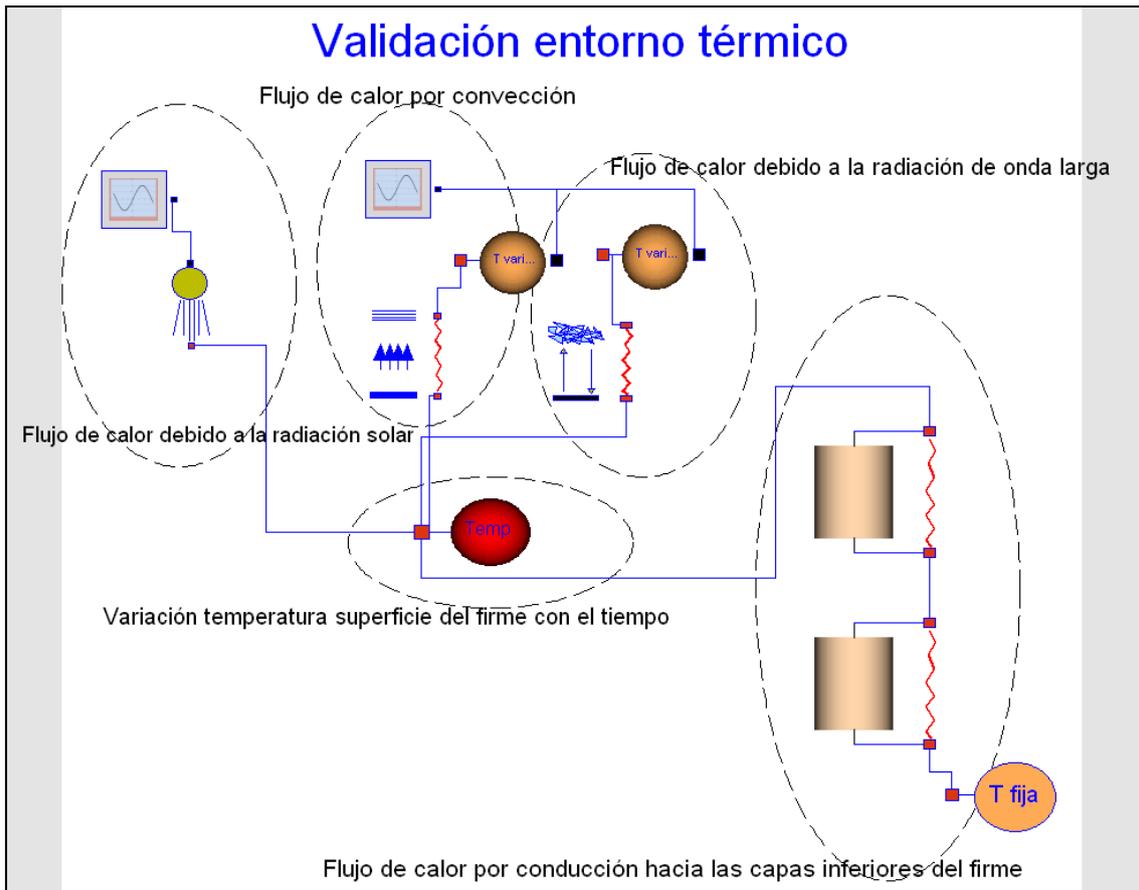
Figura 5.36 Variación de la temperatura

### 5.5.2 Validación del entorno térmico

La validación del entorno térmico consiste en la obtención de la variación de la temperatura en la superficie del firme debido a las distintas fuentes de transferencia de calor modeladas.

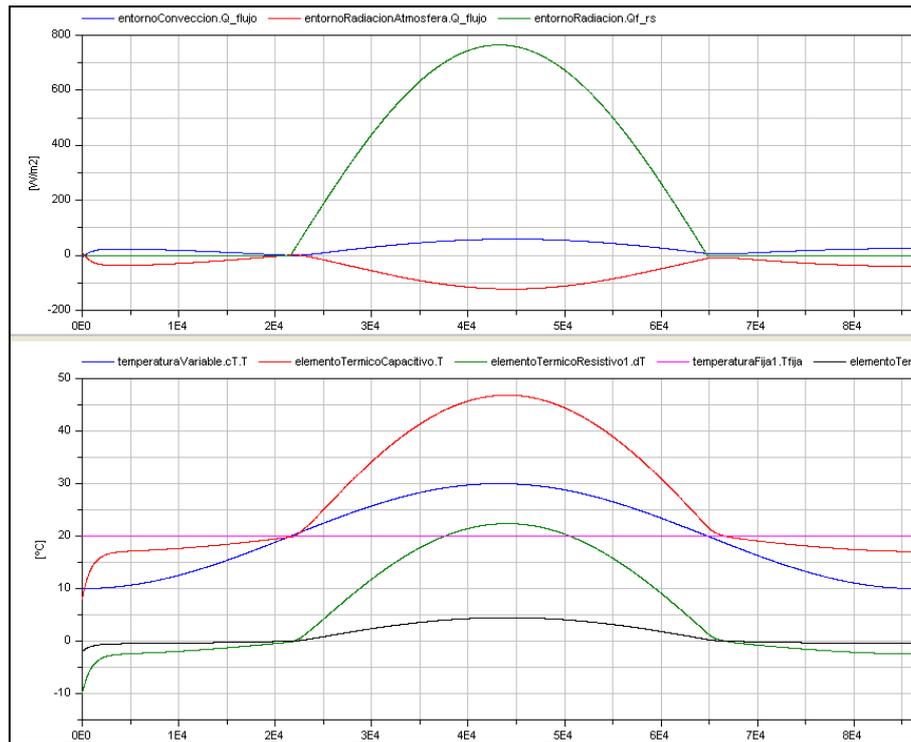
Para poder simular las temperaturas a través de la ecuación de balance energético en la superficie del firme, se tienen que introducir como datos de contorno la radiación solar y la temperatura del aire. Lo que se propone es una simulación de ambas variables a lo largo de un día como si se trataran de ondas senoidales. Para ello, en el caso de la temperatura del aire, se emplean las fuentes senoidales y una clase denominada *TemperaturaVariable* que lo que hace es modificar la onda senoidal para que la variación térmica se establezca entre dos temperaturas predefinidas.

La validación de los componentes explicados se realiza a través del modelo denominado *Validacion\_Entorno\_Termico* que se encuentra dentro del grupo de *Val\_Entorno* (véase Figura 5.37).



**Figura 5.37 Validación de la resolución de la ecuación de balance energético en la superficie del firme**

Se tienen en cuenta todas las contribuciones de flujo de calor a la superficie del firme. La simulación se realiza durante 86400s para representar un día entero y se presentan los resultados en la Figura 5.38



**Figura 5.38 Simulación de la variación diaria de temperatura en la superficie del firme y en su interior**

En la Figura 5.38 se puede observar los flujos de calor intercambiados entre el entorno y la superficie del firme. Cuando las temperaturas del firme (rojo) son mayores que la del aire (azul) se observa como el flujo de calor entre la atmósfera y la superficie tiene signo negativo, lo que indica que la superficie del firme pierde calor que emite a la atmósfera.

El resultado es el esperado, ya que la temperatura en la superficie del firme es mayor que la temperatura del aire. Lo más complicado en la simulación de la variación térmica de la superficie es la modelización a través de funciones senoidales de la variación diaria de temperatura ya que ello supone una simplificación de la forma de variación de la temperatura del aire (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013). Lo mismo sucede con la variación de la radiación y esta supone la mayor contribución a la temperatura en la superficie del firme.

En la Tabla 5.6 se detallan los resultados de las  $T^a$  máximas obtenidas cuando las condiciones de contorno se fijan en una variación térmica senoidal entre 20 y 10°C a una profundidad de 7 cm desde la superficie y una variación de la temperatura del aire entre 30 y 10°C y una variación en la radiación solar con un valor máximo de 900 W/m<sup>2</sup>. Las medidas se toman en la superficie y a 2.5 cm de profundidad (mitad del espesor del primer elemento resistivo del modelo).

Tabla 5.6 Temperaturas máximas de obtenidas en la simulación

T aire	T superficie	T a 2.5 cm	T a 7 cm
30 °C	49.6 °C	21.2 °C	8.5 °C

Valores similares a los obtenidos en (Cadavid Jáuregui y Pérez Ayuso, 2013) para la superficie del firme cuando las temperaturas del aire se encuentran en torno a 30 °C.

## 5.6 Conclusiones

La validación de los modelos para la simulación de las cargas de tráfico provocadas por el paso de los vehículos por la carretera arroja las conclusiones que se comentan a continuación.

La librería *FirmesCarreteras* presenta dos tipos de métodos para simular la carga de los vehículos. Estos dos métodos son equivalentes pero presentan una serie de diferencias a la hora de su parametrización.

El método 1 contiene un mayor número de elementos y parámetros a tener en cuenta y el cálculo de la frecuencia de aplicación de la carga lo debe realizar el usuario. Una ventaja es que permite la aplicación de cargas distintas a la tipo sinusoidal con lo que se puede utilizar para estudios más detallados o donde la carga requerida presente otra estructura.

El método 2 es más compacto, utiliza pocos parámetros para la modelización de la carga, lo cual resulta útil en la creación de modelos sencillos y facilidad en la variación de los parámetros durante la etapa de simulación. Pero presenta el inconveniente que solo se pueden aplicar cargas de tipo sinusoidal.

Con ninguno de estos métodos se modela el efecto de la variación de la carga aplicada con la velocidad. El efecto de la simulación del paso de varios vehículos se consigue siempre con la misma separación en el tiempo, que depende de la velocidad, y carga.

Por otra parte, en la validación del comportamiento de estos métodos se hacen presentes dos limitaciones del modelado importantes que deben ser tenidas en cuenta a la hora de crear modelos de respuesta utilizando esta librería.

La primera de ellas es que la carga aplicada difiere entre vehículos simulados para la misma velocidad al aumentar, esta cuando el intervalo de integración que se utiliza es de 500. Conforme aumenta la velocidad aumenta la frecuencia de aplicación de la carga y la función sinusoidal no se reproduce con exactitud ya que los valores de cambio de la función son más pequeños que el paso de integración. La relación entre la diferencia de carga encontrada con respecto a la velocidad sigue una función potencial de grado mayor a 2. A partir de 30 km/h los errores cometidos son considerables para este intervalo de integración. Para un intervalo igual a 5000, se reproducen perfectamente las ondas sinusoidales de frecuencias comprendidas entre los 0.1 Hz y los 30 Hz, por lo que hay que tenerlo en cuenta a la hora de simular velocidades altas.

La segunda limitación consiste se encuentra cuando se programa la carga para que se aplique exclusivamente en el eje horizontal, es decir sea cero en el vertical, la carga aplicada sobre el eje horizontal presenta una doble onda, como si hubieran pasado dos vehículos completamente pegados.

Sobre el eje vertical la carga aplicada es siempre positiva.

La validación de los comportamientos mecánicos contemplados dentro de la librería *FirmesCarreteras* corresponden con: el comportamiento inercial, el comportamiento elástico y el viscoelástico.

Se comprueba que el comportamiento inercial se desplaza en ambos ejes según el resultado teórico esperado y el sistema de coordenadas escogido.

En cuanto al comportamiento elástico, las diferencias en el comportamiento de este componente debidas a la consideración o no de los efectos provocados por la masa, no parecen ser significativas en el caso de la simulación realizada variando el módulo elástico del material. Sin embargo al variar la carga y mantener fijo el módulo, los errores cometidos por el modelo que considera la masa son menores, aunque se van acercando conforme aumenta la carga aplicada.

El comportamiento viscoelástico se modela a través del modelo de Kelvin-Voight. Para la estimación de sus parámetros se utiliza el módulo complejo o dinámico de la mezcla. Además se modeliza la dependencia del módulo dinámico con la temperatura y frecuencia de carga a partir del principio de superposición tiempo-temperatura.

Se presenta el problema del reinicio en todos los modelos con comportamiento inercial. Esto se debe a que en el tiempo 0.9 s. se realiza un reinicio de las variables de estado, posiciones y velocidades de la masa, para evitar el efecto del peso en la estructura, ya que el punto de partida inicial del sistema no se encuentra en reposo al

considerar el peso, lo que provoca deformaciones iniciales. Para evitar este problema se reinician las variables de estado del sistema.

Las sub-capas funcionan correctamente, presentando el comportamiento esperado al igual que sucede con las capas. Las capas se comprueban mediante datos de la bibliografía y la utilización de un programa de cálculo de la respuesta del firme validado denominado BISAR. Si bien hay que apuntar que las condiciones del problema no se pueden considerar equivalentes ya que cada método tiene sus hipótesis y simplificaciones. No obstante la comprobación parece indicar que las capas presentan buen comportamiento.

En cuanto al entorno, se validan los componentes mecánicos y térmicos. Los componentes térmicos presentan el inconveniente de la necesidad de simular datos para radiación y temperatura que tengan un comportamiento más realista que el que se consigue en esta librería.



# Capítulo 6 Simulación de la respuesta estructural de un firme

## 6.1 Introducción

En este capítulo se recogen los aspectos y consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de construir un modelo de respuesta de firmes con la librería *FirmesCarreteras*.

Se plantea un sistema a modelar y se construye el modelo con los componentes de la librería, estableciendo sus parámetros y todas las condiciones de contorno necesarias para su correcto funcionamiento.

Se contrastan los resultados obtenidos mediante otro programa de respuesta de firmes denominado BISAR.

## 6.2 Sistema físico planteado

El sistema físico planteado es el de la Figura 6.1. Se trata de un sistema formado por una carga, una estructura de tres capas y un suelo de apoyo.

La primera capa de la estructura presenta un comportamiento viscoelástico mientras que las otras dos capas representan un material granular y un material cohesivo ambos con comportamiento elástico pero distinto módulo de Young.

Por los espesores y el tipo de materiales utilizados este firme se clasifica como firme flexible (capa bituminosa de menos de 15 cm apoyada sobre materiales granulares).



Figura 6.1 Modelo de simulación de una estructura de firme

Este sistema se encuentra modelizado en la librería con el nombre *CasoPistaEnsayo* dentro del grupo de casos de estudio que contiene el paquete de ejemplos.

Las características de la carga, la geometría y los materiales se presentan a continuación:

**Carga:**

Presión (MPa)	Radio (cm)	Velocidad (3.5 km/h)
1.2	13	3.5

**Geometría:**

Espesor mezcla bituminosa	Posición capa mezcla bituminosa	Espesor suelo granular	Posición suelo granular	Espesor suelo cohesivo	Posición suelo cohesivo	Posición suelo
12 cm	0 cm	50 cm	12 cm	50 cm	62 cm	{0, 1.12}

**Materiales utilizados:**

Mezcla bituminosa (MB)	Suelo granular (SG)	Suelo cohesivo (SC)
E = 6000 MPa	E = 120 MPa	E = 60 MPa

Para establecer las condiciones de carga, geometría y materiales se parametrizan cada uno de los modelos que componen el sistema. La carga se define en el componente que la modela. Los parámetros del tipo de carga se establecen a través de la selección de un tipo de Huella. Este tipo de Huella seleccionado debe ser el mismo que para el resto de los componentes mecánicos del sistema, las capas y el suelo.

Si se modifica el valor de la presión de la Huella en el componente Carga, no será necesaria variarla en los demás componentes.

Sin embargo, si se modifica el valor del radio de la Huella, este debe ser modificado en los modelos de las Capas y el Suelo ya que la superficie se emplea para el cálculo de las tensiones y cada modelo la calcula a partir del valor del parámetro de la Huella que tenga seleccionada.

**6.2.1 Condiciones de contorno**

Las condiciones de contorno mecánico se establecen a través de la definición de la posición de las capas dentro de la estructura y de su espesor y de la posición del suelo. Es muy importante, por tanto, definir correctamente las posiciones iniciales de cada una de las capas dentro del modelo, a través del parámetro pos. Lo mismo sucede con el apoyo, el suelo. El suelo debe colocarse en la vertical de la carga (es decir eje  $x = 0$ ) y a la profundidad total de la estructura ( $z = 1.12$ ).

Hay que tener en cuenta que si durante la simulación se varían los espesores o posiciones de las capas debe variarse la geometría completa del sistema si no se producirán errores ya que no se iniciará correctamente el modelo.

La definición de los datos de posición de cada una de la capas permite establecer los valores iniciales de la posición de las masas y del resto de subcomponentes de las capas. Esto es necesario ya que las variables de estado escogidas son las velocidades y posiciones de las masas.

Las condiciones de contorno térmico se establecen a partir de una temperatura fija en la superficie y otra en el suelo de la estructura, definiendo la profundidad a la que se quiere fijar la temperatura y el valor de la misma (véase Figura 6.2).

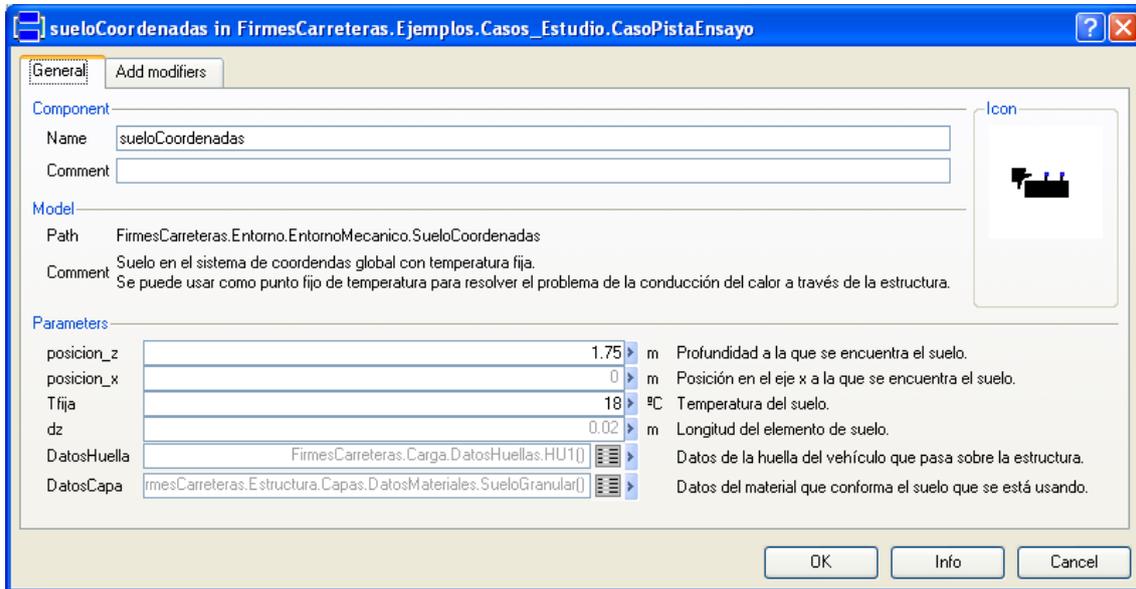


Figura 6.2 Parámetros del suelo

### 6.2.2 Condiciones del entorno

Siempre que un modelo se componga de componentes que no tengan incorporada la clase sistema de coordenadas global, será necesario que se introduzca el elemento *SistemaCoordenadas* con el nombre *Sist* y con la propiedad *inner*, ya que este sistema de coordenadas es el sistema global que rige el movimiento de las masas y sirve de referencia al contorno y la estructura del modelo.

Hay que establecer las condiciones del entorno a través de una temperatura fija o variable para la capa inicial de la estructura, en este caso es fija, y para el suelo sobre el que apoya la misma. Estas condiciones junto con las propiedades térmicas de los materiales de cada una de las capas definirán el perfil de temperaturas que se establecerá dentro de la estructura.

### 6.2.3 Parametrización del modelo

El modelo necesita una serie de parámetros que tienen que ver con las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales que conforman las capas. Estos parámetros se encuentran agrupados, en función del material, en las clases record de tipo *CapaDatos*. Las propiedades mecánicas que se utilizan en el modelo son:

En el caso de la mezcla bituminosa:

- El módulo dinámico de la mezcla ( $E^*$ ) y su curva maestra, junto con el valor del desfase ( $\delta$ ).
- El módulo de Young de la mezcla ( $E$ ).
- El coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Para los suelos y materiales granulares:

- El módulo de Young ( $E$ ).
- El coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).
- El coeficiente de anisotropía del material.
- El coeficiente de empuje en reposo ( $K_0$ ) del material.
- El coeficiente ( $k_2$ ) que tiene que ver con el índice de poros debido a la fórmula empleada para la variación del módulo de rigidez con el confinamiento.

En cuanto a los parámetros térmicos, se emplean los siguientes para cada material:

- El calor específico del material ( $C_p$ ).
- La conductividad térmica del material ( $k$ ).

## 6.3 Simulación de la respuesta del modelo

Para la correcta simulación del modelo hay que tener en cuenta los siguientes aspectos.

### 6.3.1 Problema del reinicio

La carga siempre debe aplicarse a partir de la condición que el tiempo sea igual a 1s. Esto se debe a que, para poder tener en cuenta el peso de la estructura en el cálculo del confinamiento del módulo de rigidez de los suelos, es necesario que al principio de la simulación se produzca un evento, que sucede a partir del tiempo  $> 0.5s$ , para obtener el valor del módulo de rigidez de los comportamientos elásticos, en función del peso propio de la estructura.

Una vez que se ha tenido en cuenta este factor, se reinician las variables de estado, posiciones y velocidades de las masas, a sus valores iniciales y se hace cero el valor del peso del material, dejando al sistema de muelles y amortiguadores con el estado que alcanzaron debido al peso de la estructura, como estado de equilibrio inicial en el cálculo de las deformaciones y tensiones.

Esta reinicialización del modelo sucede en el tiempo igual a 0.9s, antes de que la carga sea aplicada y después de tener en consideración el peso.

Se ha hecho uso de la capacidad de Modelica para crear modelos de estructura variable durante la simulación. Esto es muy útil en este tipo de comportamientos.

Si se simula el modelo desde el tiempo igual a 0s hasta 4s se puede observar este efecto (véase Figura 6.3)

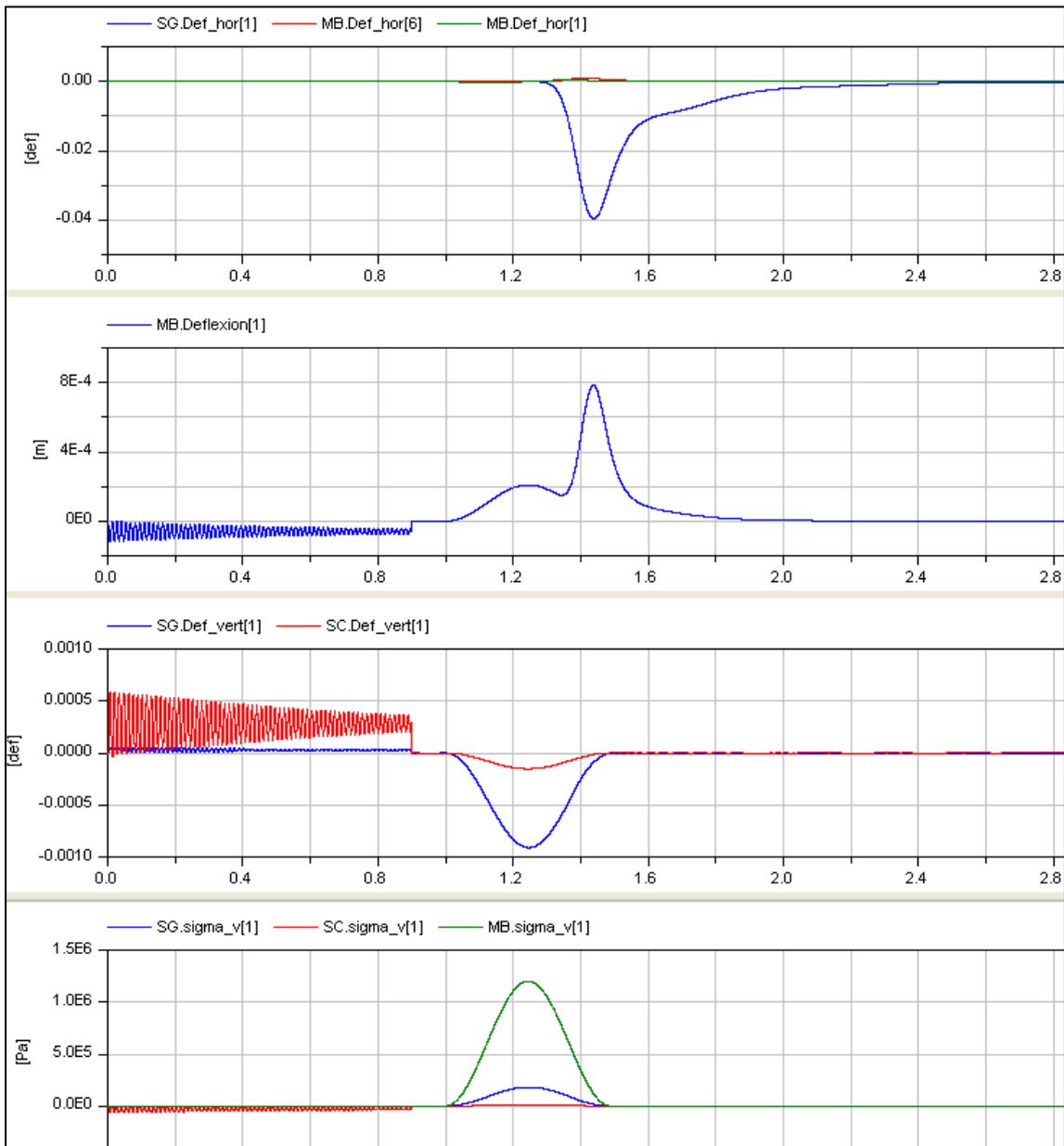


Figura 6.3 Efecto de la reinicialización de las variables

### 6.3.2 Condiciones de simulación

Para la simulación del modelo se han seleccionado las siguientes condiciones (véase Figura 6.4):

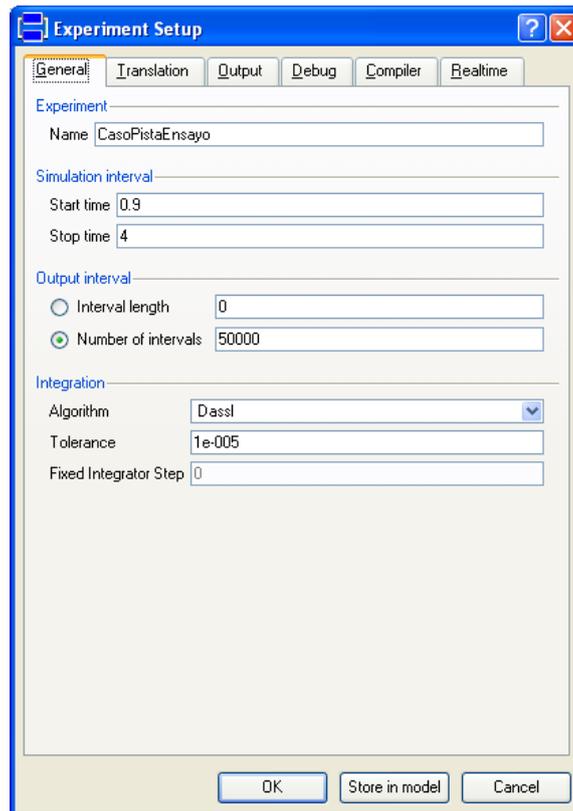


Figura 6.4 Condiciones de simulación

El número de intervalos de integración debe ser suficientemente elevado como para poder simular velocidades mayores a 30 km/h. Para evitar la representación del efecto del reinicio se establece el tiempo de comienzo de la simulación en 0.9s.

### 6.3.3 Ajuste de los parámetros del modelo

Los parámetros de ajuste del modelo que se han considerado en este caso son los coeficientes de ajuste del amortiguamiento estructural y el ángulo de ajuste del amortiguamiento geométrico.

El ajuste de la respuesta se inicia con la variación de los coeficientes de ajuste del amortiguamiento estructural. El objetivo es conseguir curvas con curvas semejantes a las obtenidas en la realidad. Se realiza una comparación sintáctica para evaluar si las curvas presentan formas similares a las reales.

Una vez que se obtiene la forma de la curva se procede al ajuste del amortiguamiento geométrico de cada capa. En este caso mediante la variación del parámetro ángulo. El objetivo de este ajuste es ajustar la distribución de tensiones verticales a las reales. En el caso de este proyecto se tratan de ajustar a la distribución de tensiones verticales obtenida mediante el programa BISAR.

Las deformaciones se ajustan a través de los valores de las propiedades mecánicas de los materiales empleadas en el modelo. En este caso se hizo necesaria la modificación del módulo de Young de la mezcla bituminosa. Hay que tener en cuenta que los datos empleados en la curva maestra de la mezcla bituminosa se han obtenido de la bibliografía y corresponden con un tipo de mezcla determinado.

Con estos parámetros ajustados se comparan los resultados obtenidos para las diferentes variables del sistema.

En la Tabla 6.1 se presentan los valores finales de los parámetros que se ajustaron en el modelo para cada una de los componentes de la estructura.

**Tabla 6.1 Valores finales de los parámetros ajustados en el modelo**

Mezcla bituminosa				
Amort_x	Amort_y	Angulo	Desfase	Módulo E
0.0001	0.0001	26.6°	20°	6·10 <sup>8</sup> MPa
Suelo granular				
Amort_x	Amort_y	Angulo		
0.001	0.01	26.6°		
Suelo cohesivo				
Amort_x	Amort_y	Angulo		
0.001	0.001	20°		

### 6.3.4 Resultados obtenidos

En la Tabla 6.2 se presentan los resultados de la simulación para las distintas variables calculadas junto con los resultados obtenidos mediante el modelo multicapa elástico lineal BISAR. Se han calculado en las zonas de las capas que se utilizan para evaluar el comportamiento de los firmes con el paso de los años a través de los modelos de comportamiento. Estas zonas donde se calculan las variables dependen, como se ha explicado anteriormente, del tipo de material y de la posición de la capa dentro de la estructura.

Tabla 6.2 Variables tenso-deformacionales en los puntos de cálculo de cada capa

Capa	Variable	Modelica	BISAR	Diferencia absoluta
<b>Mezcla bituminosa (superficie y fondo de la capa)</b>	Deflexión $\delta$ (1/100 mm) en superficie	89	88	1
	Deformación longitudinal de tracción ( $\epsilon_l$ ) en el fondo ( $\mu_{def}$ )	493	385	108
<b>Suelo granular (al principio de la capa)</b>	Tensión vertical ( $\sigma_v$ ) al principio de la capa	-0.18	-0.04	0.14
	Deformación vertical ( $\epsilon_v$ ) al principio de la capa ( $\mu_{def}$ )	-910	-1200	290
<b>Suelo cohesivo (al principio de la capa)</b>	Tensión vertical ( $\sigma_v$ ) al principio de la capa (MPa)	-0.015	0.023	0.008
	Deformación vertical ( $\epsilon_v$ ) al principio de la capa (MPa)	-152	-432	280

En la Figura 6.5 se presenta la distribución de temperaturas dentro de cada una de las capas de la estructura, para una temperatura del firme en superficie de 30 °C y de 18 °C en el fondo de todas las capas, en el suelo.

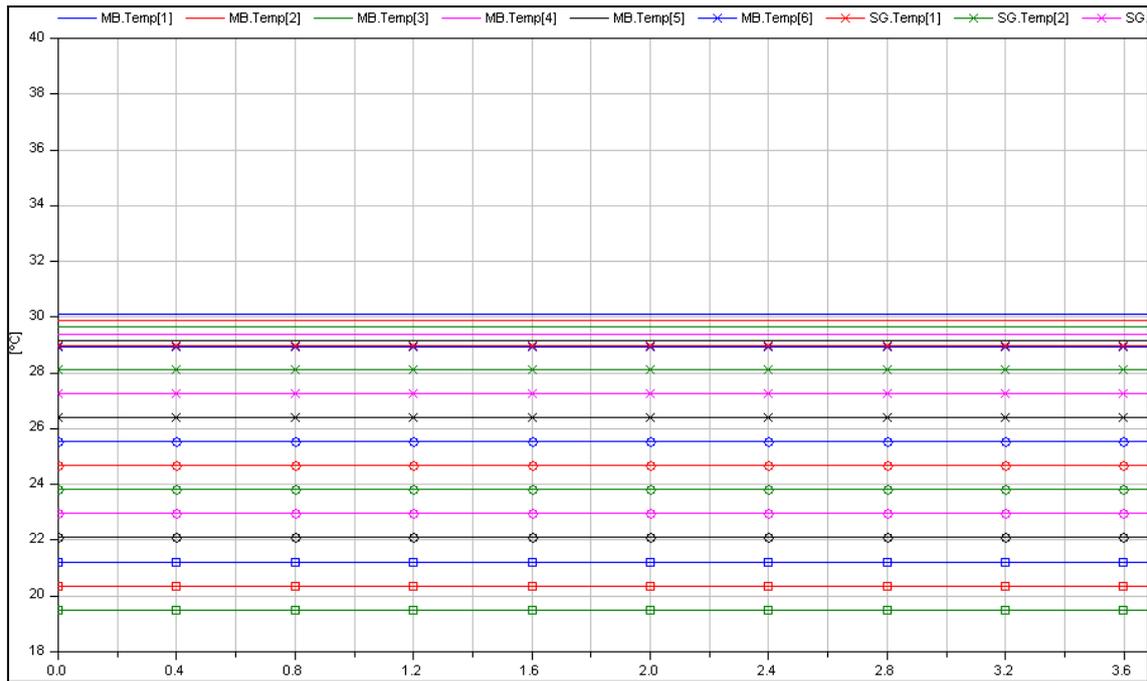


Figura 6.5 Distribución de temperaturas dentro de la estructura

## 6.4 Conclusiones

Se ha detallado el proceso de simulación de un modelo de respuesta de firmes desarrollado como ejemplo que contiene tres capas, dos de ellas elásticas y una viscoelástica, sometidas al paso de un vehículo a una velocidad de 3.5 km/h.

Es importante tener en cuenta los tiempos en los que se producen los eventos del modelo para poder simular correctamente el mismo. La carga se tiene que aplicar después del tiempo  $t=0.9$  s y los intervalos de integración deben ser mayores a 500 para una correcta simulación.

Los resultados obtenidos con Modelica presentan valores mayores que los obtenidos mediante BISAR excepto en el caso de las deformaciones verticales de los suelos, que en ambos casos el resultado con BISAR es mayor.

El ajuste de los parámetros con relación a los resultados obtenidos mediante BISAR resulta complejo, debido en parte a las diferencias significativas entre las variables de entrada al modelo que se emplean en los dos programas. Además de la inclusión de efectos como el confinamiento de los suelos, que podría explicar esas menores deformaciones verticales, o la dependencia de la mezcla con la frecuencia de carga y la temperatura.

Se establece un perfil de temperaturas dentro de la estructura que resulta útil para estudios de diseño de firmes.

Se puede concluir que los modelos son capaces de reproducir el tipo de curvas características de cada variable y que los valores son del orden de magnitud esperado para este tipo de modelos.

No obstante se hace necesaria la validación con datos experimentales del modelo con el fin de comprobar su fiabilidad y evaluar la capacidad de uso dentro de este campo de la ingeniería.



# Capítulo 7 Conclusiones y líneas de trabajo futuras

## 7.1 Introducción

En este capítulo se presentan las principales conclusiones alcanzadas y se proponen trabajos futuros.

## 7.2 Conclusiones

Las conclusiones que se extraen de este trabajo realizado son las siguientes:

- Existen diferentes herramientas para el estudio de la respuesta estructural de los firmes de carreteras. La mayor parte considera la carga aplicada sobre la estructura como una carga estática obviando su naturaleza dinámica. Lo que resulta ser un inconveniente a la hora de modelizar la respuesta de estructuras compuestas por materiales cuya relación constitutiva presenta dependencia temporal. Por tanto, se están desarrollando nuevas herramientas que permiten tener en cuenta el aspecto dinámico del problema. La simulación dinámica dispone de una aplicación creciente en este campo de la ingeniería.
- El lenguaje Modelica presenta ciertas capacidades que simplifican la creación de modelos de sistemas dinámicos. Se trata de un lenguaje abierto, lo que permite que las librerías de distintos dominios físicos se encuentren en continuo desarrollo y al alcance de un mayor número de usuarios con respecto a otro tipo de herramientas de modelado. Es un lenguaje orientado a objetos, lo que permite la reutilización de los modelos, provocando un ahorro de tiempo de desarrollo. Los modelos se pueden desarrollar de manera acausal, lo que también ayuda en la adaptación de unas clases a otras independientemente de su causalidad. Es capaz de modelar sistemas DAE-híbridos, permitiendo

cambiar la estructura del sistema al producirse un evento. Todas estas características

- El complejo comportamiento de los materiales que forman el firme, debido a que no son medios continuos y presentan una fuerte heterogeneidad en su estructura, hace que el modelado sea costoso y difícil de llevar a cabo por parte de una gran parte de los ingenieros y técnicos. Por ello, uno de los objetivos del proyecto es la obtención de una herramienta sencilla y de fácil manejo para poder utilizar en el campo de la ingeniería de firmes.
- Como inicio del desarrollo de una librería enfocada al desarrollo de modelos de respuesta de firmes, se realizó un estudio del funcionamiento de las diferentes partes que componen el sistema físico a modelar: la carga de los vehículos, la estructura y el entorno y se identificaron las interacciones físicas más relevantes entre estos. De este estudio resultó que las interacciones físicas más relevantes entre las distintas partes del sistema son de tipo mecánico y térmico. Además las interacciones mecánicas se encuentran condicionadas por las térmicas.
- Se realizó una abstracción de la carga, la estructura y el entorno para encontrar analogías con sistemas mecánicos y térmicos que representaran el comportamiento de mecánico y término de cada uno de los componentes del sistema.
- La simetría del problema estudiado permite abordar el sistema en dos dimensiones. Las cargas se modelizan como fuentes de fuerzas que se aplican sobre la estructura en ambas direcciones. El entorno se modeliza por una parte para establecer el contorno de la estructura, lo que resulta en elementos bloqueadores del movimiento, y por otra para establecer los flujos de calor intercambiados por la estructura.
- La estructura es discretizada en volúmenes de control en los que se establecen las ecuaciones de balance de materia y energía. Estos volúmenes se encuentran compuestos por modelos más sencillos que simulan tanto los comportamientos mecánicos como térmicos del material a través de la utilización de elementos atómicos provenientes de la analogía con los sistemas mecánicos y térmicos (muelles, amortiguadores y resistencias térmicas). En el

volumen de control se modeliza la interacción entre el dominio térmico y el mecánico.

- Las capacidades de reutilización que ofrece Modelica permite que estos volúmenes de control estén formados por modelos redeclarables lo que permite la instanciación de clases que modelizan comportamientos mecánicos distintos mediante la parametrización de las clases que representan los volúmenes de control.
- Los comportamientos mecánicos modelados con esta librería son el elástico y el viscoelástico. Estos comportamientos han sido implementados teniendo en cuenta algunas propiedades complejas de los materiales como son el confinamiento de los suelos, su anisotropía y la dependencia de las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas con la temperatura y la frecuencia de carga. Para lograrlo se ha utilizado la capacidad de Modelica y Dymola para modelizar y simular sistemas DAE-híbridos. Se han creado modelos con estructura variable para considerar el efecto del confinamiento de los suelos en el cambio de sus propiedades mecánicas.
- Se han considerado como variables discretas las constantes de los elementos atómicos mecánicos produciéndose cambio en sus valores cuando se producen ciertos eventos como cambios de temperatura o el peso de la estructura.
- De esta forma se ha desarrollado una librería en Modelica que permite la construcción de modelos de respuesta de firmes, consiguiendo el primer y principal objetivo planteado al inicio del proyecto.
- Una vez desarrollados los componentes de la librería se procedió a su validación cualitativa para evaluar el correcto funcionamiento de los mismos. Se divide la validación en tres partes diferenciadas que coinciden con los subsistemas del problema de estudio: la carga, la estructura y el entorno.
- Para la validación se emplean datos bibliográficos, comportamientos teóricos estudiados en la revisión que se llevó a cabo del modelado de este tipo de estructuras y la propia experiencia profesional en el campo de aplicación de esta librería.

- Se comprueba el correcto funcionamiento de las distintas partes del sistema ya que se adecuan a los comportamientos teóricos y, en el caso de las distintas capas de la estructura, que están formadas por composición de los volúmenes de control establecidos, se someten a una validación cualitativa.
- Los dos tipos de capas validados de forma cualitativa son la capa elástica y la capa viscoelástica. La validación cualitativa consiste en comparar los resultados obtenidos, las tensiones, deformaciones y la temperatura, en cada uno de los volúmenes de control que forman la capa con los resultados obtenidos simulando un sistema similar con un modelo de respuesta del firme ya contrastado denominado BISAR.
- Los resultados obtenidos permiten observar comportamientos similares de los resultados y dentro de un mismo orden de magnitud.
- En el caso de la capa viscoelástica se ha ajustado el módulo complejo del material bituminoso un modelo viscoelástico de tipo Kelvin-Voight obteniendo un comportamiento correcto del material de forma que ha permitido reproducir la curva característica de las deformaciones longitudinales. Esta curva posee un primer pico negativo de compresión, una tracción y de nuevo un pico de compresión. Además se comprueba la dependencia de las propiedades mecánicas de la mezcla con la frecuencia de carga y la temperatura, cumpliéndose así otro de los objetivos del proyecto. A mayor frecuencia de carga mayores deformaciones de tracción y a mayor temperatura mayores.
- La validación de los componentes que modelizan la parte térmica del sistema se realiza mediante la resolución del balance energético que se produce en la superficie del firme debido a los flujos de calor entre la estructura y el entorno. Se consiguen reproducir las variaciones térmicas en la temperatura del firme y en las temperaturas dentro de la estructura del mismo.
- Finalmente se procedió a construir, con los elementos de la librería, a simular y comprobar, con el BISAR un modelo formado por tres capas, una capa viscoelástica y dos capas elásticas. Los resultados de las variables tensodeformacionales son similares excepto en el caso de las deformaciones

verticales en las capas elásticas, donde son menores en el modelo desarrollado con Modelica.

Como conclusión final resaltar que se ha conseguido el objetivo final del proyecto que era el desarrollo de un modelo que pudiera simular distintos comportamientos de los materiales que forman el firme de forma sencilla y con una alta capacidad de reutilización.

### 7.3 Líneas de trabajo futuras

Al finalizar la realización de este proyecto se han detectado las siguientes posibilidades de desarrollo futuras de esta librería en el campo de la modelización de firmes:

- Lo primero y principal es la validación con datos reales de los modelos desarrollados con esta librería.
- Desarrollo de componentes transductores para obtener la respuesta de las variables a través de estos y que se puedan usar como datos de entrada en otros modelos, funciones, etc. Modelo transductor.
- Incorporación de modelos de respuesta desarrollados en Modelica en las herramientas de diseño de firmes existentes.
- Incorporación de las variaciones de humedad de los suelos a la respuesta de los firmes.
- Desarrollo de otros tipos de comportamientos mecánicos y nuevas sub-capas y capas.
- Estudio del amortiguamiento y las condiciones de adherencia entre sub-capas y capas para simular otros efectos que se producen en la realidad como el deslizamiento entre capas mal adheridas.
- Incorporación de fuentes de datos reales de temperatura del aire y radiación como valores de entrada para el cálculo de la temperatura en la superficie del firme.

El estudio del deterioro de los firmes de carreteras supone la realización de ensayos a escala real caros debido principalmente al tiempo de duración de los mismos. Existen ensayos en escala de laboratorio para acelerar los procesos de desgaste de los materiales, pero no representan lo que sucede en la realidad cuando se encuentran dentro de una estructura. Se ensayan los materiales por separado.

Por otro lado, cuando se diseña una carretera se tiene que hacer para que no sufra deterioros en un periodo de tiempo concreto.

Es por ello, que los programas de modelización del comportamiento de la estructura completa de firme, donde se pueda modelizar la interacción de las distintas partes del sistema, junto con los programas que predicen el comportamiento con el tiempo, son ampliamente empleados en el diseño y dimensionamiento de los firmes, no exclusivamente en el ámbito de la investigación si no también en el ámbito profesional.

Lo que permite concluir que Modelica parece presentar buenas condiciones para desarrollar herramientas de modelado dentro de este campo profesional.

# Bibliografía

---

- Alarcón Ibarra, J. (2003). "Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta." Universitat Politècnica de Catalunya.
- Autret, P., Baucheron De Boissoudy, A., y Marchand, J. P. "ALIZE III Practice." Proc., 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.
- Badiola, V. (2004). "Principios básicos de Resistencia de Materiales." Diseño de máquinas I.
- Bañón Blázquez, L., y Beviá García, J. F. (2000). Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento, Alicante, España.
- Bañón Blázquez, L., y Beviá García, J. F. (2000a). Manual de carreteras. Volumen I: elementos y proyecto, Alicante, España.
- Bañón Blázquez, L., y Beviá García, J. F. (2000b). Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento, Alicante, España.
- Ben-Amoz, M. (1990). "A cumulative damage theory for fatigue life prediction." Engineering Fracture Mechanics, 37(2), 341-347.
- Blanco Alvarez, F. (2005). "Lección 2. Comportamiento reológico de los polímeros. Viscoelasticidad." <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/>.
- Burmister, D. (1954). "Principles of permeability testing of soils." Proc. Symp. Permeability of Soils, Fifty-seventh Annual Meeting, Chicago.
- Burrel Díez, S. (2003). "Aplicación de los elementos discretos a la simulación del problema de desgaste." Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cadavid Jáuregui, B., y Pérez Ayuso, J. (2013). "Predicción de la temperatura de los firmes de carretera a través de parámetros climáticos." Ingeniería Civil, 172, 16.
- Camacho Lasso, E. D. J., y Contreras Marin, L. E. (2010). "Influencia de la temperatura en la variación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas colombianas." Santander, Colombia.
- Cárdenas, J., y Fonseca, E. (2009). "Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura." Revista: Revista EIA, 12.

- Carreteras, D. G. d. (2003). "Norma 6.1 IC "Secciones de firme"." M. d. Fomento, ed. Madrid, 33.
- Carreteras, D. G. d. (2011). "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)." M. d. Fomento, ed. Madrid.
- Chen, Y. (2009). "Viscoelastic modeling of flexible pavement."
- Cossolino, L., y Pereira, A. (2010). "Amortecimento: classificação e métodos de determinação." ATCP Engenharia Física, São Carlos - Brasil.
- Cundall, P., y Strack, O. (1979). "A discrete numerical model for granular assemblies." Geotechnique, 18.
- Dassault Systèmes AB, (2013). "Dymola: Dynamic Modeling Laboratory. Release Notes." Lund.
- De Jong, D. L., Peatz, M. G. F., y Korswagen, A. R. (1973). "Computer Program Bistar Layered Systems' under Normal and Tangential Loads." Konin Klijke Shell-Laboratorium, Amsterdam.
- García S., G. (2012) "Módulo dinámico de mezclas asfálticas." Proc., Seminario Internacional de Recapados Asfálticos de Alto Desempeño.
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., y Sesma Martínez, J. A. (2002). "Mecánica de materiales para pavimentos." Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 234.
- Harichandran, R. S., Baladi, G. Y., y Yeh, M. (1989). "Development of a Computer Program for Design of Pavements Systems Consisting of Bound and Unbound Materials." Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan.
- Heras Barras, C. (2010). "Estudio del comportamiento dinámico de la banda de rodadura de un neumático." Ingeniería Técnica Industrial Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Hildebrand, G. (2002). "Verification of Flexible Pavement Response from a Field Study." Danish Road Institute, Denmark.
- Hopman, P. C. (1996). "The visco-elastic multilayer program - VEROAD." TRB serial Heron.
- Huang, Y. H. "Stresses y Displacements in Visco-Elastic Layered Systems Under Circular Loaded Areas." Proc., 2nd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements.

- Kopperman, S., Tiller, G., y Tseng, M. (1986). "ELSYM5, Interactive Microcomputer Version." Federal Highway Administration.
- Leoni, J. A. (2008). "Distribución de tensiones." <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Capitulo4DistribuciondeTensiones.pdf>.
- Maestro Garriga, A. (2008). "Reología de espesantes celulósicos para pinturas al agua: Modelización y mecanismo de espesamiento." info:eu-repo/semantics/published Version, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- Mateos Moreno, A. (2003). "Modelización numérica de la respuesta estructural de los firmes flexibles a partir de medidas experimentales en Pista de Ensayo a Escala Real." Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Mateos Moreno, A. (2010). "Dimensionamiento analítico: planteamiento, conceptos y herramientas." Intevia, Madrid, 20.
- Mateos Moreno, A. (2012). "Comportamiento Estructural, Dimensionamiento y Diseño." I Jornada Técnica Nacional de Emulsiones Bituminosas, ATEB, Madrid, 30.
- Mateos Moreno, A., y Pérez Ayuso, J. (2010). "Memoria del Tercer Ensayo de Explanadas en la Pista de Evaluación de Firmes a Escala Real del CEDEX." CEDEX.
- Mateos, A., de la Fuente Martín, P., y Pérez Ayuso, J. (2008). "Flexible Pavements Dynamic Response under a Moving Wheel." Accelerated Pavement Testing Conference 2008, Madrid, 31.
- Muelas Rodríguez, A. (2004) "Manual de Mecánica del Suelo y Cimentaciones." UNED.
- Oliva Domínguez, R. (2011). "Simulación en modélica de elementos mecánicos de una suspensión." Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Ortiz-Pulido, M. d. P., Gaitán-Serrano, J. F., y Camacho-Tauta, J. F. (2013). "Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba." Revista de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 8.
- Perelli Botello, J. (2012) "Elasticidad." Retineo [www.retineo.es](http://www.retineo.es)
- Pérez Ayuso, J., Cadavid Jáuregui, B., Marrón Fernández, J. O., y Gutiérrez-Bolívar Álvarez, Ó. (2013). "25 años de la pista de ensayo acelerado de firmes del CEDEX." Ingeniería Civil, 170, 17.

- Pérez Ayuso, J., Cadavid Jáuregui, B., Navareño Rojo, Á., García Carretero, J., y Marrón Fernández, J. O. (2013). "Seguimiento del comportamiento estructural de carreteras mediante técnicas de instrumentación." VIII Jornada Nacional de ASEFMA, ASEFMA, Madrid, 14.
- PROAS (2013). "Vademécum de pavimentación." Madrid.
- Qin, J. (2010). "Predicting Flexible Pavement Structural Response Using Falling Weight Deflectometer Deflections." Master of Science in Civil Engineering, Ohio University, Ohio, EEUU.
- Raad, L., y Figueroa, J. L. (1980). "Load Response of Transportation Support Systems." Transportation Engineering Journal, ASCE.
- Rodríguez Segurado, M. (2005). "Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona." Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Romero Olleros, I. (2011). "Introducción a la mecánica de los sólidos deformables." E. T. S. I. Industriales, ed., Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 125.
- Ruiz, A. (2010). "Introducción al dimensionamiento de firmes." Intevia, Madrid, 20.
- Sivaneswaran, N., Pierce, L. M., y Mahoney, J. P. (1999). "EVERSTRESS Layered Elastic Analysis Program." Washington State Department of Transportation.
- Torrano, S., y Herrero Pérez, D. (2011). "Introducción a la Elasticidad y Resistencia de Materiales." Apuntes de Elasticidad y Resistencia de Materiales (Lección 1), 12.
- Trigos Salas, T. A. (2007). "Influencia de la Amplificación Local de las Ondas Sísmicas y la Interacción Suelo-Fundación en el Puente Marga-Marga." Santiago de Chile.
- Urquía Moraleda, A. (2000). "Modelado Orientado a Objetos y Simulación de Sistemas Híbridos en el ámbito del Control de Procesos Químicos." Madrid.
- Urquía Moraleda, A., y Martín Villalba, C. (2013). "Modelado orientado a objetos y simulación de sistemas físicos." Madrid.
- Warren, H., y Dieckmann, W. L. (1963). "Numerical Computation of Stresses and Strains in a Multiple-Layer Asphalt Pavement System." Chevron Research Corporation.

# Símbolos, siglas y abreviaturas

En este anexo se presentan dos tablas con el contenido que se indica a continuación:

- La Tabla I contiene los símbolos empleados en el proyecto indicando su significado y las unidades en caso de que las tuviera.
- La Tabla II recoge un listado con las siglas, abreviaturas y acrónimos empleados en el proyecto y su significado.

## I Símbolos empleados

Símbolo	Significado	Unidades
$D_j$	Daño producido a la capa en un periodo de tiempo $j$	
$n_j^i$	Número de cargas tipo que es capaz de soportar para un criterio de fallo $i$ en un periodo de tiempo $j$	
$N^i$	Número de cargas tipo que es capaz de soportar para un criterio de fallo $i$ en toda la vida de proyecto	
$\sigma_p$	Tensión ejercida por la carga en la superficie de la estructura	MPa
$F$	Fuerza ejercida por la carga	N
$r$	Radio de la huella circular que provoca el neumático en la superficie	m
$\epsilon_{MB}$	Deformación de tracción en el fondo de la Mezcla Bituminosa	$\mu\text{m/m}$
$\epsilon_{EXP}$	Deformación vertical en la coronación de la explanada	$\mu\text{m/m}$
$\sigma_{SC}$	Tensión de tracción en el fondo de la capa de suelocemento o gravacemento	MPa
$N_d$	Número de cargas admisibles antes de producirse el fallo debido a la deformación de la explanada	
$\epsilon$	Deformación	$\mu\text{m/m}$
$\sigma$	Tensión	MPa
$N_f$	Número de cargas admisibles antes de producirse el fallo	

Modelado en Modelica de la respuesta estructural de firmes

	debido a la fatiga del material	
$\epsilon_N$	Deformación máxima hasta rotura del material	$\mu\text{m/m}$
$\sigma_N$	Tensión máxima hasta rotura del material	MPa
$\tau$	Tensión de corte o tangencial	MPa
$\gamma$	Distorsión o deformación tangencial	
$\nu$	Coefficiente de Poisson	
E	Módulo de Young	Pa
K	Módulo de compresibilidad	Pa
G	Módulo de corte o de rigidez	Pa
$E^*$	Módulo complejo o dinámico de la mezcla	Pa
$\varphi$	Ángulo de fase del módulo complejo	$^\circ$
$l_t$	Tiempo de carga	s
$f_r$	Frecuencia reducida	
$\eta$	Coefficiente de viscosidad	Pa·s
$\delta$	Deflexión	1/100 mm
$\epsilon_v$	Deformación vertical	$\mu\text{m/m}$
$\epsilon_c$	Deformación horizontal	$\mu\text{m/m}$
$\sigma_v$	Tensión vertical	MPa
$\sigma_c$	Tensión horizontal	MPa
Cr	Coefficiente de rodadura	
$\omega$	Frecuencia	radianes
$K_0$	Coefficiente de empuje en reposo	

**III Listado de siglas, abreviaturas y acrónimos**

T2	Tipo de tráfico especificado en la Norma 6.1 IC
E1	Tipo de explanada mejorada especificada en la Norma 6.1 IC
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
APT Facility	Accelerated Pavement Testing Facility
MB	Mezcla Bituminosa
ZA	Zahorra Artificial
H <sub>1</sub>	Espesor de la capa 1
H <sub>2</sub>	Espesor de la capa 2
6.1 IC	Nomenclatura de la Norma de la Instrucción de Carreteras
BISAR	Bitumen Stress Analysis in Roads
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MEF	Método de Elementos Finitos
MED	Método de Elementos Discretos
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
DAE	Differential Algebraic Equation
MSL	Modelica Standard Library
MATLAB	MaTriX LABoratory
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
NLT-	Norma del Laboratorio de Transporte
S-EST1	Suelos estabilizado tipo 1
S-EST2	Suelo estabilizado tipo 2
S-EST3	Suelo estabilizado tipo 3
PG-3	Pliego General de Carreteras

Modelado en Modelica de la respuesta estructural de firmes

VEROAD	Visco Elastic ROad Analysis Delft
MB	MezclaBituminosa
SG	Suelo Granular
SC	SueloCohesivo
ZA	Zahorra Artificial

# Anexo A. Librería *FirmesCarreteras*

---

En este anexo se presenta la documentación de la librería *FirmesCarreteras* generada a través de Dymola 6.1.

# FirmesCarreteras

Librería enfocada a la modelización del comportamiento estructural de los firmes de carreteras.

## Information

La librería **FirmesCarreteras** se ha desarrollado con el objetivo de poder crear modelos de respuesta de firmes de un modo versátil, rápido y menos costoso que al emplear otro tipo programas.

Madrid, Septiembre de 2014. Belén Cadavid Jáuergui.

## Package Content

Name	Description
<input type="checkbox"/> <a href="#">Útiles</a>	Paquete que contiene clases que se necesitan emplear para poder confeccionar el modelo.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Carga</a>	Paquete que contiene los elementos necesarios para la modelización de una carga aplicada sobre un firme.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Estructura</a>	Paquete que contiene los elementos que conforman el firme.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Entorno</a>	Paquete que contiene los elementos que modelizan el entorno del firme.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Interfaces</a>	Paquete que contiene las interfaces para formar los distintos elementos.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Conectores</a>	Paquete que contiene los conectores que agrupan las variables que conectan a los componentes.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Ejemplos</a>	Paquete que contiene algunos modelos de ejemplo.

## [FirmesCarreteras.Útiles](#)

Paquete que contiene clases que se necesitan emplear para poder confeccionar el modelo.

## Package Content

Name	Description
<input type="checkbox"/> <a href="#">Fuentes</a>	Clases que modelan funciones para poder simular la variación de una variable a través de estas funciones.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Funciones</a>	Paquete que contiene funciones empleadas en los modelos de firmes.



[SistemaCoordenadas](#)

Sistema de coordenadas global para todos los puntos dentro de la capa.

## [FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes](#)

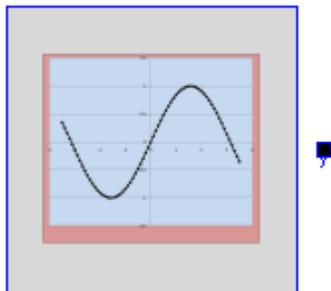
Clases que modelan funciones para poder simular la variación de una variable a través de estas funciones.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Fuente_Senoidal</a>	La señal que se aplica es una senoide.
<a href="#">Fuente_Constante</a>	Señal se aplica de forma constante.
<a href="#">Fuente_Paso</a>	Señal que se aplica como un escalón.
<a href="#">Fuente_Impulso</a>	Señal que se aplica como un impulso.
<a href="#">Fuente_Cero</a>	Pone el valor de cero a una señal de salida hacia otro objeto.

## [FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\\_Senoidal](#)

La señal que se aplica es una senoide.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Offset	0	Tiempo sin aplicación de la señal.
Real	TiempoIni	1	Tiempo en el que empieza la función seno. En los modelos de respuesta del firme debe ser igual o mayor a 1.
Real	TiempoFin	1	Tiempo a partir del cual se hace cero la función seno.
Real	Amplitud	1	Amplitud de la señal aplicada.
Real	FreqHz	1	Frecuencia en Hz de la señal aplicada. [Hz]

Real	Fase	0	Fase de la señal seno aplicada. En radianes.
------	------	---	--

## Connectors

Type	Name	Description
output	<a href="#">Senal</a> y	Conector que se utiliza como salida.

## Modelica definition

```

block Fuente_Senoidal "La señal que se aplica es una senoide."

//*****
//*****
//Herencia:
//*****
//*****
extends Interfaces.Bloque\_Salida;

//*****
//*****
//Parámetros:
//*****
//*****
parameter Real Offset = 0 "Tiempo sin aplicación de la señal.";
parameter Real TiempoIni = 1 "Tiempo en el que empieza la función seno. En
los modelos de respuesta del firme
debe ser igual o mayor a 1.";

parameter Real TiempoFin= 1
"Tiempo a partir del cual se hace cero la función seno.";
parameter Real Amplitud = 1 "Amplitud de la señal aplicada.";
parameter Real FreqHz( unit="Hz")=1 "Frecuencia en Hz de la señal aplicada.";
parameter Real Fase=0 "Fase de la señal seno aplicada. En radianes.";

//*****
//*****
//Constantes:
//*****
//*****
constant Real pi = Modelica.Constants.pi;

//*****
//*****
//Ecuaciones:
//*****
//*****
equation
y.Signal = Offset + (if time < TiempoIni or time > TiempoFin then 0 else
Amplitud*
Modelica.Math.sin((2*pi)*FreqHz*(time - TiempoIni) + Fase));

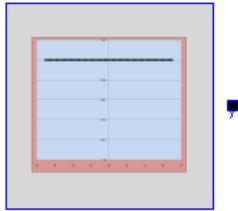
end Fuente_Senoidal;

```

---

# FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\_Constante

Señal se aplica de forma constante.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	TiempoIni	1	Tiempo en el que empieza la función.
Real	Amplitud	1	Amplitud de la señal aplicada.

## Connectors

Type	Name	Description
output	<a href="#">Senal</a> y	Conector que se utiliza como salida.

## Modelica definition

```
block Fuente_Constante "Señal se aplica de forma constante."

//*****
//*****
//Herencia:
//*****
//*****
  extends Interfaces.Bloque\_Salida;

//*****
//*****
//Parámetros:
//*****
//*****
  parameter Real TiempoIni= 1 "Tiempo en el que empieza la función.";
  parameter Real Amplitud= 1 "Amplitud de la señal aplicada.";

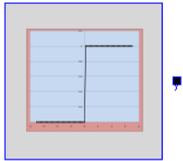
//*****
//*****
//Ecuaciones:
//*****
//*****
equation
  y.Signal = (if time < TiempoIni then 0 else Amplitud);

end Fuente_Constante;
```

---

# FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\_Paso

Señal que se aplica como un escalón.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Offset	0	Tiempo sin aplicación de la señal.
Real	Paso	1	Tiempo en el que empieza la función.
Real	Amplitud	1	Amplitud de la señal aplicada.

## Connectors

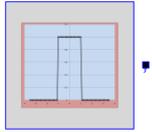
Type	Name	Description
output	<a href="#">Senal</a> y	Conector que se utiliza como salida.

## Modelica definition

```
block Fuente_Paso "Señal que se aplica como un escalón."  
  
//*****  
//*****  
//Herencia:  
//*****  
//*****  
    extends Interfaces.Bloque\_Salida;  
  
//*****  
//*****  
//Parámetros:  
//*****  
//*****  
    parameter Real Offset=0 "Tiempo sin aplicación de la señal.";  
    parameter Real Paso = 1 "Tiempo en el que empieza la función.";  
    parameter Real Amplitud=1 "Amplitud de la señal aplicada.";  
  
//*****  
//*****  
//Ecuaciones:  
//*****  
//*****  
equation  
    y.Signal = Offset + (if time < Paso then 0 else Amplitud);  
  
end Fuente_Paso;
```

# FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\_Impulso

Señal que se aplica como un impulso.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Offset	0	Tiempo sin aplicación de la señal.
Real	TiempoIni	1	Tiempo en el que empieza a aplicarse la función.
Real	Duracion	1	Tiempo que dura la amplitud de la función.
Real	Amplitud	1	Amplitud de la señal aplicada.

## Connectors

Type	Name	Description
output	<a href="#">Senal</a> y	Conector que se utiliza como salida.

## Modelica definition

```
block Fuente_Impulso "Señal que se aplica como un impulso."

//*****
//*****
//Herencia:
//*****
//*****
  extends Interfaces.Bloque\_Salida;
//*****
//*****
//Parámetros:
//*****
//*****
  parameter Real Offset=0 "Tiempo sin aplicación de la señal.";
  parameter Real TiempoIni=1 "Tiempo en el que empieza a aplicarse la
función.";
  parameter Real Duracion = 1 "Tiempo que dura la amplitud de la función.";
  parameter Real Amplitud=1 "Amplitud de la señal aplicada.";

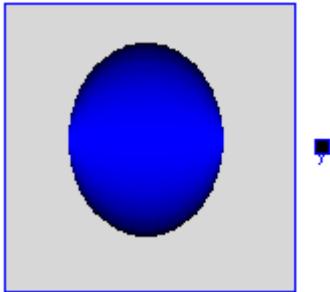
//*****
//*****
//Ecuaciones:
//*****
//*****
equation
  y.Signal = Offset + (if time < TiempoIni then 0 else if time <
(TiempoIni+Duracion) then Amplitud else 0);
end Fuente_Impulso;
```

---

## FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\_Cero



Pone el valor de cero a una señal de salida hacia otro objeto.



### Connectors

Type	Name	Description
output <a href="#">Senal</a>	y	Conector que se utiliza como salida.

### Modelica definition

```
block Fuente_Cero
  "Pone el valor de cero a una señal de salida hacia otro objeto."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.Bloque\_Salida;

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones:
  //*****
  //*****
  equation
    y.Signal = 0;

end Fuente_Cero;
```

---

## FirmesCarreteras.Utiles.Funciones

Paquete que contiene funciones empleadas en los modelos de firmes.

### Package Content

Name	Description
 <a href="#">Longitud</a>	Calcula la longitud de un vector de 2 dimensiones.
 <a href="#">ModuloProfundidad</a>	Calcula el módulo en función del confinamiento. Según bibliografía del proyecto.
 <a href="#">ModuloTemperatura</a>	Variación del módulo de elasticidad de los materiales en función de la temperatura. Sacado de Ullidtz (1987). Para temperaturas entre 0 °C y 40 °C
 <a href="#">ModuloTemperaturaFrecuencia</a>	Variación del módulo dinámico de una mezcla bituminosa con la frecuencia y la aplicación de la carga. Se utiliza de ejemplo los datos proporcionados en la bibliografía por Gabriel García S. 2013
 <a href="#">CoefCorreccionT</a>	Función que describe la dependencia con la temperatura del coeficiente de corrección para la construcción de la curva maestra de la mezcla.
 <a href="#">Superficie</a>	Superficie circular sobre la que actúa la fuerza.
 <a href="#">FrecuenciaCarga</a>	Calcula la frecuencia de duración de la carga aplicada.

---

# FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Longitud

Calcula la longitud de un vector de 2 dimensiones.

## Inputs

Type	Name	Default	Description
Real	vector[2]		Vector del que se quiere saber la longitud. [m]

## Outputs

Type	Name	Description
Real	long	Longitud del vector de 2 dimensiones. [m]

## Modelica definition

```
function Longitud
  "Calcula la longitud de un vector de 2 dimensiones."

//*****
//*****
  //Variables de entrada a la función:
//*****
//*****
  input Real vector[2]( unit="m") "Vector del que se quiere saber la
longitud.";

//*****
//*****
  //Variables de salida:
//*****
//*****
  output Real long( unit="m") "Longitud del vector de 2 dimensiones.";

//*****
//*****
  //Ecuaciones:
//*****
//*****
algorithm
  //if (vector[1]<> 0 and vector[2]<>0) then
    long := sqrt(vector[1]^2+vector[2]^2);
  //else
    // long:= 1;
  //end if;
end Longitud;
```

---

# FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloProfundidad

Calcula el módulo en función del confinamiento. Según bibliografía del proyecto.

## Inputs

Type	Name	Default	Description
Real	Profundidad		Profundidad a la que se encuentra el elemento inercial considerado. [m]
Real	Gravedad		Aceleración de la gravedad en el sistema de referencia utilizado. [m/s <sup>2</sup> ]
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material.
Boolean	Suelo		Indica si estamos tratando un suelo u otro tipo de material de la estructura como una mezcla bituminosa.
Integer	Posicion		Indica si el comportamiento mecánico de la capa se encuentra en el eje z o en el x.
Real	peso		Se trata del peso de los materiales que tiene por encima.
Boolean	Capa		Indica si está dentro de una capa.

## Outputs

Type	Name	Description
Real	Modulo	Módulo de elasticidad dependiente de la profundidad. [N/m <sup>2</sup> ]

## Modelica definition

```
function ModuloProfundidad
  "Calcula el módulo en función del confinamiento. Según bibliografía del
  proyecto."

  //*****
  //*****
  //Variables de entrada a la función:
  //*****
  //*****
  input Real Profundidad( unit="m")
    "Profundidad a la que se encuentra el elemento inercial considerado.";
  input Real Gravedad( unit="m/s2")
    "Aceleración de la gravedad en el sistema de referencia utilizado.";
  input FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos DatosCapa
    "Datos del material.";
  input Boolean Suelo
    "Indica si estamos tratando un suelo u otro tipo de material de la
estructura como una mezcla bituminosa.";
  input Integer Posicion
    "Indica si el comportamiento mecánico de la capa se encuentra en el eje z o
en el x.";
  input Real peso "Se trata del peso de los materiales que tiene por encima.";
  input Boolean Capa "Indica si está dentro de una capa.";
```

```

//*****
//*****
//Variables de salida de la función:
//*****
//*****
output Real Modulo( unit="N/m2")
    "Módulo de elasticidad dependiente de la profundidad.";

//*****
//*****
//Variables dinternas:
//*****
//*****
protected
    Real sigma_peso( unit="Pa") "Tensión debida al peso propio del material.";
    Real sigma_lateral( unit="Pa")
        "Tensión en los laterales del elemento de material debido al
confinamiento.";

//*****
//*****
//Ecuaciones:
//*****
//*****
algorithm

    //Se calcula la tensión debida al peso propio de la estructura a esa
profundidad:
    sigma_peso := DatosCapa.rho*Gravedad*Profundidad + peso;

    //Se calcula la tensión lateral como función del peso propio de la
estructura:
    sigma_lateral := DatosCapa.K0*sigma_peso;

//*****
//*****
//En caso de que se trate de un suelo: ANISOTROPIA Y CONFINAMIENTO

//*****
//*****
if Suelo then
    //Si no hay peso o es negativo:
    if noEvent(sigma_peso < 0 or sigma_peso == 0) then
        //Si está en profundidad:
        if noEvent(Posicion==3) then
            //Si está dentro de una capa:
            if noEvent(Capa) then
                //Se emplea el módulo de compresibilidad.
                Modulo := (DatosCapa.E/(3*(1-2*DatosCapa.coef_Poisson)));
            else
                Modulo := (DatosCapa.E/(3*(1-2*DatosCapa.coef_Poisson)));
            end if;

            //En caso de estar en horizontal:
        else
            //Se emplea el módulo de corte.
            Modulo
:= (DatosCapa.E/DatosCapa.anisotropia)/(2*(1+DatosCapa.coef_Poisson));
        end if;
    end if;
end if;

```

```

//Se considera el peso propio de la estructura a esa profundidad:
else
  //Si se encuentra en profundidad:
  if noEvent(Posicion==3) then
    //Si se encuentra dentro de una capa:
    if noEvent(Capa) then
      //Se emplea el módulo de compresibilidad.
      Modulo := (DatosCapa.E/(3*(1-2*DatosCapa.coef_Poisson)));
    else
      //Se emplea el módulo de compresibilidad sin variación.
      Modulo := (DatosCapa.E/(3*(1-2*DatosCapa.coef_Poisson)));
    end if;

  //En caso de que se encuentre en horizontal:
  else
    //Si se encuentra dentro de una capa:
    if noEvent(Capa) then
      //Se emplea el módulo de corte con variación en profundidad.
      Modulo :=
1e3*DatosCapa.k2*((1/3)*(sigma_peso+2*sigma_lateral))^(1/2));
    else
      //Se emplea el módulo de corte sin variación en profundidad.
      Modulo
:= (DatosCapa.E/DatosCapa.anisotropia)/(2*(1+DatosCapa.coef_Poisson));
    end if;
  end if;
end if;

//*****
//Si no se trata de un suelo:

//*****

//Si está en profundidad:
elseif noEvent(Posicion==3) then
  //Si se encuentra como parte de una capa:
  if noEvent(Capa) then
    //Se emplea el módulo de compresibilidad dividido entre 6 capas del mismo
    espesor.
    Modulo := (DatosCapa.E/(3*(1-2*DatosCapa.coef_Poisson)));
  else
    //Se emplea el módulo de compresibilidad.
    Modulo := (DatosCapa.E/(3*(1-2*DatosCapa.coef_Poisson)));
  end if;

  //En caso de que se encuentre en horizontal:
  else
    //Se emplea el módulo de corte.
    Modulo := DatosCapa.E/(2*(1+DatosCapa.coef_Poisson));
  end if;

end ModuloProfundidad;

```

---

# FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloTemperatura

Variación del módulo de elasticidad de los materiales en función de la temperatura. Sacado de Ullidtz (1987). Para temperaturas entre 0 °C y 40 °C

## Inputs

Type	Name	Default	Description
Real	Temp		Temperatura a la que se encuentra el material. [°C]

## Outputs

Type	Name	Description
Real	Modulo	Módulo de elasticidad del material [Pa]

## Modelica definition

```
function ModuloTemperatura "Variación del módulo de elasticidad de los
materiales en función de la temperatura.
    Sacado de Ullidtz (1987). Para temperaturas entre 0 °C y 40 °C"

//*****
//*****
//Variables de entrada a la función:
//*****
//*****
    input Real Temp( unit="°C") "Temperatura a la que se encuentra el material.";

//*****
//*****
//Variables de salida:
//*****
//*****
    output Real Modulo( unit="Pa") "Módulo de elasticidad del material";

//*****
//*****
//Parámetros internos de la función:
//*****
//*****
protected
    parameter Real a = 15000;
    parameter Real b = 7900;

//*****
//*****
//Ecuaciones:
//*****
//*****
algorithm
    Modulo := (a - b*(Modelica.Math.log(Temp)/Modelica.Math.log(10)))*1e6;

end ModuloTemperatura;
```

---

# FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloTemperaturaFrecuencia

Variación del módulo dinámico de una mezcla bituminosa con la frecuencia y la aplicación de la carga. Se utiliza de ejemplo los datos proporcionados en la bibliografía por Gabriel García S. 2013

## Inputs

Type	Name	Default	Description
Real	Temp		Temperatura a la que se encuentra el material. [°C]
Real	Frecload		Frecuencia de aplicación de la carga del vehículo una determinada profundidad. [Hz]
Real	Tref		Temperatura de referencia. [°C]

## Outputs

Type	Name	Description
Real	Modulo	Módulo dinámico del material. [Pa]

## Modelica definition

```
function ModuloTemperaturaFrecuencia "Variación del módulo dinámico de una mezcla bituminosa con la frecuencia y la aplicación de la carga.
```

```
  Se utiliza de ejemplo los datos proporcionados en la bibliografía por Gabriel García S. 2013"
```

```
//*****  
*****  
  //Variables de entrada a la función:  
//*****  
*****  
  input Real Temp( unit="°C") "Temperatura a la que se encuentra el material.";  
  input Real Frecload( unit="Hz")  
    "Frecuencia de aplicación de la carga del vehículo una determinada  
profundidad.";  
  input Real Tref( unit="°C") "Temperatura de referencia.";  
  
//*****  
*****  
  //Variables de salida:  
//*****  
*****  
  output Real Modulo( unit="Pa") "Módulo dinámico del material.";  
  
//*****  
*****
```

```

//Parámetros internos de la función:
//*****
*****
protected
parameter Real alpha = 3.416678;
parameter Real beta = -0.53483;
parameter Real gamma = 0.602195;
parameter Real delta = 0.788306;

//*****
*****
//Variables internas de la función:
//*****
*****
protected
Real tred
    "Tiempo reducido que aglutina el valor de la temperatura y la frecuencia de
aplicación de la carga.";
Real at
    "Coeficiente de corrección para una temperatura dada y otra de
referencia.";

//*****
*****
//Ecuaciones:
//*****
*****
algorithm
at := FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.CofCorreccionT(Temp, Tref);
tred := 10^(Modelica.Math.log10(1/Frecload)-Modelica.Math.log10(at));

Modulo := 10^(delta+(alpha/(1+(exp(beta-
gamma*Modelica.Math.log10(1/tred))))));

end ModuloTemperaturaFrecuencia;

```

---

# FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.CofCorreccionT

Función que describe la dependencia con la temperatura del coeficiente de corrección para la construcción de la curva maestra de la mezcla.

## Inputs

Type	Name	Default	Description
Real	Temp		Temperatura a la que se encuentra el material. [°C]
Real	Tref		Temperatura de referencia. [°C]

## Outputs

Type	Name	Description
Real	at	Coficiente de corrección para la temperatura Temp a una temperatura de referencia igual a Tref.

## Modelica definition

```
function CoefCorreccionT
  "Función que describe la dependencia con la temperatura del coeficiente de corrección para la construcción de la curva maestra de la mezcla."

  //*****
  //*****
  //Variables de entrada a la función:
  //*****
  //*****
  input Real Temp( unit="°C") "Temperatura a la que se encuentra el material.";
  input Real Tref( unit="°C") "Temperatura de referencia.";

  //*****
  //*****
  //Variables de salida:
  //*****
  //*****
  output Real at
    "Coficiente de corrección para la temperatura Temp a una temperatura de referencia igual a Tref.";

  //*****
  //*****
  //Parámetros internos de la función:
  //*****
  //*****
protected
  parameter Real beta = 0.1443 "Constante que depende del material.";

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones:
  //*****
  //*****
```

```
algorithm
  at := 10^(-beta*(Temp-Tref));

end CoefCorreccionT;
```

---

## FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Superficie

**Superficie circular sobre la que actúa la fuerza.**

### Inputs

Type	Name	Default	Description
Real	Radio		Radio de la circunferencia que representa la huella del vehículo. [m]

### Outputs

Type	Name	Description
Real	S	Superficie de la huella del vehículo. [m2]

### Modelica definition

```
function Superficie
  "Superficie circular sobre la que actúa la fuerza."

  //*****
  //*****
  //Variables de entrada a la función:
  //*****
  //*****
  input Real Radio( unit="m")
    "Radio de la circunferencia que representa la huella del vehículo.";

  //*****
  //*****
  //Variables de salida:
  //*****
  //*****
  output Real S( unit="m2") "Superficie de la huella del vehículo.";

  //*****
  //*****
  //Constantes:
  //*****
  //*****
protected
  constant Real pi = Modelica.Constants.pi "Número pi.";

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones:
```

```
//*****
*****
algorithm
  S := pi*Radio^2;

end Superficie;
```

## FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.FrecuenciaCarga

Calcula la frecuencia de duración de la carga aplicada.

### Inputs

Type	Name	Default	Description
Real	d		Profundidad donde se quiere calcula la frecuencia de la carga. [m]
Real	v		Velocidad del vehículo. [km/h]

### Outputs

Type	Name	Description
Real	frecload	Frecuencia de aplicación de la carga a la profundidad d. [Hz]

### Modelica definition

```
function FrecuenciaCarga
  "Calcula la frecuencia de duración de la carga aplicada."

//*****
*****
  //Variables de entrada a la función:
//*****
*****
  input Real d( unit="m")
    "Profundidad donde se quiere calcula la frecuencia de la carga.";
  input Real v(unit="km/h") "Velocidad del vehículo.";

//*****
*****
  //Variables de salida:
//*****
*****
  output Real frecload( unit="Hz")
    "Frecuencia de aplicación de la carga a la profundidad d.";

//*****
*****
  //Variables:
//*****
*****
protected
```

```

Real lt( unit="s") "Tiempo de carga.";

//*****
//*****
//Ecuaciones:
//*****
//*****
algorithm
  lt := 10^(0.5*d + 0.2 - 0.94*Modelica.Math.log10(v));
  frecload := 1/(2*lt);
end FrecuenciaCarga;

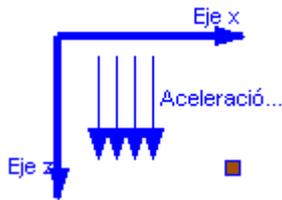
```

## FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas



Sistema de coordenadas global para todos los puntos dentro de la capa.

Sistema de coordenadas glo...



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	g	9.81	Aceleración de la gravedad. [m/s <sup>2</sup> ]
Real	n[2]	{0,1}	Vector que indica el sentido de la aceleración de la gravedad.
Real	n2[2]	{1,0}	

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM_b	

### Modelica definition

```

model SistemaCoordenadas
  "Sistema de coordenadas global para todos los puntos dentro de la capa."

  //*****
  //*****
  //Conectores:
  //*****
  //*****
  FirmesCarreteras.Conectores.Mecanico cM_b;
end SistemaCoordenadas;

```

```

//*****
//*****
//Parámetros visibles:
//*****
//*****
//Parámetros:
parameter Real g( unit="m/s2") = 9.81 "Aceleración de la gravedad.";
parameter Real n[2]= {0,1}
"Vector que indica el sentido de la aceleración de la gravedad.";
parameter Real n2[2]= {1,0};

//*****
//*****
//Variables internas:
//*****
//*****
Real gravedad[2]( unit="m/s2")
"Aceleración de la gravedad en el sistema de coordenadas global.";
Real presionh[2]( unit="m/s2")
"Presiones laterales debido al confinamiento.";

//*****
//*****
//Ecuaciones:
//*****
//*****
algorithm
gravedad := g*n;
presionh := g*n2;

equation
cM_b.s = zeros(2);

end SistemaCoordenadas;

```

---

## FirmesCarreteras.Carga

Paquete que contiene los elementos necesarios para la modelización de una carga aplicada sobre un firme.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Modelo_Carga_Trafico</a>	Modelo desarrollado para simular el efecto del tráfico.
<a href="#">FuerzaAplicada</a>	Fuerza aplicada sobre el firme debido a la carga de un camión.
<a href="#">HuellaDatos</a>	Datos de la huella del vehículo.
<a href="#">DatosHuellas</a>	En esta librería guardamos los datos de las huellas más utilizadas.
<a href="#">FuerzaAplicada_2</a>	Fuerza aplicada sobre el firme debido a la carga de un camión. Para ensayos de viscoelasticidad

---

# FirmesCarreteras.Carga.Modelo\_Carga\_Trafico

Modelo desarrollado para simular el efecto del tráfico.

## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	frecuencia	FirmesCarreteras.Utiles.Func...	Frecuencia de aplicación de la carga en función de la velocidad del vehículo. [Hz]
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo.
Real	TiempoIni	1	Tiempo en el que empieza la aplicación de la carga. [s]
Real	Amplitud_z	1	Permite aumentar o disminuir la amplitud de la carga aplicada en el eje z.
Real	Amplitud_x	1	Permite aumentar o disminuir la amplitud de la carga aplicada en el eje x.
Real	Cr	0.012	Coefficiente que relaciona la carga vertical con la carga horizontal aplicada.
Real	n	1	Número de vehículos que pasan por la estructura.

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	mecanico	

## Modelica definition

```
model Modelo_Carga_Trafico
  "Modelo desarrollado para simular el efecto del tráfico."

  //*****
  // Estructura del modelo:
  //*****
protected
  FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\_Senoidal fuente_Senoidal(
    Offset=0,
    TiempoIni=TiempoIni,
    Amplitud=Amplitud_z,
```

```

    Fase=0,
    FreqHz=frecuencia,
    TiempoFin=TiempoIni + 2*n*1/(2*frecuencia));
FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal1 fuente_Senoidal1(
    Offset=0,
    TiempoIni=TiempoIni,
    Amplitud=Amplitud_x,
    FreqHz=2*frecuencia,
    Fase=0,
    TiempoFin=TiempoIni + 2*n*1/(2*frecuencia));
inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;
FirmesCarreteras.Carga.FuerzaAplicada fuerzaAplicada(DatosHuella=
    DatosHuella, Cr=Cr);
public
FirmesCarreteras.Conectores.Mecanico mecanico;

//*****
//*****
// Parámetros públicos del modelo:
//*****
//*****
// Parámetros:
public
parameter Real frecuencia( unit="Hz") =
FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.FrecuenciaCarga( 0,DatosHuella.v)
    "Frecuencia de aplicación de la carga en función de la velocidad del
vehículo.";
parameter FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1()
    "Datos de la huella del vehículo.";
parameter Real TiempoIni( unit="s") = 1
    "Tiempo en el que empieza la aplicación de la carga.";
parameter Real Amplitud_z = 1
    "Permite aumentar o disminuir la amplitud de la carga aplicada en el eje
z.";
parameter Real Amplitud_x = 1
    "Permite aumentar o disminuir la amplitud de la carga aplicada en el eje
x.";
parameter Real Cr = 0.012
    "Coeficiente que relaciona la carga vertical con la carga horizontal
aplicada.";
parameter Real n = 1 "Número de vehículos que pasan por la estructura.";

Real Modulo;

//*****
//*****
// Ecuaciones del modelo:
//*****
//*****
algorithm
Modulo := sqrt(mecanico.F[1]^2 + mecanico.F[2]^2);

equation
connect(fuente_Senoidal1.y, fuerzaAplicada.cSenal2);
connect(fuente_Senoidal.y, fuerzaAplicada.cSenal);
connect(fuerzaAplicada.cM, mecanico);

end Modelo_Carga_Trafico;

```

---

# FirmesCarreteras.Carga.FuerzaAplicada

Fuerza aplicada sobre el firme debido a la carga de un camión.

## Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo.
Real	Cr	0.012	Coefficiente de resistencia a la rodadura. Este coeficiente es la relación entre la fuerza horizontal y la carga normal a la superficie de rodadura.
Real	S	FirmesCarreteras.Utiles.Func...	Superficie de la huella que hace el neumático.

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM	Conector que trasfiere la fuerza en el eje z.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para representar la fuerza en el eje z.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal2	Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para representar la fuerza en el eje x.

## Modelica definition

```
model FuerzaAplicada
  "Fuerza aplicada sobre el firme debido a la carga de un camión."
  //*****
  //Conectores:
  //*****
  Conectores.Mecanico cM "Conector que trasfiere la fuerza en el eje z.";
  input Conectores.Senal cSenal
  "Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para
  representar la fuerza en el eje z.";
  input Conectores.Senal cSenal2
  "Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para
  representar la fuerza en el eje x.";

  //*****
  //Variables internas:
  //*****
  //Variables:
  Real f[2]( unit="N")
```

```

    "Fuerza aplicada por la carga sobre la estructura. La fuerza en el eje
horizontal es igual a la fuerza de rozamiento";

//*****
//*****
//Parámetros públicos de la clase:
//*****
//*****
//Parámetros:
parameter FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1()
    "Datos de la huella del vehículo.";
parameter Real Cr = 0.012 "Coeficiente de resistencia a la rodadura. Este
coeficiente es la relación entre la fuerza horizontal y la carga
normal a la superficie de rodadura.";

//*****
//*****
//Parámetros privados de la clase:
//*****
//*****
//Parámetros:
parameter Real S =
FirmesCarreteras.Util.es.Funciones.Superficie(DatosHuella.a)
    "Superficie de la huella que hace el neumático.";

//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas:
//*****
//*****
equation
    cM.F = -f;
    if noEvent(cSenal.Signal < 0) then
        f[1] = 0;
        f[2] = 0;
    else
        f[1] = DatosHuella.Presion*S*Cr*(cSenal2.Signal);
        f[2] = DatosHuella.Presion*S*((cSenal.Signal)^2);
    end if;

end FuerzaAplicada;

```

## FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos

Datos de la huella del vehículo.

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Presion		Presión de los neumáticos. [Pa]
Real	a		Radio de la huella o lado de la huella. [m]
Real	v		Velocidad del vehículo que pasa por el firme. [km/h]

## Modelica definition

```
record HuellaDatos "Datos de la huella del vehículo."  
  
//*****  
*****  
    //Parámetros relacionados con la huella que provoca un neumático en la  
carretera:  
//*****  
*****  
    parameter Real Presion( unit="Pa") "Presión de los neumáticos.";  
    parameter Real a( unit="m") "Radio de la huella o lado de la huella.";  
    parameter Real v( unit="km/h")  
        "Velocidad del vehículo que pasa por el firme.";  
end HuellaDatos;
```

---

## FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas

En esta librería guardamos los datos de las huellas más utilizadas.

### Package Content

Name	Description
 <a href="#">HU1</a>	
 <a href="#">HU2</a>	

---

## FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Presion	1.2e6	Presión de los neumáticos. [Pa]
Real	a	0.13	Radio de la huella o lado de la huella. [m]
Real	v	5	Velocidad del vehículo que pasa por el firme. [km/h]

## Modelica definition

```
record HU1 = FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos (  
    a=0.13,  
    Presion=1.2e6,  
    v=5);
```

---

## FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU2

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Presion	0.78e6	Presión de los neumáticos. [Pa]
Real	a	0.115	Radio de la huella o lado de la huella. [m]
Real	v	10	Velocidad del vehículo que pasa por el firme. [km/h]

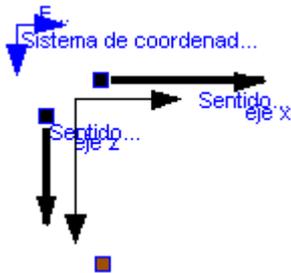
### Modelica definition

```
record HU2 = FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos (  
  a=0.115,  
  Presion=0.78e6,  
  v=10);
```

---

## FirmesCarreteras.Carga.FuerzaAplicada\_2

Fuerza aplicada sobre el firme debido a la carga de un camión. Para ensayos de viscoelasticidad



### Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo.
Real	Cr	0.012	Coefficiente de resistencia a la rodadura. Este coeficiente es la relación entre la fuerza horizontal y la carga normal a la superficie de rodadura.
Real	S	FirmesCarreteras.Utiles.Func...	Superficie de la huella que hace el neumático.

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM	Conector que trasfiere la fuerza en el eje z.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para representar la fuerza en el eje z.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal2	Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para representar la fuerza en el eje x.

## Modelica definition

```

model FuerzaAplicada_2
  "Fuerza aplicada sobre el firme debido a la carga de un camión. Para ensayos
  de viscoelasticidad"
  //*****
  //Conectores:
  //*****
  Conectores.Mecanico cM "Conector que trasfiere la fuerza en el eje z.";
  input Conectores.Senal cSenal
  "Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para
  representar la fuerza en el eje z.";
  input Conectores.Senal cSenal2
  "Conector para recibir la señal de entrada del generador de fuerzas para
  representar la fuerza en el eje x.";

  //*****
  //Variables internas:
  //*****
  //Variables:
  Real f[2]( unit="N")
  "Fuerza aplicada por la carga sobre la estructura. La fuerza en el eje
  horizontal es igual a la fuerza de rozamiento";

  //*****
  //Parámetros públicos de la clase:
  //*****
  //Parámetros:
  parameter FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos DatosHuella=
  FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1\(\)
  "Datos de la huella del vehículo.";
  parameter Real Cr = 0.012 "Coeficiente de resistencia a la rodadura. Este
  coeficiente es la relación entre la fuerza horizontal y
  la carga normal a la superficie de rodadura.";

  //*****
  //Parámetros privados de la clase:
  //*****
  //Parámetros:
  parameter Real S =
FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Superficie(DatosHuella.a)

```

```

"Superficie de la huella que hace el neumático.";

//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas:
//*****
//*****
equation
  cM.F = -f;
  //if noEvent(cSenal.Signal < 0) then
    //f[1] = 0;
    //f[2] = 0;
  //else
    f[1] = DatosHuella.Presion*S*Cr*(cSenal2.Signal);
    f[2] = DatosHuella.Presion*S*((cSenal.Signal));
  //end if;

end FuerzaAplicada_2;

```

## [FirmesCarreteras.Estructura](#)

Paquete que contiene los elementos que conforman el firme.

### Package Content

Name	Description
<input type="checkbox"/> <a href="#">Componentes</a>	Librería que contiene los componentes elementales que forman las capas de la estructura.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Comportamientos</a>	Paquete que contiene los elementos que modelizan el comportamiento mecánico, térmico o inercial de las capas de una estructura de firme.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Sub_Capas</a>	Parte elemental de una capa. Está formada por comportamientos en dos direcciones.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Capas</a>	Paquete que contiene la modelización de las distintas capas que pueden conformar el firme.

## [FirmesCarreteras.Estructura.Componentes](#)

Librería que contiene los componentes elementales que forman las capas de la estructura.

### Package Content

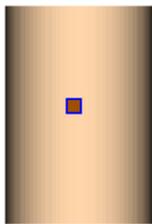
Name	Description
<a href="#">ElementoInercial</a>	Elemento que representa la posición dentro de un material.
<a href="#">ElementoElastico</a>	Elemento que representa un comportamiento elástico de un

	material.
<a href="#">ElementoViscoso</a>	Elemento que representa un material puramente viscoso.
<a href="#">ElementoViscoElastico</a>	Elemento viscoelástico siguiendo el modelo de Kelvin-Voight.
<a href="#">ElementoTermicoResistivo</a>	Elemento térmico para tener en cuenta la conducción de calor dentro de la capa.
<a href="#">ElementoTermicoCapacitivo</a>	Elemento que sirve para describir la temperatura en ese volumen de control.

## [FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoInercial](#)

Elemento que representa la posición dentro de un material.

Masa concentr...



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	rho		Densidad del material. [kg/m3]
Real	dy		Longitud del elemento de material. [m]
Real	S		Superficie del material. [m2]
Real	pos		Posición vertical dentro de la capa del elemento. [m]
Real	r_ini[2]		Posición inicial con respecto al sistema de coordenadas global. [m]
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM	

### Modelica definition

```
model ElementoInercial
```

```
  "Elemento que representa la posición dentro de un material."
```

```
//*****  
*****
```

```

//Conectores para interactuar con el exterior:
//*****
*****
FirmesCarreteras.Conectores.Mecanico cM;

//*****
*****
//Sistema de coordenadas de referencia global:
//*****
*****
outer FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

//*****
*****
//Variables internas de la clase:
//*****
*****
//Variables continuas:
Real s[2]( unit="m", start=r_ini, fixed=Inercia)
    "Posición del elemento de la capa.";
Real v[2]( unit="m/s", start={0,0}) "Velocidad de la masa de la capa.";
Real a[2]( unit="m/s2", start={0,0}) "Aceleración de la masa de la capa.";
//Variables discretas:
discrete Real peso_v( unit="Pa", start=0)
    "Tensión superficial normal con dirección en el eje z sobre el elemento
inercial debido a la fuerza de gravedad.";

//*****
*****
//Parámetros públicos de la clase:
//*****
*****
//Parámetros:
parameter Real rho( unit="kg/m3") "Densidad del material.";
parameter Real dy( unit="m") "Longitud del elemento de material.";
parameter Real S( unit="m2") "Superficie del material.";
parameter Real pos( unit="m")
    "Posición vertical dentro de la capa del elemento.";
parameter Real r_ini[2]( unit="m")
    "Posición inicial con respecto al sistema de coordenadas global.";
parameter Boolean Inercia = true
    "Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.";

//*****
*****
//Ecuaciones constitutivas que relacionan las variables de la clase:
//*****
*****
algorithm
when initial() then
    peso_v := FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Longitud(dy*rho*Sist.gravedad);
end when;

when time>0.9 then
    reinit(s, r_ini);
    reinit(v, {0,0});
    peso_v :=0;
end when;

equation
cM.s = s;

```

```

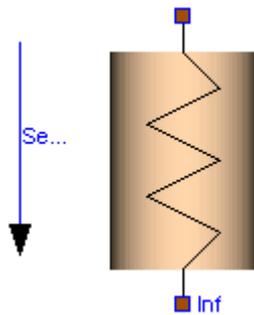
if noEvent(Inercia) then
  v = der(s);
  a = der(v);
  cM.F[1]/(S) = rho*dy*(a[1]);
  cM.F[2]/(S) = (rho*dy*(a[2]+peso_v/(dy*rho)));
else
  v = {0,0};
  a = {0,0};
  cM.F = {0,0};
end if;

end ElementoInercial;

```

## FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoElastico

Elemento que representa un comportamiento elástico de un material.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	s_small	1e-6	
Real	r_inicio[2]		Vector unitario que marca la dirección inicial del elemento con respecto al plano del conector cMsup. [m]
Real	dy		Longitud del elemento sin aplicación de fuerza sobre él. [m]
Real	S		Superficie de la huella del neumático. [m2]
Initialization			
Real	f.start	0	Fuerza actuando en cada uno de los planos de control. Positiva si actúa en el plano cMinf y dirigida de cMsup a cMinf. [N]

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.

### Modelica definition

```

model ElementoElastico
  "Elemento que representa un comportamiento elástico de un material."

  /*******
  *****/
  //Herencia:
  /*******
  *****/
  extends Interfaces.DosConectoresMecanicos;

  /*******
  *****/
  //Variables internas de la clase:
  /*******
  *****/
  //Variables continuas:
  Real def( unit="def", start=0, fixed=false)
    "Deformación producida por la fuerza ejercida sobre el elemento.";
  //Variables discretas:
  discrete Real Ke( unit="N/m2") "Módulo elástico del material.";

  /*******
  *****/
  //Parámetros públicos de la clase:
  /*******
  *****/
  //Parámetros:
  parameter Real dy(unit="m")
    "Longitud del elemento sin aplicación de fuerza sobre él.";
  parameter Real S(unit="m2") "Superficie de la huella del neumático.";

  /*******
  *****/
  //Ecuaciones constitutivas que relacionan las variables de la clase:
  /*******
  *****/

equation
  def=(epsilon-dy)/dy;
  f = Ke*S*def;

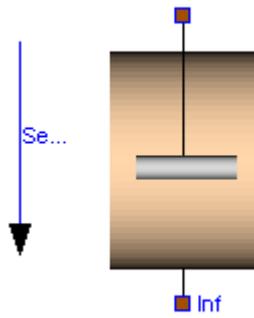
end ElementoElastico;

```

---

## Firmes Carreteras. Estructura. Componentes. Elemento Viscoso

**Elemento que representa un material puramente viscoso.**



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	s_small	1e-6	
Real	r_inicio[2]		Vector unitario que marca la dirección inicial del elemento con respecto al plano del conector cMsup. [m]
Real	S		Superficie de la huella del neumático. [m <sup>2</sup> ]
Initialization			
Real	f.start	0	Fuerza actuando en cada uno de los planos de control. Positiva si actúa en el plano cMinf y dirigida de cMsup a cMinf. [N]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

model ElementoViscoso
  "Elemento que representa un material puramente viscoso."

  //*****
  //Herencia:
  //*****
  extends Interfaces.DosConectoresMecanicos;

  //*****
  //Variables internas de la clase:
  //*****
  //Variables continuas:
  Real v( start=0, unit="m/s2") "Velocidad de deformación.";
  Real def( unit="def", start=0, fixed=false)
    "Deformación producida por la fuerza ejercida sobre el elemento.";
  //Variables discretas:
  discrete Real b( unit="Pa·s/m") "Coeficiente de viscosidad del material.";

```

```

//*****
//*****
//Parámetros públicos de la clase:
//*****
//*****
//Parámetros:
parameter Real S(unit="m2") "Superficie de la huella del neumático.";

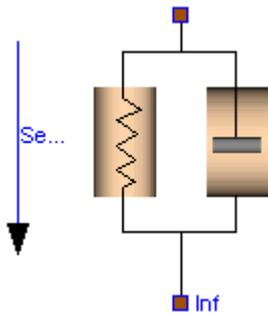
//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas que relacionan las variables de la clase:
//*****
//*****
equation
def = epsilon;
v = der(def);
f = b*S*v;

end ElementoViscoso;

```

## FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoViscoElastico

Elemento viscoelástico siguiendo el modelo de Kelvin-Voight.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	dy		Longitud del elemento en reposo. [m]
Real	S		Superficie de la huella del neumático. [m2]
Real	r_inicio[2]		Vector que marca la dirección y el sentido inicial del componente en el sistema de coordenadas global.

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.

Mecanico	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
----------	-------	--

## Modelica definition

```
model ElementoViscoElastico
  "Elemento viscoelástico siguiendo el modelo de Kelvin-Voight."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.DosConectoresMecanicosSolo;

  //*****
  //*****
  //Estructura interna de la clase: Está formada por elementos atómicos.
  //*****
  //*****
  FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoElastico elementoElastico(
    dy=dy,
    S=S,
    r_inicio=r_inicio) "Elemento elástico";
  FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoViscoso elementoViscoso(
    S=S, r_inicio=r_inicio) "Elemento viscoso";

  //*****
  //*****
  //Parámetros públicos de la clase:
  //*****
  //*****
  //Parámetros:
  parameter Real dy( unit="m") "Longitud del elemento en reposo.";
  parameter Real S( unit="m2", start=0.053)
    "Superficie de la huella del neumático.";
  parameter Real r_inicio[2]
    "Vector que marca la dirección y el sentido inicial del componente en el
    sistema de coordenadas global.";

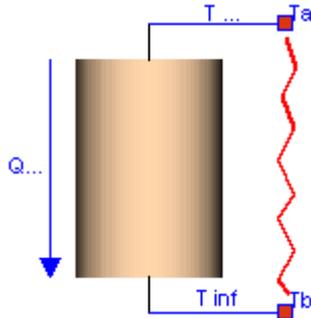
  //*****
  //*****
  //Ecuaciones constitutivas que relacionan las variables de la clase:
  //*****
  //*****
equation
  connect(cMsup, elementoElastico.cMsup);
  connect(cMsup, elementoViscoso.cMsup);
  connect(elementoElastico.cMsup, elementoViscoso.cMsup);
  connect(elementoElastico.cMinf, elementoViscoso.cMinf);
  connect(elementoElastico.cMinf, cMinf);
  connect(elementoViscoso.cMinf, cMinf);

end ElementoViscoElastico;
```

---

# Firmes Carreteras. Estructura. Componentes. Elemento Térmico Resistivo

Elemento térmico para tener en cuenta la conducción de calor dentro de la capa.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	K		Conductividad térmica del material. [W/(m·°C)]
Real	dy		Longitud del elemento resistivo dentro de la capa sólida. [m]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

model ElementoTermicoResistivo
  "Elemento térmico para tener en cuenta la conducción de calor dentro de la
  capa."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.DosConectoresTermicos;

  //*****
  //*****
  //Variables internas de la clase:
  //*****
  //*****
  //Variables:
  Real Qf_c( unit="W/m2")
  "Flujo de calor debido a la conducción dentro del sólido por unidad de
  superficie.";

```

```

//*****
*****
//Parámetros públicos de la clase:
//*****
*****
//Parámetro:
parameter Real K( start = 1.5, unit="W/(m·°C)")
    "Conductividad térmica del material.";
parameter Real dy( start=0.01, unit="m")
    "Longitud del elemento resistivo dentro de la capa sólida.";

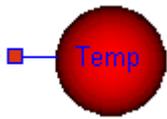
//*****
*****
//Ecuaciones constitutivas que relacionan las variables de la clase:
//*****
*****
equation
    Q_flujo = Qf_c;
    Qf_c*dy = K*dT;

end ElementoTermicoResistivo;

```

## FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoTermico oCapacitivo

Elemento que sirve para describir la temperatura en ese volumen de control.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	C	Datos.rho*Datos.Cp	Capacidad térmica del material. [kg/m3]
Real	deltax	0.01	Longitud del elemento diferencial de la superficie del firme. [m]
<a href="#">CapaDatos</a>	Datos		Datos térmicos del material.

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cT	

### Modelica definition

```

model ElementoTermicoCapacitivo
  "Elemento que sirve para describir la temperatura en ese volumen de control."
  Conectores.Termico cT;

  /*******
  *****/
  //Variables internas de la clase:
  /*******
  *****/
  //Variables:
  Real T(start=20, unit="°C") "Temperatura del elemento almacenador de calor.";

  /*******
  *****/
  //Parámetros públicos de la clase:
  /*******
  *****/
  //Parámetros:
  parameter Real C( unit="kg/m3") = Datos.rho*Datos.Cp
    "Capacidad térmica del material.";
  parameter Real deltax( unit="m") = 0.01
    "Longitud del elemento diferencial de la superficie del firme.";
  parameter FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos Datos
    "Datos térmicos del material.";

  /*******
  *****/
  //Ecuaciones constitutivas que relacionan las variables de la clase:
  /*******
  *****/
equation
  cT.T = T;
  C*deltax*der(T) = cT.Qt;

end ElementoTermicoCapacitivo;

```

## **[FirmesCarreteras.Estructura](#).Comportamientos**

**Paquete que contiene los elementos que modelizan el comportamiento mecánico, térmico o inercial de las capas de una estructura de firme.**

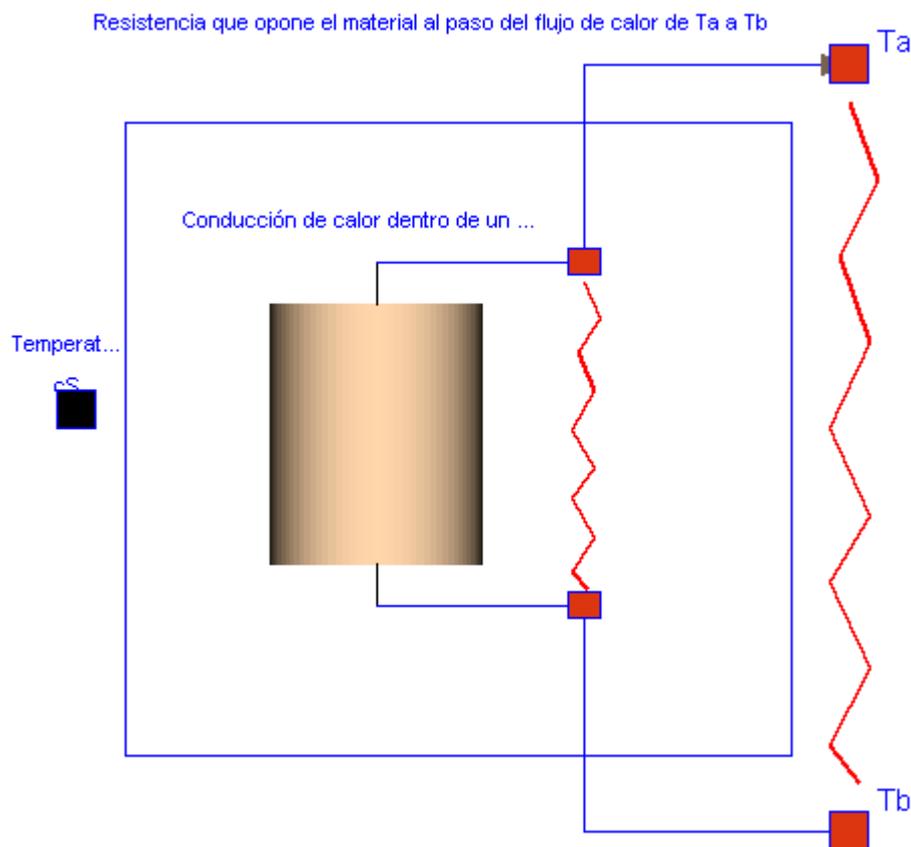
### **Package Content**

Name	Description
<a href="#">Comp_TermicoResistivo</a>	Modelización de la propagación de la temperatura a través del material de la capa.
<a href="#">Comp_TermicoResistivoCapacitivo</a>	Modelización de la propagación de la temperatura a través del material de la capa considerando el tiempo de aumento de la temperatura..
<a href="#">Comp_Inercial</a>	Modelo que simula el comportamiento inercial de un material.
<a href="#">Comp_Elastico</a>	Modelo que simula el comportamiento elástico de un

	material.
<input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">Comp_ViscoElastico</a>	Modelo que simula el comportamiento visco-elástico de un material. Está construido a partir del elemento atómico ElementoViscoElastico.
<input type="checkbox"/> <a href="#">Amortiguamiento</a>	Representa el amortiguamiento estructural de la sub-capas.

## FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp\_TermicoResistivo

Modelización de la propagación de la temperatura a través del material de la capa.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está usando.
Real	dy		Longitud del elemento resistivo dentro de la capa sólida. [m]

### Connectors

Type	Name	Description
------	------	-------------

<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.
output <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para enviar la señal de la temperatura en esa posición dentro de la capa de firme.

## Modelica definition

```

model Comp_TermicoResistivo
  "Modelización de la propagación de la temperatura a través del material de la
  capa."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.ComportamientoTermico;

  //*****
  //*****
  //Estructura interna del comportamiento: elementos atómicos que lo forman.
  //*****
  //*****

protected
  Componentes.ElementoTermicoResistivo ETR(K=DatosCapa.k, dy=dy);

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
  //*****

equation
  connect(ETR.cTsup, cTsup);
  connect(ETR.cTinf, cTinf);
  cSenal.Signal=(cTsup.T+cTinf.T)/2;

end Comp_TermicoResistivo;

```

---

# FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp\_TermicoResistivoCapacitivo

Modelización de la propagación de la temperatura a través del material de la capa considerando el tiempo de aumento de la temperatura..

## Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está usando.
Real	dy		Longitud del elemento resistivo dentro de la capa sólida. [m]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.
output <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para enviar la señal de la temperatura en esa posición dentro de la capa de firme.

## Modelica definition

```
model Comp_TermicoResistivoCapacitivo
  "Modelización de la propagación de la temperatura a través del material de la
  capa considerando el tiempo de aumento de la temperatura.."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.ComportamientoTermico;

  //*****
  //*****
  //Estructura interna del comportamiento: elementos atómicos que lo forman.
  //*****
  //*****
protected
  Componentes.ElementoTermicoResistivo ETR(K=DatosCapa.k, dy=dy);

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
  //*****
public
```

```

Componentes.ElementoTermicoCapacitivo
elementoTermicoCapacitivo(Datos=DatosCapa);
Componentes.ElementoTermicoCapacitivo
elementoTermicoCapacitivo1(Datos=DatosCapa);
equation
connect(ETR.cTsup, cTsup);
connect(ETR.cTinf, cTinf);
cSenal.Signal=(cTsup.T+cTinf.T)/2;

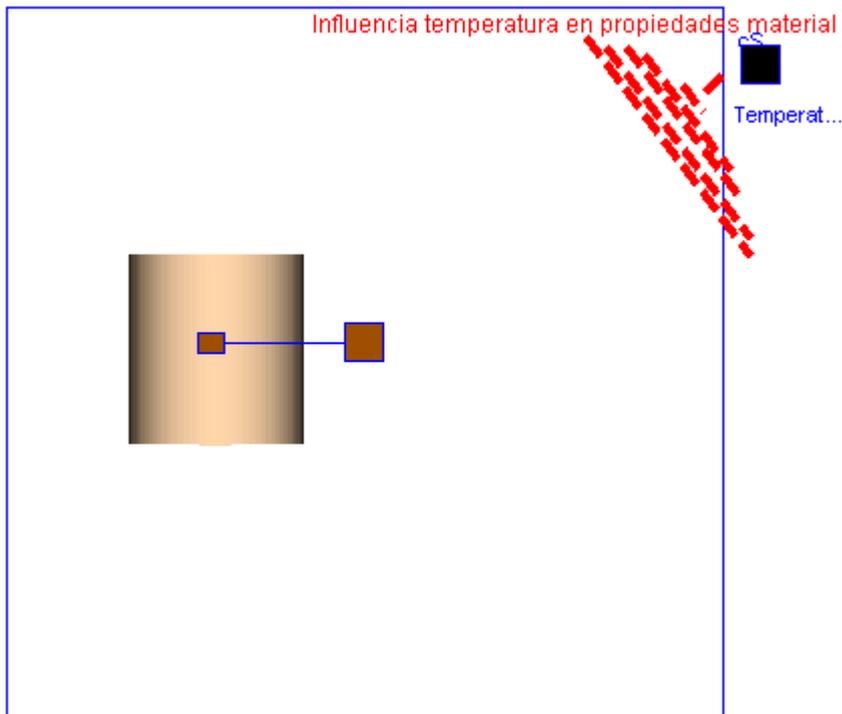
connect(elementoTermicoCapacitivo.cT, ETR.cTsup);
connect(elementoTermicoCapacitivo1.cT, ETR.cTinf);
end Comp_TermicoResistivoCapacitivo;

```

---

## FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp\_Inercial

Modelo que simula el comportamiento inercial de un material.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está usando.
Real	pos		Posición vertical dentro de la capa del elemento. [m]
Real	dz		Longitud en reposo del componente de la capa, se trata del espesor del elemento. [m]
Real	S		Superficie de la huella. [m2]

Real	N_comp[2]	{1,1}	Número de componentes en serie en el eje x y en el z respectivamente.
Real	r_ini[2]		Posición del elemento inercial con respecto al sistema de coordenadas global. [m]
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM	
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para recibir la señal de entrada correspondiente con la temperatura.

## Modelica definition

```

model Comp_Inercial
  "Modelo que simula el comportamiento inercial de un material."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends FirmesCarreteras.Interfaces.ComportamientoInercial;

  //*****
  //*****
  //Estructura interna del comportamiento: elementos atómicos que lo forman.
  //*****
  //*****
protected
  FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoInercial EI(
    rho=rho,
    dy=dh,
    S=S,
    r_ini=r_ini,
    pos=pos,
    Inercia=Inercia) "Elementos inerciales que conforman la capa.";

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
  //*****
equation
  connect(EI.cM, cM);

end Comp_Inercial;

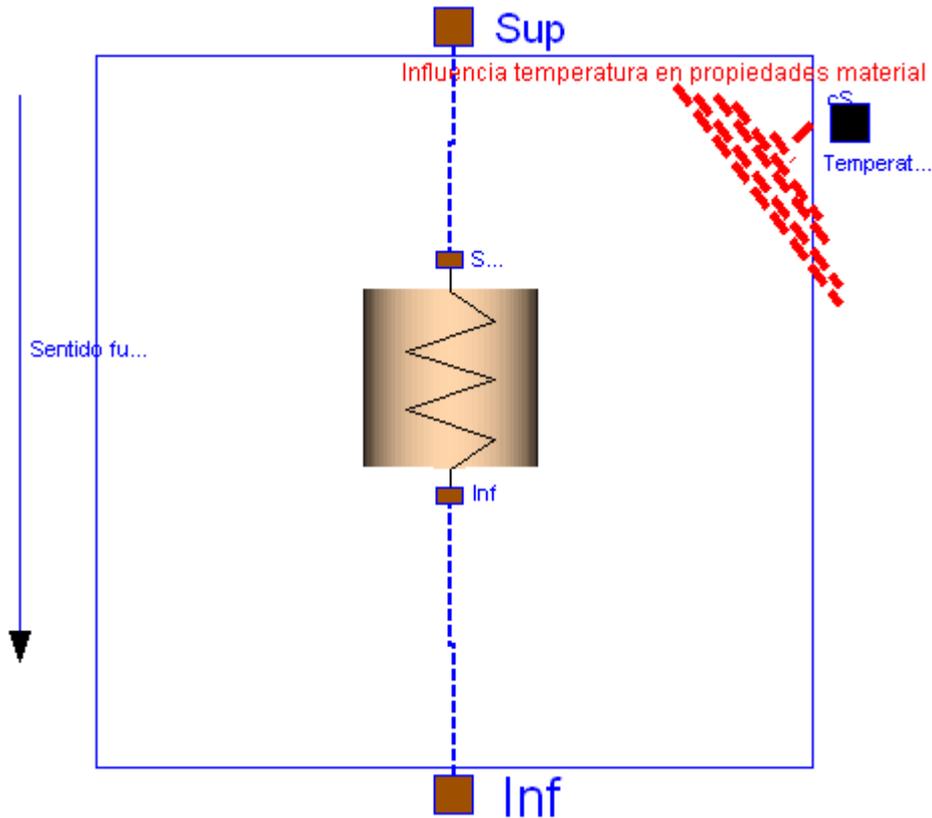
```

---

# Firmes Carreteras. Estructura. Comportamientos. Comp\_Elasti

CO

Modelo que simula el comportamiento elástico de un material.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está usando.
Real	dy		Espesor del comportamiento mecánico. [m]
Real	S		Superficie de la huella. [m2]
Real	N_comp[2]	{1,1}	Número de componentes atómicos en serie en el eje x y en el eje z respectivamente.
Real	r_inicio[2]		Posición inicial del componente en el sentido del conector cMsup al cMinf.
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Integer	Posicion	3	Indica la posición dentro de la capa.
Boolean	Capa	true	Indica que el componente se encuentra en capa.
<b>Initialization</b>			
Real	dTemp.start	0	Derivada con respecto al tiempo de la temperatura. [°C/s]

Real	Def.start	0	Deformación del elemento. [def]
------	-----------	---	---------------------------------

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para recibir la señal de entrada correspondiente con la temperatura.

## Modelica definition

```

model Comp_Elastico
  "Modelo que simula el comportamiento elástico de un material."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends FirmesCarreteras.Interfaces.ComportamientoMecanico;

  //*****
  //*****
  //Estructura interna del comportamiento: elementos atómicos que lo forman.
  //*****
  //*****
protected
  FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoElastico elementoElastico(
    dy=dh,
    S=S,
    r_inicio=dh*r_inicio);

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
  //*****
equation

  when time>0.5 then
    //Se dispara la condición de evento de variación del módulo con la
    profundidad:
    elementoElastico.Ke = FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloProfundidad(
      dy,
      Sist.gravedad[2],
      DatosCapa,
      Suelo,
      Posicion,
      pre(cMsup.F[2])/S,
      Capa);

  end when;

  connect(elementoElastico.cMsup, cMsup);
  connect(elementoElastico.cMinf, cMinf);

```

```

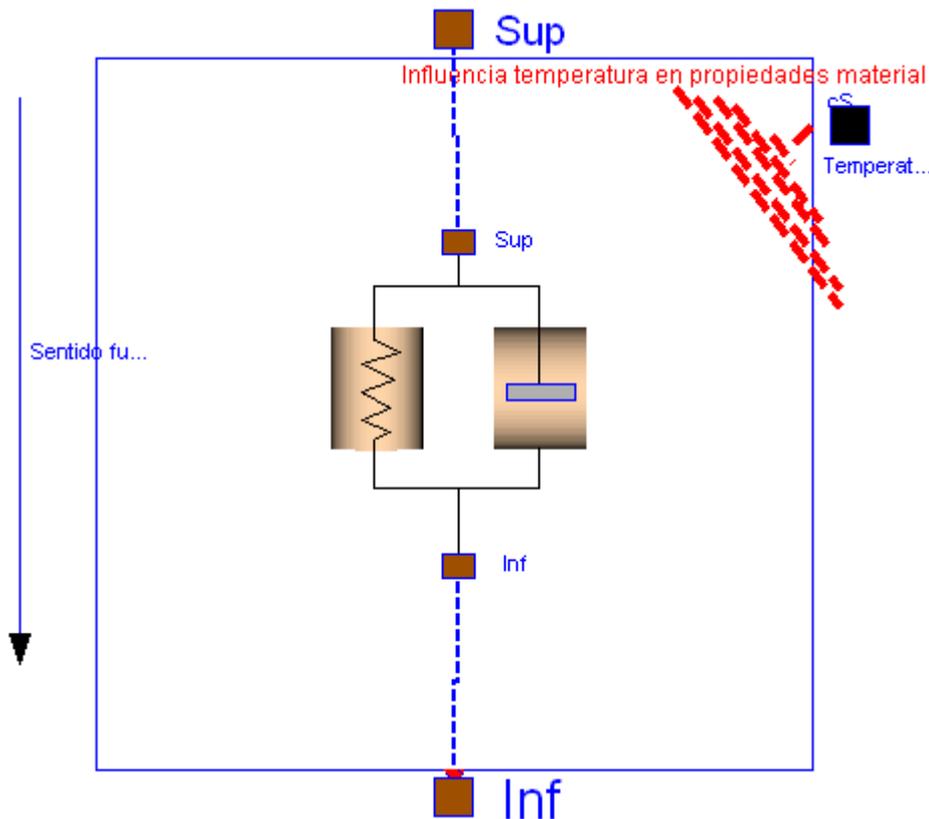
initial equation
  //Variación del módulo elástico con la profundidad:
  pre(elementoElastico.Ke) =
    FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloProfundidad(
      dy,
      Sist.gravedad[2],
      DatosCapa,
      Suelo,
      Posicion,
      cMsup.F[2]/S,
      Capa);

end Comp_Elastico;

```

## FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp\_ViscoElastico

Modelo que simula el comportamiento visco-elástico de un material. Está construido a partir del elemento atómico ElementoViscoElastico.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está

			usando.
Real	dy		Espesor del comportamiento mecánico. [m]
Real	S		Superficie de la huella. [m2]
Real	N_comp[2]	{1,1}	Número de componentes atómicos en serie en el eje x y en el eje z respectivamente.
Real	r_inicio[2]		Posición inicial del componente en el sentido del conector cMsup al cMinf.
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Integer	Posicion	3	Indica la posición dentro de la capa.
Boolean	Capa	true	Indica que el componente se encuentra en capa.
Real	Frecload	1	Frecuencia de carga. [Hz]
Real	Tref	20	Temperatura de referencia para el cálculo del módulo dinámico de la mezcla. [°C]
Real	desfase	DatosCapa.desfase	Desfase del módulo dinámico de la mezcla. [°]
Real	n	3	Periodo de tiempo para lanzar el evento.
Boolean	Cambio	true	Parámetro introducido para la validación del componente.
<b>Initialization</b>			
Real	dTemp.start	0	Derivada con respecto al tiempo de la temperatura. [°C/s]
Real	Def.start	0	Deformación del elemento. [def]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para recibir la señal de entrada correspondiente con la temperatura.

## Modelica definition

```
model Comp_ViscoElastico
```

```
  "Modelo que simula el comportamiento visco-elástico de un material. Está construido a partir del elemento atómico ElementoViscoElastico."
```

```
  //*****  
  *****
```

```
  //Herencia:
```

```
  //*****  
  *****
```

```
  extends FirmesCarreteras.Interfaces.ComportamientoMecanico;
```

```

//*****
//*****
//Estructura interna del comportamiento: elementos atómicos que lo forman.
//*****
//*****
protected
  Estructura.Componentes.ElementoViscoElastico EVL1(dy=dh, S=S,
    r_inicio=dh*r_inicio)
    "Elementos atómicos que conforman el tipo de comportamiento del material.";

//*****
//*****
//Parámetros internos:
//*****
//*****
public
  parameter Real Frecload( unit="Hz") = 1 "Frecuencia de carga.";
  parameter Real Tref( unit="°C") = 20
    "Temperatura de referencia para el cálculo del módulo dinámico de la
mezcla.";
  parameter Real desfase( unit="°") = DatosCapa.desfase
    "Desfase del módulo dinámico de la mezcla.";
  parameter Real n = 3 "Periodo de tiempo para lanzar el evento.";
  parameter Boolean Cambio=true
    "Parámetro introducido para la validación del componente.";

//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas de la clase:
//*****
//*****
equation
  connect(EVL1.cMsup, cMsup);
  connect(EVL1.cMinf, cMinf);
  when sample(0,n) then

    if noEvent(dTemp>0 or dTemp<0 or Cambio) then
      //Se dispara la condición de evento de variación de los módulos con la
temperatura y la frecuencia de la carga:
      EVL1.elementoElastico.Ke =
10^6*FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloTemperaturaFrecuencia(
        Temp,
        Frecload,
        Tref)*Modelica.Math.cos(desfase*2*3.1415/360);
      EVL1.elementoViscoso.b =
10^6*FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.ModuloTemperaturaFrecuencia(
        Temp,
        Frecload,
        Tref)*Modelica.Math.sin(desfase*2*3.1415/360)/(2*3.1415*Frecload);
    else
      EVL1.elementoViscoso.b=pre(EVL1.elementoViscoso.b);
      EVL1.elementoElastico.Ke = pre(EVL1.elementoElastico.Ke);
    end if;
  end when;

initial equation
  //Valor inicial de los módulos:
  pre(EVL1.elementoElastico.Ke) = Mc;
  //Valor del módulo de viscosidad:
  pre(EVL1.elementoViscoso.b) = b;

```

```
end Comp_ViscoElastico;
```

---

## Firmes Carreteras. Estructura. Comportamientos. Amortiguamiento

Representa el amortiguamiento estructural de la sub-capas.

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	pos	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa. [m]
Real	amort_x	0.35	Parámetro de ajuste de la amortiguación del material en horizontal.
Real	amort_z	0.35	Parámetro de ajuste de la amortiguación del material en vertical.
Real	masa		Masa del elemento.
Real	E		Módulo elástico del material.
Real	Poisson		Coefficiente de Poisson del material.

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.

### Modelica definition

```
model Amortiguamiento
  "Representa el amortiguamiento estructural de la sub-capas."
  extends Interfaces.AdherenciaMecanica;

  parameter Real amort_x = 0.35
    "Parámetro de ajuste de la amortiguación del material en horizontal.";
  parameter Real amort_z = 0.35
    "Parámetro de ajuste de la amortiguación del material en vertical.";
  parameter Real masa "Masa del elemento.";
  parameter Real E "Módulo elástico del material.";
  parameter Real Poisson "Coeficiente de Poisson del material.";

  Real f[2](unit="N") "Fuerza dentro del elemento.";
  Real s[2](unit="m") "Distancia relativa entre conectores.";
  Real v[2](unit="m/s", start={0,0}) "Velocidad relativa entre conectores.";

equation
  s = cMinf.s - cMsup.s;
```

```
v = der(s);

//Simplificación:
f[1] = (amort_x*(E/(2*(1+Poisson)))+masa)*v[1];
f[2] = (amort_z*(E/(3*(1-2*Poisson)))+masa)*v[2];

cMinf.F = f;
cMsup.F = -f;

end Amortiguamiento;
```

---

## [FirmesCarreteras.Estructura.Sub\\_Capas](#)

Parte elemental de una capa. Está formada por comportamientos en dos direcciones.

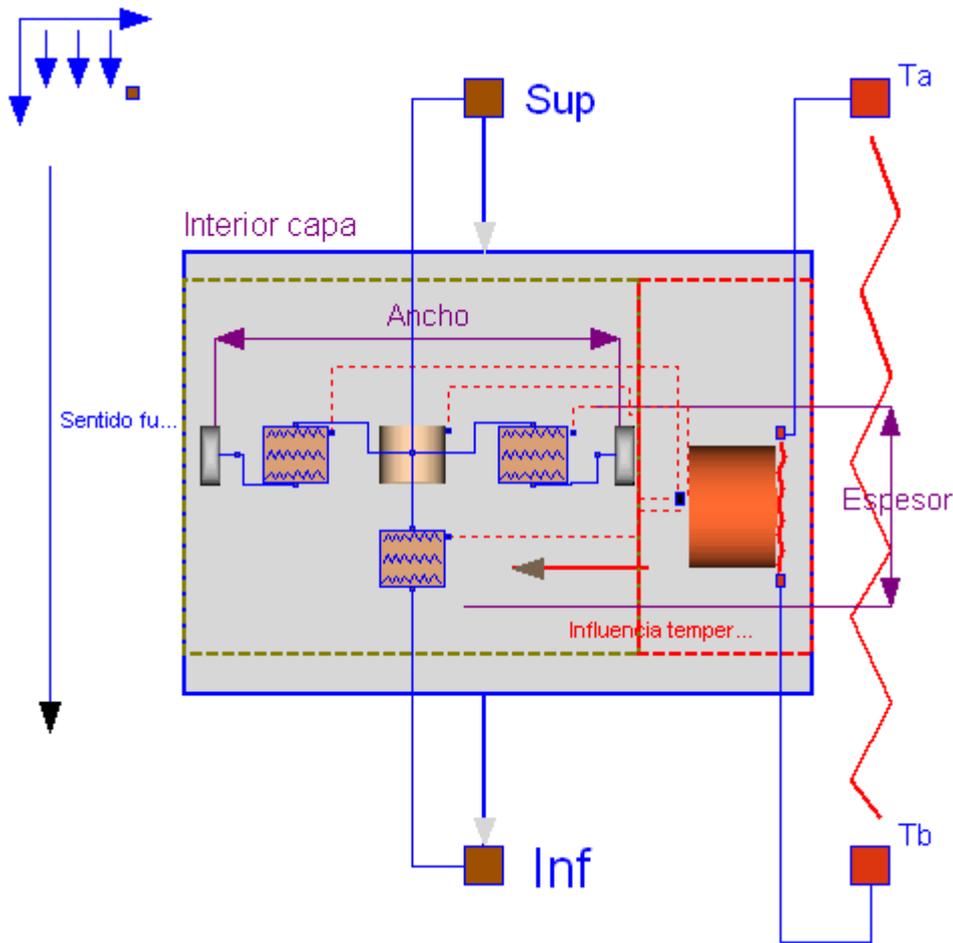
### Package Content

Name	Description
<a href="#">sub_CapaElastica</a>	Sub-Capa que modeliza el comportamiento elástico de un material.
<a href="#">sub_CapaViscoElastica</a>	Sub-Capa que modela el comportamiento viscoelástico de un material.

---

# Firmes Carreteras. Estructura. Sub Capas. sub\_CapaElastica

Sub-Capa que modeliza el comportamiento elástico de un material.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
replaceable model	Comp_Izquierda	<a href="#">Comp_Elastico</a>	
replaceable model	Comp_Derecha	<a href="#">Comp_Elastico</a>	
replaceable model	Comp_Profundidad	<a href="#">Comp_Elastico</a>	
replaceable model	Comp_Inercial	<a href="#">Comp_Inercial</a>	
replaceable model	ComportamientoT	<a href="#">Comp_TermicoResistivo</a>	
Real	Espesor	0	Espesor de la sub-capa. [m]
Real	Ancho	2*DatosHuella.a	Longitud entre la pared izquierda y la pared derecha.

			Es el ancho de la suma de los dos componentes en el eje x. [m]
Real	posicion_capa	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la sub-capa. [m]
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Real	numero_subcapa		Indica la posición dentro de la capa empezando por 0.
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo que pasa sobre la sub-capa.
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa	FirmesCarreteras.Estructura....	Datos del material que conforma la sub-capa que se está usando.
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.
Boolean	Capa	false	Indica que el componente se encuentra en capa.
Real	amort_x	DatosCapa.Amort_x	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	amort_z	DatosCapa.Amort_z	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.
Real	angulo	26.6	Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre 0° y 90°. [°]
<b>Initialization</b>			
Real	Deflexion.start	0	Desplazamiento del elemento de inercia en el eje z. [m]
Real	Def_long_izq.start	0	Deformación producida en el eje x en el sentido positivo. Compresiones serán negativas, tracciones positivas. [def]
Real	Def_long_der.start	0	Deformación producida en el eje x en el sentido negativo. Compresiones serán negativas, tracciones positivas. [def]
Real	Def_vert.start	0	Deformación vertical producida en el eje z.

			Compresiones serán negativas y tracciones positivas. [def]
Real	Def_long.start	0	Deformación producida en el eje x. Compresiones serán negativas, tracciones positivas. [def]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

model sub_CapaElastica
  "Sub-Capa que modeliza el comportamiento elástico de un material."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends FirmesCarreteras.Interfaces.Sub\_Capa;

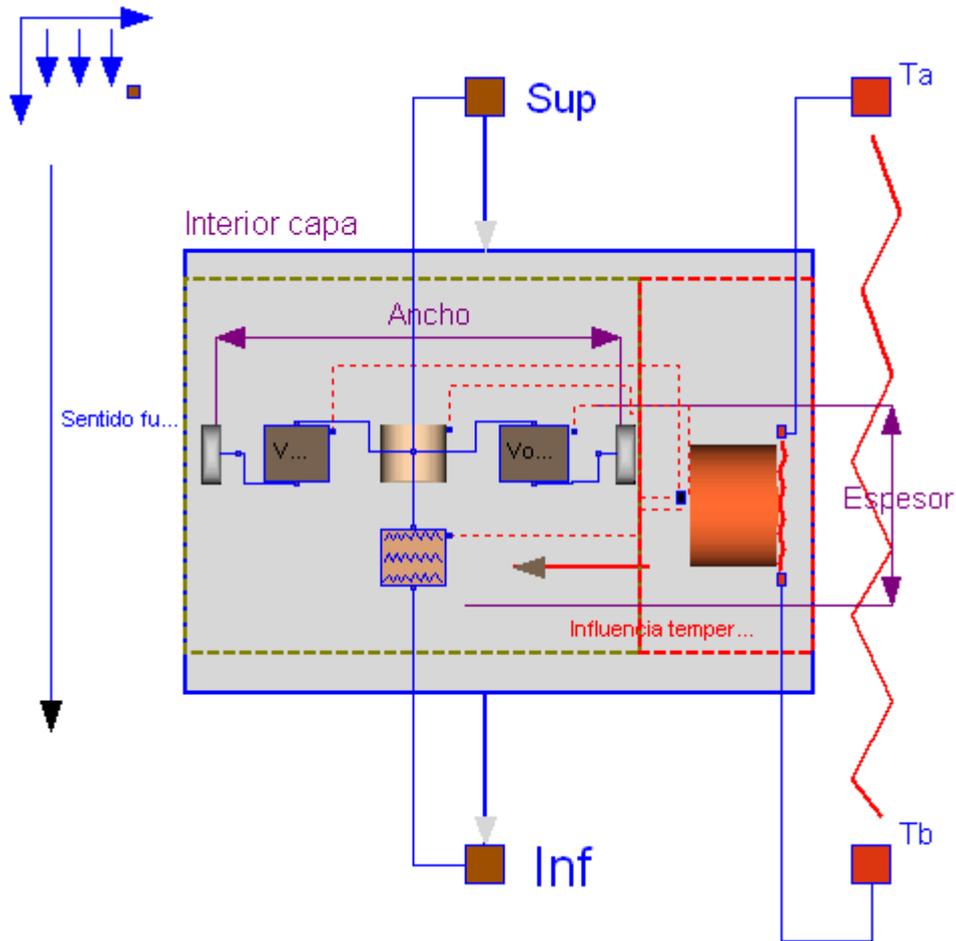
end sub_CapaElastica;

```

---

# FirmesCarreteras.Estructura.Sub\_Capas.sub\_CapaViscoElastica

Sub-Capa que modela el comportamiento viscoelástico de un material.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
replaceable model	Comp_Izquierda	<a href="#">Comp_Elastico</a>	
replaceable model	Comp_Derecha	<a href="#">Comp_Elastico</a>	
replaceable model	Comp_Profundidad	<a href="#">Comp_Elastico</a>	
replaceable model	Comp_Inercial	<a href="#">Comp_Inercial</a>	
replaceable model	ComportamientoT	<a href="#">Comp_TermicoResistivo</a>	
Real	Espesor	0	Espesor de la sub-capa. [m]

Real	Ancho	2*DatosHuella.a	Longitud entre la pared izquierda y la pared derecha. Es el ancho de la suma de los dos componentes en el eje x. [m]
Real	posicion_capa	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la sub-capa. [m]
Boolean	Suelo	false	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Real	numero_subcapa		Indica la posición dentro de la capa empezando por 0.
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo que pasa sobre la sub-capa.
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa	FirmesCarreteras.Estructura....	Datos del material que conforma la sub-capa que se está usando.
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.
Boolean	Capa	false	Indica que el componente se encuentra en capa.
Real	amort_x	DatosCapa.Amort_x	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	amort_z	DatosCapa.Amort_z	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.
Real	angulo	26.6	Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre 0° y 90°. [°]
Real	n	1	Cada cierto tiempo n se dispara una condición de evento para ver si la temperatura ha variado.
<b>Initialization</b>			
Real	Deflexion.start	0	Desplazamiento del elemento de inercia en el eje z. [m]
Real	Def_long_izq.start	0	Deformación producida en el eje x en el sentido positivo. Compresiones serán negativas, tracciones positivas. [def]

Real	Def_long_der.start	0	Deformación producida en el eje x en el sentido negativo. Compresiones serán negativas, tracciones positivas. [def]
Real	Def_vert.start	0	Deformación vertical producida en el eje z. Compresiones serán negativas y tracciones positivas. [def]
Real	Def_long.start	0	Deformación producida en el eje x. Compresiones serán negativas, tracciones positivas. [def]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.
replaceable model	Comp_Izquierda	
replaceable model	Comp_Derecha	
replaceable model	Comp_Profundidad	

## Modelica definition

```

model sub_CapaViscoElastica
  "Sub-Capa que modela el comportamiento viscoelástico de un material."

  //*****
  //Herencia:
  //*****
  extends FirmsCarreteras.Interfaces.Sub_Capa(
    redeclare model Comp_Izquierda =
      FirmsCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_ViscoElastico,
    redeclare model Comp_Derecha =
      FirmsCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_ViscoElastico,
    redeclare model Comp_Profundidad =
      FirmsCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico,
    Suelo=false,
    CompIzq(Freeload=Freeload, n=n),
    CompDrch(Freeload=Freeload, n=n));

```

```

//*****
//*****
//Parámetros:
//*****
//*****
protected
  parameter Real Frecload( unit="Hz") =
FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.FrecuenciaCarga(
posicion_capa,DatosHuella.v)
  "Frecuencia de la carga aplicada.";
public
  parameter Real n = 1
  "Cada cierto tiempo n se dispara una condición de evento para ver si la
temperatura ha variado.";

end sub_CapaViscoElastica;

```

---

## **FirmesCarreteras.Estructura.Capas**

**Paquete que contiene la modelización de las distintas capas que pueden conformar el firme.**

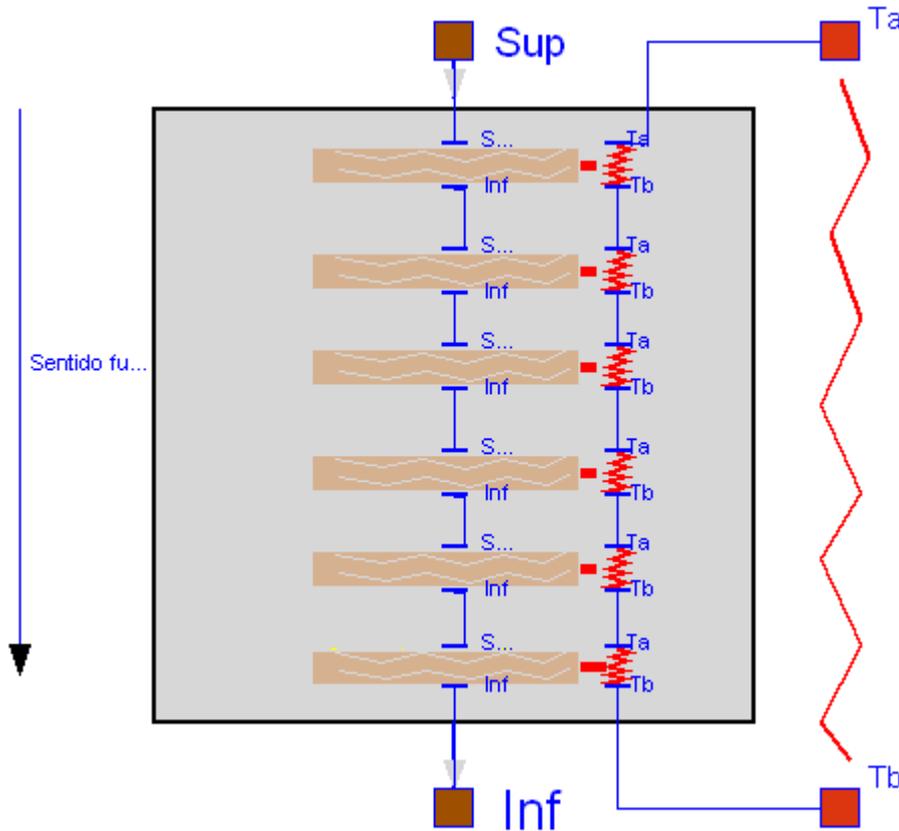
### **Package Content**

<b>Name</b>	<b>Description</b>
<a href="#">Capa_Elastica</a>	Capa formada por varias sub-capas elásticas para representar un material puramente elástico.
<a href="#">Capa_ViscoElastica</a>	Capa formada por varias sub-capas con comportamiento visco-elástico en la dirección del eje x y comportamiento elástico en la dirección del eje z para representar una mezcla bituminosa.
<a href="#">CapaDatos</a>	Datos de los materiales que conforman las capas.
<a href="#">DatosMateriales</a>	En esta librería guardamos los datos de los materiales más utilizados.

---

## FirmesCarreteras.Estructura.Capas.Capa\_Elastica

Capa formada por varias sub-capas elásticas para representar un material puramente elástico.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Espesor	0	Espesor de la capa granular. [m]
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo.
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa	FirmesCarreteras.Estructura....	Datos del material que conforma la capa.
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Real	pos	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa. [m]
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.
Boolean	Capa	true	Indica que el componente se encuentra en capa.
Real	capa_en_e	0	Parámetro que indica si la capa está

			dentro de una estructura la posición que ocupa. 0 es superficie.
Real	angulo	26.6	Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre 0° y 90°. [°]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

model Capa_Elastica
  "Capa formada por varias sub-capas elásticas para representar un material puramente elástico."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.Capa;

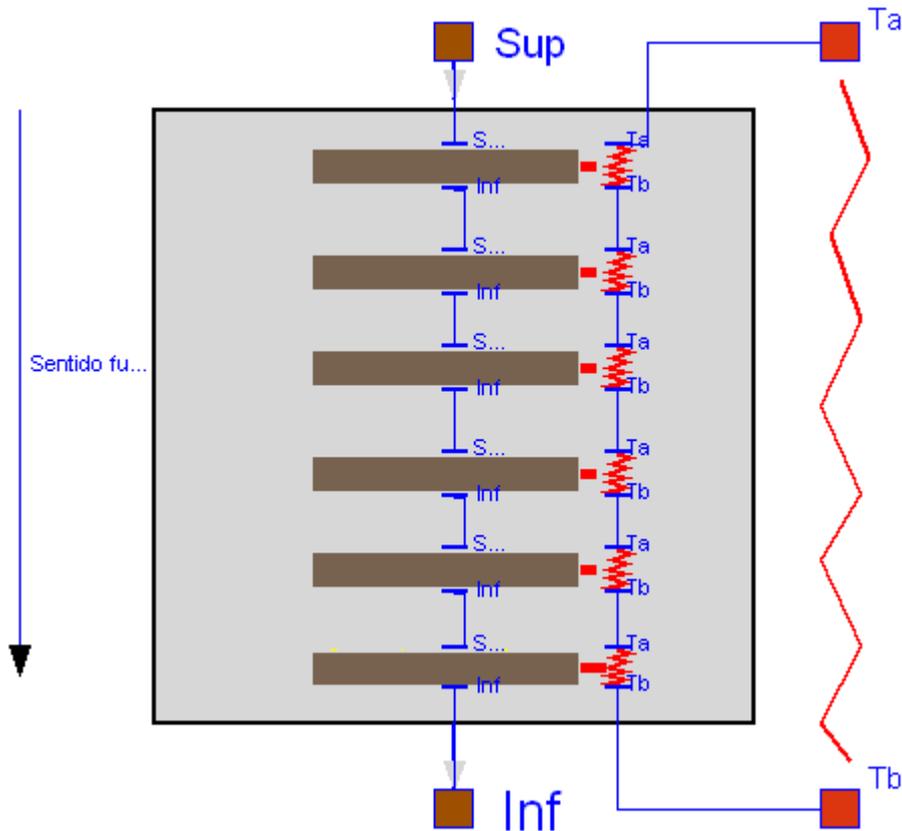
end Capa_Elastica;

```

---

## FirmesCarreteras.Estructura.Capas.Capa\_ViscoElastica

Capa formada por varias sub-capas con comportamiento visco-elástico en la dirección del eje x y comportamiento elástico en la dirección del eje z para representar una mezcla bituminosa.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Espesor	0	Espesor de la capa granular. [m]
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo.
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa	FirmesCarreteras.Estructura....	Datos del material que conforma la capa.
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Real	pos	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa. [m]
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.
Boolean	Capa	true	Indica que el componente se encuentra en capa.

Real	capa_en_e	0	Parámetro que indica si la capa está dentro de una estructura la posición que ocupa. 0 es superficie.
Real	angulo	26.6	Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre 0° y 90°. [°]
Real	n	1	Cada cierto tiempo n se dispara una condición de evento para ver si la temperatura ha variado.

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```
model Capa_ViscoElastica
```

```
"Capa formada por varias sub-capas con comportamiento visco-elástico en la
dirección del eje x y comportamiento elástico en la dirección del eje z para
representar una mezcla bituminosa."
```

```
//*****
*****
//Herencia:
//*****
*****
  extends Interfaces.Capa( redeclare model Sub_Capa_1 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica,
    redeclare model Sub_Capa_2 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica,
    redeclare model Sub_Capa_3 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica,
    redeclare model Sub_Capa_4 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica,
    redeclare model Sub_Capa_5 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica,
    redeclare model Sub_Capa_6 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica,
    sub_Capa_1(n=n),
    sub_Capa_2(n=n),
    sub_Capa_3(n=n),
    sub_Capa_4(n=n),
    sub_Capa_5(n=n),
    sub_Capa_6(n=n) );

//*****
*****
```

```

//Parámetros:
//*****
*****
parameter Real n = 1
    "Cada cierto tiempo n se dispara una condición de evento para ver si la
temperatura ha variado.";
end Capa_ViscoElastica;

```

---

## FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos

Datos de los materiales que conforman las capas.

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	E		Módulo elástico del material. [N/m2]
Real	Mc		Módulo dinámico o módulo de rigidez. [N/m2]
Real	b		Coefficiente de viscosidad del material. [Pa·s/m]
Real	desfase		Desfase del módulo dinámico de una mezcla bituminosa. [°]
Real	Amort_x		Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	Amort_z		Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.
Real	rho		Densidad del material. [kg/m3]
Real	coef_Poisson		Coefficiente de Poisson.
Real	Cp		Calor específico del material. [J/(kg·°C)]
Real	k		Conductividad térmica del material. [W/(m·°C)]
Real	k2		Valor para los suelos que depende de su grado de compactación. [%]
Real	K0		Coefficiente de empuje horizontal.
Real	sigma_0		Para aquellos materiales con plasticidad, se trata de la tensión en Pa que se debe superar para que el material se deforme de forma plástica. [Pa]
Real	anisotropia		Modelización de la anisotropía de un suelo. Este valor es igual al cociente entre módulos elásticos Evertical/Ehorizontal

### Modelica definition

```

record CapaDatos "Datos de los materiales que conforman las capas."
parameter Real E( unit="N/m2") "Módulo elástico del material.";
parameter Real Mc( unit="N/m2") "Módulo dinámico o módulo de rigidez.";
parameter Real b( unit="Pa·s/m") "Coefficiente de viscosidad del material.";
parameter Real desfase( unit="°")
    "Desfase del módulo dinámico de una mezcla bituminosa.";
parameter Real Amort_x
    "Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.";
parameter Real Amort_z

```

```

    "Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.";
parameter Real rho( unit="kg/m3") "Densidad del material.";
parameter Real coef_Poisson "Coeficiente de Poisson.";
parameter Real Cp( unit="J/(kg·°C)") "Calor específico del material.";
parameter Real k( unit="W/(m·°C)") "Conductividad térmica del material.";
parameter Real k2( unit="%")
    "Valor para los suelos que depende de su grado de compactación.";
parameter Real K0 "Coeficiente de empuje horizontal.";
parameter Real sigma_0( unit="Pa")
    "Para aquellos materiales con plasticidad, se trata de la tensión en Pa que
se debe superar para que el material se deforme de forma plástica.";
parameter Real anisotropia
    "Modelización de la anisotropía de un suelo. Este valor es igual al
cociente entre módulos elásticos Evertical/Ehorizontal";
end CapaDatos;

```

---

## [FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales](#)

En esta librería guardamos los datos de los materiales más utilizados.

### Package Content

Name	Description
<input type="checkbox"/> <a href="#">MezclaBituminosa</a>	Propiedades de un material bituminoso.
<input type="checkbox"/> <a href="#">SueloGranular</a>	Propiedades y características de un suelo granular.
<input type="checkbox"/> <a href="#">ZahorraNatural</a>	Propiedades y características de una Zahorra natural.
<input type="checkbox"/> <a href="#">SueloCohesivo</a>	Propiedades y características de un suelo cohesivo.

---

## [FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.Mezcla Bituminosa](#)

Propiedades de un material bituminoso.

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	E	1e10	Módulo elástico del material. [N/m <sup>2</sup> ]
Real	Mc	1e9	Módulo dinámico o módulo de rigidez. [N/m <sup>2</sup> ]
Real	b	100	Coeficiente de viscosidad del material. [Pa·s/m]
Real	desfase	17	Desfase del módulo dinámico de una mezcla bituminosa. [°]
Real	Amort_x	0.0001	Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	Amort_z	0.0001	Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.

Real	rho	2340	Densidad del material. [kg/m3]
Real	coef_Poisson	0.33	Coeficiente de Poisson.
Real	Cp	921	Calor específico del material. [J/(kg.°C)]
Real	k	1.3	Conductividad térmica del material. [W/(m.°C)]
Real	k2	70	Valor para los suelos que depende de su grado de compactación. [%]
Real	K0	0.1	Coeficiente de empuje horizontal.
Real	sigma_0	200	Para aquellos materiales con plasticidad, se trata de la tensión en Pa que se debe superar para que el material se deforme de forma plástica. [Pa]
Real	anisotropia	1	Modelización de la anisotropía de un suelo. Este valor es igual al cociente entre módulos elásticos Evertical/Ehorizontal

## Modelica definition

```
record MezclaBituminosa = FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos (
  E=1e10,
  Mc=1e9,
  b=100,
  desfase=17,
  rho=2340,
  coef_Poisson=0.33,
  k=1.3,
  k2=70,
  K0=0.1,
  Cp=921,
  sigma_0=200,
  Amort_x=0.0001,
  Amort_z=0.0001,
  anisotropia=1) "Propiedades de un material bituminoso.";
```

## [FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular](#)

### Propiedades y características de un suelo granular.

#### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	E	100e6	Módulo elástico del material. [N/m2]
Real	Mc	100e6	Módulo dinámico o módulo de rigidez. [N/m2]
Real	b	10e6	Coeficiente de viscosidad del material. [Pa·s/m]
Real	desfase	0	Desfase del módulo dinámico de una mezcla bituminosa. [°]
Real	Amort_x	0.0001	Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	Amort_z	0.0001	Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.

Real	rho	1500	Densidad del material. [kg/m3]
Real	coef_Poisson	0.4	Coeficiente de Poisson.
Real	Cp	1800	Calor específico del material. [J/(kg.°C)]
Real	k	1.5	Conductividad térmica del material. [W/(m.°C)]
Real	k2	34	Valor para los suelos que depende de su grado de compactación. [%]
Real	K0	0.1	Coeficiente de empuje horizontal.
Real	sigma_0	200	Para aquellos materiales con plasticidad, se trata de la tensión en Pa que se debe superar para que el material se deforme de forma plástica. [Pa]
Real	anisotropia	2.25	Modelización de la anisotropía de un suelo. Este valor es igual al cociente entre módulos elásticos Evertical/Ehorizontal

## Modelica definition

```
record SueloGranular = FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos (
  E=100e6,
  Mc=100e6,
  b=10e6,
  desfase=0,
  rho=1500,
  coef_Poisson=0.4,
  k=1.5,
  k2=34,
  K0=0.1,
  Cp=1800,
  sigma_0=200,
  Amort_x=0.0001,
  Amort_z=0.0001,
  anisotropia=2.25) "Propiedades y características de un suelo granular.";
```

## [FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.ZahorraNatural](#)

**Propiedades y características de una Zahorra natural.**

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	E	350e6	Módulo elástico del material. [N/m2]
Real	Mc	350e6	Módulo dinámico o módulo de rigidez. [N/m2]
Real	b	0	Coeficiente de viscosidad del material. [Pa·s/m]
Real	desfase	0	Desfase del módulo dinámico de una mezcla bituminosa. [°]
Real	Amort_x	0.0001	Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	Amort_z	0.0001	Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.

Real	rho	2170	Densidad del material. [kg/m3]
Real	coef_Poisson	0.4	Coefficiente de Poisson.
Real	Cp	1800	Calor específico del material. [J/(kg.°C)]
Real	k	1.5	Conductividad térmica del material. [W/(m.°C)]
Real	k2	70	Valor para los suelos que depende de su grado de compactación. [%]
Real	K0	0.1	Coefficiente de empuje horizontal.
Real	sigma_0	200	Para aquellos materiales con plasticidad, se trata de la tensión en Pa que se debe superar para que el material se deforme de forma plástica. [Pa]
Real	anisotropia	2.25	Modelización de la anisotropía de un suelo. Este valor es igual al cociente entre módulos elásticos Evertical/Ehorizontal

## Modelica definition

```
record ZahorraNatural = FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos (
  E=350e6,
  Mc=350e6,
  b=0,
  desfase=0,
  rho=2170,
  coef_Poisson=0.4,
  k=1.5,
  k2=70,
  K0=0.1,
  Cp=1800,
  sigma_0=200,
  Amort_x=0.0001,
  Amort_z=0.0001,
  anisotropia=2.25) "Propiedades y características de una Zahorra natural.";
```

## [FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloCohesivo](#)

Propiedades y características de un suelo cohesivo.

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	E	60e6	Módulo elástico del material. [N/m2]
Real	Mc	150e6	Módulo dinámico o módulo de rigidez. [N/m2]
Real	b	0	Coefficiente de viscosidad del material. [Pa·s/m]
Real	desfase	0	Desfase del módulo dinámico de una mezcla bituminosa. [°]
Real	Amort_x	0.0001	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	Amort_z	0.0001	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.

Real	rho	1770	Densidad del material. [kg/m3]
Real	coef_Poisson	0.4	Coeficiente de Poisson.
Real	Cp	1800	Calor específico del material. [J/(kg·°C)]
Real	k	1.5	Conductividad térmica del material. [W/(m·°C)]
Real	k2	70	Valor para los suelos que depende de su grado de compactación. [%]
Real	K0	0.1	Coeficiente de empuje horizontal.
Real	sigma_0	200	Para aquellos materiales con plasticidad, se trata de la tensión en Pa que se debe superar para que el material se deforme de forma plástica. [Pa]
Real	anisotropia	2.25	Modelización de la anisotropía de un suelo. Este valor es igual al cociente entre módulos elásticos Evertical/Ehorizontal

## Modelica definition

```
record SueloCohesivo = FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos (
  E=60e6,
  Mc=150e6,
  b=0,
  desfase=0,
  rho=1770,
  coef_Poisson=0.4,
  k=1.5,
  k2=70,
  K0=0.1,
  Cp=1800,
  sigma_0=200,
  Amort_x=0.0001,
  Amort_z=0.0001,
  anisotropia=2.25) "Propiedades y características de un suelo cohesivo.";
```

## [FirmesCarreteras.Entorno](#)

Paquete que contiene los elementos que modelizan el entorno del firme.

### Package Content

Name	Description
 <a href="#">EntornoMecanico</a>	Paquete que contiene las clases que modelizan el comportamiento del entorno físico de la estructura, su confinamiento, paredes y suelo.
 <a href="#">EntornoTermico</a>	Paquete que modeliza el entorno térmico en el que se encuentra la estructura.

## FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico

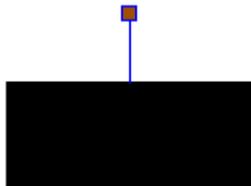
Paquete que contiene las clases que modelizan el comportamiento del entorno físico de la estructura, su confinamiento, paredes y suelo.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Suelo</a>	Simula el suelo donde se apoya el firme.
<a href="#">Pared</a>	Simula la pared con la que linda el elemento de la capa.
<a href="#">SueloCoordenadas</a>	Suelo en el sistema de coordenadas global con temperatura fija. Se puede usar como punto fijo de temperatura para resolver el problema de la conducción del calor a través de la estructura.

## FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Suelo

Simula el suelo donde se apoya el firme.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	posicion_z		Profundidad a la que se encuentra el suelo. [m]
Real	posicion_x		Posición en el eje x a la que se encuentra el suelo. [m]

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM	Conector que trasfiere la fuerza y la posición.

### Modelica definition

```
model Suelo "Simula el suelo donde se apoya el firme."
```

```
//*****  
*****  
//Conectores que contiene la clase:
```

```

//*****
*****
    Conectores.Mecanico cM "Conector que trasfiere la fuerza y la posición.";

//*****
*****
    //Sistema de coordenadas de referencia global:
//*****
*****
    outer FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

//*****
*****
    //Parámetros de la clase:
//*****
*****
    parameter Real posicion_z( unit="m")
        "Profundidad a la que se encuentra el suelo.";
    parameter Real posicion_x( unit="m")
        "Posición en el eje x a la que se encuentra el suelo.";

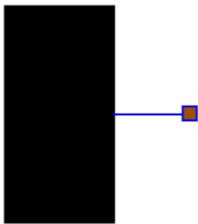
//*****
*****
    //Ecuaciones constitutivas de la clase:
//*****
*****
equation
    cM.s[1] = posicion_x;
    cM.s[2] = posicion_z;

end Suelo;

```

## **FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Pared**

Simula la pared con la que linda el elemento de la capa.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	posicion_z		Posición en el eje z que indica la profundidad del anclaje en la pared. [m]
Real	posicion_x		Posición en el eje x que indica el lugar en el eje x donde se encuentra la pared. [m]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM	Conector que trasfiere la fuerza y la posición.

## Modelica definition

```
model Pared
  "Simula la pared con la que linda el elemento de la capa."

  //*****
  //Conectores que contiene la clase:
  //*****
  Conectores.Mecanico cM "Conector que trasfiere la fuerza y la posición.";

  //*****
  //Sistema de coordenadas de referencia global:
  //*****
  outer FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

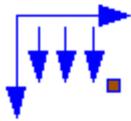
  //*****
  //Parámetros de la clase:
  //*****
  parameter Real posicion_z( unit="m")
    "Posición en el eje z que indica la profundidad del anclaje en la pared.";
  parameter Real posicion_x( unit="m")
    "Posición en el eje x que indica el lugar en el eje x donde se encuentra la
pared.";

  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
equation
  cM.s[1] = posicion_x;
  cM.s[2] = posicion_z;
end Pared;
```

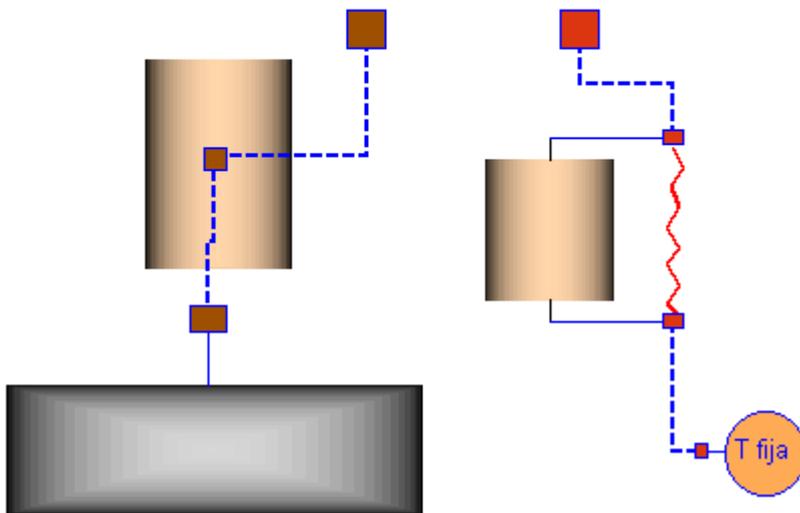
---

# FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas

Suelo en el sistema de coordenadas global con temperatura fija. Se puede usar como punto fijo de temperatura para resolver el problema de la conducción del calor a través de la estructura.



Suelo en sistema de coordenadas global



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	posicion_z	0	Profundidad a la que se encuentra el suelo. [m]
Real	posicion_x	0	Posición en el eje x a la que se encuentra el suelo. [m]
Real	Tfija	20	Temperatura del suelo. [°C]
Real	dz	0.02	Longitud del elemento de suelo. [m]
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo que pasa sobre la estructura.
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa	FirmesCarreteras.Estructura....	Datos del material que conforma el suelo que se está usando.

## Connectors

Type	Name	Description
------	------	-------------

<a href="#">Mecanico</a>	mecanico	
<a href="#">Termico</a>	termico	

## Modelica definition

model SueloCoordenadas "Suelo en el sistema de coordendas global con temperatura fija.  
Se puede usar como punto fijo de temperatura para resolver el problema de la conducción del calor a través de la estructura."

```
//*****
//*****
//Conectores que contiene la clase:
//*****
//*****
Conectores.Mecanico mecanico;
Conectores.Termico termico;

//*****
//*****
//Sistema de coordenadas de referencia global:
//*****
//*****
inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

//*****
//*****
//Clases que componen la clase SueloCoordenadas:
//*****
//*****
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo(posicion_x=
    posicion_x, posicion_z=posicion_z);
EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija(Tfija=Tfija);
Estructura.Componentes.ElementoTermicoResistivo elementoTermicoResistivo(
dy=dz, K=
    DatosCapa.k);

//*****
//*****
//Parámetros visibles:
//*****
//*****
//Parámetros:
public
parameter Real posicion_z( unit="m") = 0
    "Profundidad a la que se encuentra el suelo.";
parameter Real posicion_x( unit="m") = 0
    "Posición en el eje x a la que se encuentra el suelo.";
parameter Real Tfija( unit="°C") = 20 "Temperatura del suelo.";
parameter Real dz( unit="m") = 0.02 "Longitud del elemento de suelo.";
//Datos sobre la huella del vehículo:
parameter FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1()
    "Datos de la huella del vehículo que pasa sobre la estructura.";
//Tipo de material que conforma el suelo:
parameter FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos DatosCapa=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular()
    "Datos del material que conforma el suelo que se está usando.";
```

```

//*****
//*****
//Parámetros no visibles:
//*****
//*****
protected
  parameter Real S(
unit="m2")=FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Superficie(DatosHuella.a)
    "Superficie de la huella del neumático.";

//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas de la clase:
//*****
//*****
equation
  connect(elementoTermicoResistivo.cTsup, termico);
  connect(elementoTermicoResistivo.cTinf, temperaturaFija.cT);
  connect(suelo.cM, mecanico);

end SueloCoordenadas;

```

---

## [FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico](#)

Paquete que modeliza el entorno térmico en el que se encuentra la estructura.

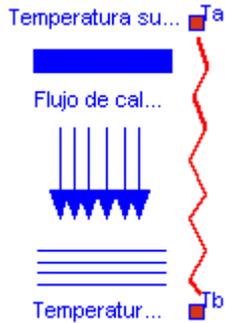
### Package Content

Name	Description
<a href="#">EntornoConveccion</a>	Representa el flujo de calor por convección entre el entorno y la estructura.
<a href="#">EntornoRadiacion</a>	Representa el flujo de calor por la radiación solar directa sobre el firme.
<a href="#">EntornoRadiacionAtmosfera</a>	Representa el flujo de calor intercambiado entre la atmósfera y el firme debido a la radiación de onda larga emitida y absorbida.
<a href="#">TemperaturaFija</a>	Punto con temperatura fija.
<a href="#">TemperaturaVariable</a>	Punto con temperatura variable.

---

# Firmes Carreteras. Entorno. Entorno Termico. Entorno Conveccion

Representa el flujo de calor por convección entre el entorno y la estructura.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	hc	3.5	Coefficiente de convección. [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

model EntornoConveccion
  "Representa el flujo de calor por convección entre el entorno y la
  estructura."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.DosConectoresTermicos;

  //*****
  //*****
  //Variables internas de la clase:
  //*****
  //*****
  //Variables:
  Real T_firme( unit="°C", start= 20)
    "Temperatura en la superficie de la estructura.";
  Real T_aire( unit="°C", start= 20) "Temperatura del aire del entorno.";
  Real Qf_h( unit="W/m2")
    "Flujo de calor por convección por unidad de superficie.";

```

```

//*****
//*****
//Parámetros visibles:
//*****
//*****
//Parámetro:
parameter Real hc(unit="W/(m2·°C)")= 3.5 "Coeficiente de convección.";

//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas de la clase:
//*****
//*****
equation
cTsup.T = T_firme;
cTinf.T = T_aire;
Q_flujo = Qf_h;
Qf_h = hc*dT;

end EntornoConveccion;

```

## FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.EntornoRadiacion

Representa el flujo de calor por la radiación solar directa sobre el firme.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	alpha	0.35	Albedo: fracción de radiación solar reflejada por la superficie del firme.

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cT	Conector térmico para tener el flujo de salida debido a la radiación solar incidente.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para meter la señal de la radiación solar incidente sobre el firme.

## Modelica definition

```
model EntornoRadiacion
  "Representa el flujo de calor por la radiación solar directa sobre el firme."

  //*****
  //Conectores de la clase:
  //*****
  Conectores.Termico cT
    "Conector térmico para tener el flujo de salida debido a la radiación solar
    incidente.";
  input Conectores.Senal cSenal
    "Conector para meter la señal de la radiación solar incidente sobre el
    firme.";

  //*****
  //Variables internas de la clase:
  //*****
  //Variables:
  Real R_solar( unit="W/m2")
    "Radiación solar incidente sobre el firme por unidad de superficie.";

  Real Qf_rs( unit="W/m2")
    "Flujo de calor debido a la radiación solar incidente por unidad de
    superficie.";

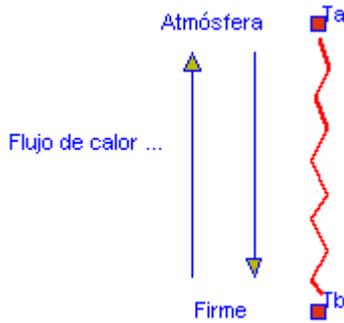
  //*****
  //Parámetros visibles:
  //*****
  //Parámetro:
  parameter Real alpha = 0.35
    "Albedo: fracción de radiación solar reflejada por la superficie del
    firme.";

  //*****
  //Ecuaciones constitutivas de la clase:
  //*****
  equation
    if noEvent(cSenal.Signal>0) then
      R_solar = cSenal.Signal;
    else
      R_solar = 0;
    end if;
    cT.Qt = -Qf_rs;
    Qf_rs = (1-alpha)*R_solar;
end EntornoRadiacion;
```

---

# FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.EntornoRadiacionAtmosfera

Representa el flujo de calor intercambiado entre la atmósfera y el firme debido a la radiación de onda larga emitida y absorbida.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Ea	0.9	Coefficiente de absorción de la superficie del firme para radiación de onda larga y cantidad de nubes.
Real	Ee	0.9	Coefficiente de emisión de la superficie del firme.

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

model EntornoRadiacionAtmosfera
  "Representa el flujo de calor intercambiado entre la atmósfera y el firme
  debido a la radiación de onda larga emitida y absorbida."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.DosConectoresTermicosSolo;

  //*****
  //*****
  //Variables internas de la clase:
  //*****
  //*****
  //Variables:
  Real Qf_ra( unit="W/m2")

```

```

"Flujo de calor debido a la radiación de onda larga por unidad de
superficie.";
Real T_firme( unit="°C") "Temperatura en la superficie del firme.";
Real T_ambiente( unit="°C") "Temperatura del aire del entorno.";

//*****
//*****
//Parámetros visibles:
//*****
//*****
//Parámetros:
parameter Real Ea = 0.9
"Coeficiente de absorción de la superfice del firme para radiación de onda
larga y cantidad de nubes.";
parameter Real Ee = 0.9 "Coeficiente de emisión de la superfice del firme.";
constant Real S_B( unit="W/(m2·K4)") = 6.67e-8
"Constante de Stefan-Boltzman dentro de la radiación térmica.";

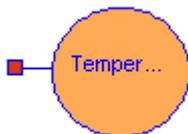
//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas de la clase:
//*****
//*****
equation
cTsup.T = T_ambiente;
cTinf.T = T_firme;
Q_flujo = Qf_ra;
Qf_ra = S_B*(Ea*(T_ambiente+273.15)^4-Ee*(T_firme+273.15)^4);

end EntornoRadiacionAtmosfera;

```

## FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija

**Punto con temperatura fija.**



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Tfija	20	Temperatura fija de la estructura. [°C]

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cT	

## Modelica definition

```

model TemperaturaFija "Punto con temperatura fija."

//*****
//*****
//Conectores de la clase:
//*****
//*****
    Conectores.Termico cT;

//*****
//*****
//Parámetros visibles:
//*****
//*****
    //Parámetros:
    parameter Real Tfija( unit="°C") = 20 "Temperatura fija de la estructura.";

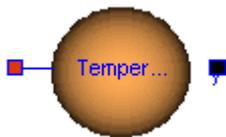
//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas de la clase:
//*****
//*****
equation
    cT.T = Tfija;

end TemperaturaFija;

```

## FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable

Punto con temperatura variable.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Tmax	20	Temperatura máxima de oscilación. [°C]
Real	Tmin	10	Temperatura mínima de oscilación. [°C]

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cT	

<a href="#">Senal</a>	y	
-----------------------	---	--

## Modelica definition

```

model TemperaturaVariable "Punto con temperatura variable."

//*****
//*****
//Conectores de la clase:
//*****
//*****
    Conectores.Termico cT;
    FirmesCarreteras.Conectores.Senal y;

//*****
//*****
//Parámetros:
//*****
//*****
    parameter Real Tmax( unit="°C") = 20 "Temperatura máxima de oscilación.";
    parameter Real Tmin( unit="°C") = 10 "Temperatura mínima de oscilación.";

//*****
//*****
//Ecuaciones constitutivas de la clase:
//*****
//*****
equation
    cT.T = ((Tmax-Tmin)/2)*(y.Signal)+(Tmin+((Tmax-Tmin)/2));

end TemperaturaVariable;

```

---

## [FirmesCarreteras.Interfaces](#)

**Paquete que contiene las interfaces para formar los distintos elementos.**

### Package Content

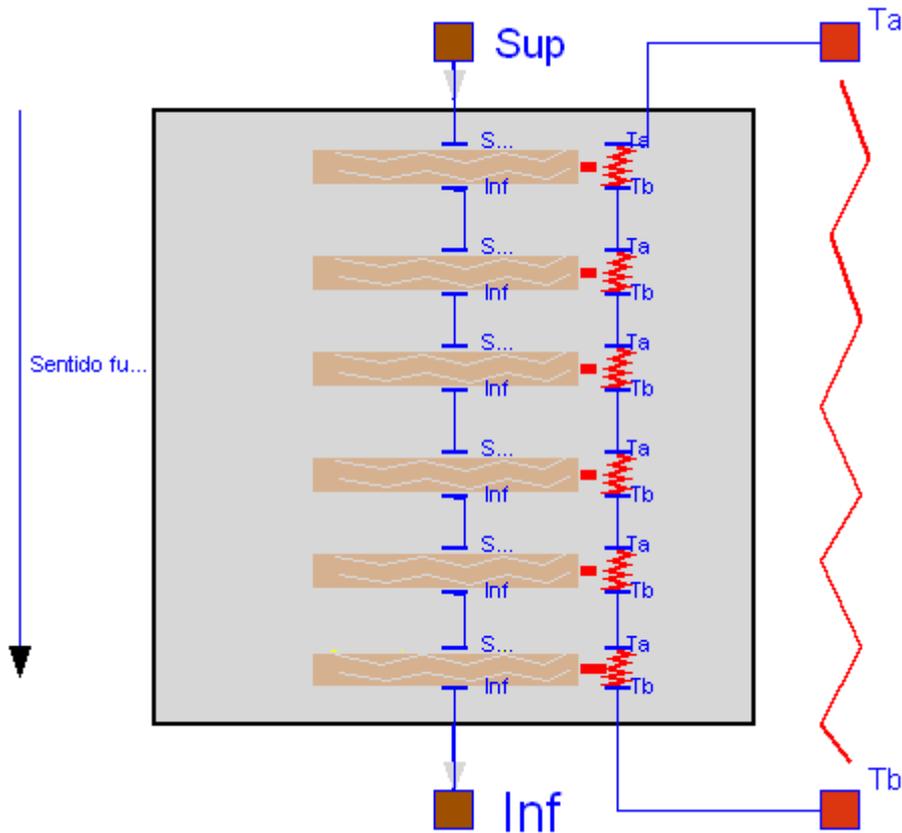
Name	Description
<a href="#">Capa</a>	Capa formada por seis sub-capas.
<a href="#">Sub_Capa</a>	Interfaz que es común a todas las sub-capas que conforman la estructura del firme.
<a href="#">AdherenciaCapa</a>	Interfaz que es común a todas las adherencias entre capas que conforman la estructura del firme.
<a href="#">AdherenciaMecanica</a>	Interfaz que es común a todas las adherencias entre capas que conforman la estructura del firme.
<a href="#">ComportamientoInercial</a>	Interfaz de los distintos modelos de comportamiento inercial de los materiales que conforman el firme.
<a href="#">ComportamientoMecanico</a>	Interfaz de los distintos modelos de comportamiento mecánico de

	los materiales que conforman el firme.
<a href="#"><u>ComportamientoTermico</u></a>	Interfaz de los distintos modelos de comportamiento térmico de los materiales que conforman el firme.
<a href="#"><u>Bloque_Salida</u></a>	Bloque que contiene una salida de número real que corresponde con una señal.
<a href="#"><u>Bloque_Entrada</u></a>	Bloque que contiene un conector de entrada.
<a href="#"><u>Bloque_Ent_Sal</u></a>	Bloque de entrada y salida de señales.
<a href="#"><u>DosConectoresMecanicos</u></a>	Interfaz que contiene dos conectores mecánicos que definen las variables del plano de control de un volumen de control.
<a href="#"><u>DosConectoresMecanicosSolo</u></a>	Interfaz que contiene dos conectores mecánicos que definen las variables del plano de control de un volumen de control.
<a href="#"><u>DosConectoresTermicos</u></a>	Interfaz que contiene dos conectores térmicos.
<a href="#"><u>DosConectoresTermicosSolo</u></a>	Interfaz que contiene dos conectores térmicos.
<a href="#"><u>DosConectoresTermicosCapa</u></a>	Interfaz que contiene dos conectores térmicos.

---

# FirmesCarreteras.Interfaces.Capa

Capa formada por seis sub-capas.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Espesor	0	Espesor de la capa granular. [m]
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo.
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa	FirmesCarreteras.Estructura....	Datos del material que conforma la capa.
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Real	pos	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa. [m]
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.
Boolean	Capa	true	Indica que el componente se encuentra en capa.
Real	capa_en_e	0	Parámetro que indica si la capa está dentro de una estructura la posición

			que ocupa. 0 es superficie.
Real	angulo	26.6	Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre 0° y 90°. [°]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMInf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTInf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```
partial model Capa "Capa formada por seis sub-capas."
```

```
//*****
//*****
//Herencia:
//*****
//*****
  extends Interfaces.DosConectoresMecanicosSolo;
  extends Interfaces.DosConectoresTermicosCapa;

//*****
//*****
//Estructura mecánica de la capa:
//*****
//*****
//Está formada por 6 sub-capas con un espesor igual a 1/6 del espesor total de
la capa.
protected
  replaceable model Sub_Capa_1 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub\_Capas.sub\_CapaElastica;
protected
  Sub\_Capa\_1 sub_Capa_1(
    Ancho=Ancho,
    posicion_capa=pos,
    Espesor=Espesor/6,
    DatosHuella=DatosHuella,
    DatosCapa=DatosCapa,
    Suelo=Suelo,
    Inercia=Inercia, Capa=Capa,
    amort_x=amort_x,
    amort_z=amort_z,
    angulo=angulo,
    numero_subcapa=0 + capa_en_e);
  replaceable model Sub_Capa_2 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub\_Capas.sub\_CapaElastica;
protected
  Sub\_Capa\_2 sub_Capa_2(
    Espesor=Espesor/6,
    Ancho=Ancho,
```

```

    posicion_capa=pos + Espesor/6,
    DatosHuella=DatosHuella,
    DatosCapa=DatosCapa,
    Suelo=Suelo,
    Inercia=Inercia, Capa=Capa,
    angulo=angulo,
    numero_subcapa=1 + capa_en_e);
replaceable model Sub_Capa_3 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub\_Capas.sub\_CapaElastica;
protected
    Sub\_Capa\_3 sub_Capa_3(
        Espesor=Espesor/6,
        Ancho=Ancho,
        posicion_capa=pos + 2*Espesor/6,
        DatosHuella=DatosHuella,
        DatosCapa=DatosCapa,
        Suelo=Suelo,
        Inercia=Inercia, Capa=Capa,
        angulo=angulo,
        numero_subcapa=2 + capa_en_e);
replaceable model Sub_Capa_4 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub\_Capas.sub\_CapaElastica;
protected
    Sub\_Capa\_4 sub_Capa_4(
        Espesor=Espesor/6,
        Ancho=Ancho,
        posicion_capa=pos + 3*Espesor/6,
        DatosHuella=DatosHuella,
        DatosCapa=DatosCapa,
        Suelo=Suelo,
        Inercia=Inercia, Capa=Capa,
        angulo=angulo,
        numero_subcapa=3 + capa_en_e);
replaceable model Sub_Capa_5 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub\_Capas.sub\_CapaElastica;
protected
    Sub\_Capa\_5 sub_Capa_5(
        Espesor=Espesor/6,
        Ancho=Ancho,
        posicion_capa=pos + 4*Espesor/6,
        DatosHuella=DatosHuella,
        DatosCapa=DatosCapa,
        Suelo=Suelo,
        Inercia=Inercia, Capa=Capa,
        angulo=angulo,
        numero_subcapa=4 + capa_en_e);
replaceable model Sub_Capa_6 =
    FirmesCarreteras.Estructura.Sub\_Capas.sub\_CapaElastica;
protected
    Sub\_Capa\_6 sub_Capa_6(
        Espesor=Espesor/6,
        Ancho=Ancho,
        posicion_capa=pos + 5*Espesor/6,
        DatosHuella=DatosHuella,
        DatosCapa=DatosCapa,
        Suelo=Suelo,
        Inercia=Inercia, Capa=Capa,
        angulo=angulo,
        numero_subcapa=5 + capa_en_e);

```

```

//*****
*****
//Parámetros visibles de la capa:
//*****
*****
//Dimensiones, tipo de huella y datos relacionados con el material que
conforma la capa:
public
parameter Real Espesor( unit="m") = 0 "Espesor de la capa granular.";
parameter FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos DatosHuella=
FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1()
"Datos de la huella del vehículo.";
parameter FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos DatosCapa=
FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular()
"Datos del material que conforma la capa.";
parameter Boolean Suelo = true
"Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata
de un suelo, false es que no es un suelo.";
parameter Real pos( unit="m") = 0
"Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa.";
parameter Boolean Inercia = true
"Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.";
parameter Boolean Capa = true
"Indica que el componente se encuentra en capa.";
parameter Real capa_en_e = 0
"Parámetro que indica si la capa está dentro de una estructura la posición
que ocupa. 0 es superficie.";

//*****
*****
//Parámetro para el ajuste del amortiguamiento geométrico de la capa.
//*****
*****
parameter Real angulo( unit="°")= 26.6
"Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre
0° y 90°.";

//*****
*****
//Parámetros no visibles de la capa:
//*****
*****
//El ancho de la capa es igual siempre.
protected
parameter Real Ancho = 2*DatosHuella.a;
parameter Real S( unit="m2")=
FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Superficie(DatosHuella.a)
"Superficie de la huella.";
parameter Real amort_x = DatosCapa.Amort_x
"Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.";
parameter Real amort_z = DatosCapa.Amort_z
"Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.";

//*****
*****
//Variables que se calculan de la capa:
//*****
*****
//Variables de la capa (por niveles):
//Variables mecánicas:
public

```

```

Real Deflexion[6]( unit="m", start=zeros(6))
"Deflexión que se produce en la capa.";
Real Def_vert[6]( unit="def", start=zeros(6))
"Deformación vertical de la sub-capa que conforma la capa.";
Real Def_hor_izq[6]( unit="def", start=zeros(6))
"Deformación horizontal de la parte izquierda de la sub-capa que conforma
la capa.";
Real Def_hor_der[6]( unit="def", start=zeros(6))
"Deformación horizontal de la parte derecha de la sub-capa que conforma la
capa.";
Real Def_hor[6]( unit="def", start=zeros(6))
"Deformación horizontal de la sub-capa que conforma la capa.";
Real pos_x[6]( unit="m")
"Posición del elemento inercial de la sub-capa en el eje x.";
Real pos_z[6]( unit="m")
"Posición del elemento inercial de la sub-capa en el eje z.";
Real sigma_h[6]( unit="Pa")
"Tensión en el eje x ejercida sobre el elemento inercial del nivel
correspondiente dentro de la capa.";
Real sigma_v[6]( unit="Pa")
"Tensión en el eje z ejercida sobre el elemento inercial del nivel
correspondiente dentro de la capa.";

//Variables térmicas:
Real Temp[6]( unit="°C", start=fill(20,6))
"Temperatura al nivel correspondiente dentro de la capa.";

//*****
//Ecuaciones de la clase:
//*****
algorithm
//Variables de la capa.
Deflexion[1] := sub_Capa_1.Deflexion;
Deflexion[2] := sub_Capa_2.Deflexion;
Deflexion[3] := sub_Capa_3.Deflexion;
Deflexion[4] := sub_Capa_4.Deflexion;
Deflexion[5] := sub_Capa_5.Deflexion;
Deflexion[6] := sub_Capa_6.Deflexion;

Def_vert[1] := sub_Capa_1.Def_vert;
Def_vert[2] := sub_Capa_2.Def_vert;
Def_vert[3] := sub_Capa_3.Def_vert;
Def_vert[4] := sub_Capa_4.Def_vert;
Def_vert[5] := sub_Capa_5.Def_vert;
Def_vert[6] := sub_Capa_6.Def_vert;

Def_hor_izq[1] := sub_Capa_1.Def_long_izq;
Def_hor_izq[2] := sub_Capa_2.Def_long_izq;
Def_hor_izq[3] := sub_Capa_3.Def_long_izq;
Def_hor_izq[4] := sub_Capa_4.Def_long_izq;
Def_hor_izq[5] := sub_Capa_5.Def_long_izq;
Def_hor_izq[6] := sub_Capa_6.Def_long_izq;

Def_hor_der[1] := sub_Capa_1.Def_long_der;
Def_hor_der[2] := sub_Capa_2.Def_long_der;
Def_hor_der[3] := sub_Capa_3.Def_long_der;
Def_hor_der[4] := sub_Capa_4.Def_long_der;
Def_hor_der[5] := sub_Capa_5.Def_long_der;
Def_hor_der[6] := sub_Capa_6.Def_long_der;

```

```

Def_hor[1] := sub_Capa_1.Def_long;
Def_hor[2] := sub_Capa_2.Def_long;
Def_hor[3] := sub_Capa_3.Def_long;
Def_hor[4] := sub_Capa_4.Def_long;
Def_hor[5] := sub_Capa_5.Def_long;
Def_hor[6] := sub_Capa_6.Def_long;

pos_x[1] := sub_Capa_1.cMsup.s[1];
pos_x[2] := sub_Capa_2.cMsup.s[1];
pos_x[3] := sub_Capa_3.cMsup.s[1];
pos_x[4] := sub_Capa_4.cMsup.s[1];
pos_x[5] := sub_Capa_5.cMsup.s[1];
pos_x[6] := sub_Capa_6.cMsup.s[1];

pos_z[1] := sub_Capa_1.cMsup.s[2];
pos_z[2] := sub_Capa_2.cMsup.s[2];
pos_z[3] := sub_Capa_3.cMsup.s[2];
pos_z[4] := sub_Capa_4.cMsup.s[2];
pos_z[5] := sub_Capa_5.cMsup.s[2];
pos_z[6] := sub_Capa_6.cMsup.s[2];

sigma_v[1] := sub_Capa_1.sigma_v;
sigma_v[2] := sub_Capa_2.sigma_v;
sigma_v[3] := sub_Capa_3.sigma_v;
sigma_v[4] := sub_Capa_4.sigma_v;
sigma_v[5] := sub_Capa_5.sigma_v;
sigma_v[6] := sub_Capa_6.sigma_v;

sigma_h[1] := sub_Capa_1.sigma_h;
sigma_h[2] := sub_Capa_2.sigma_h;
sigma_h[3] := sub_Capa_3.sigma_h;
sigma_h[4] := sub_Capa_4.sigma_h;
sigma_h[5] := sub_Capa_5.sigma_h;
sigma_h[6] := sub_Capa_6.sigma_h;

Temp[1] := sub_Capa_1.CompInerc.Temp;
Temp[2] := sub_Capa_2.CompInerc.Temp;
Temp[3] := sub_Capa_3.CompInerc.Temp;
Temp[4] := sub_Capa_4.CompInerc.Temp;
Temp[5] := sub_Capa_5.CompInerc.Temp;
Temp[6] := sub_Capa_6.CompInerc.Temp;

```

equation

```

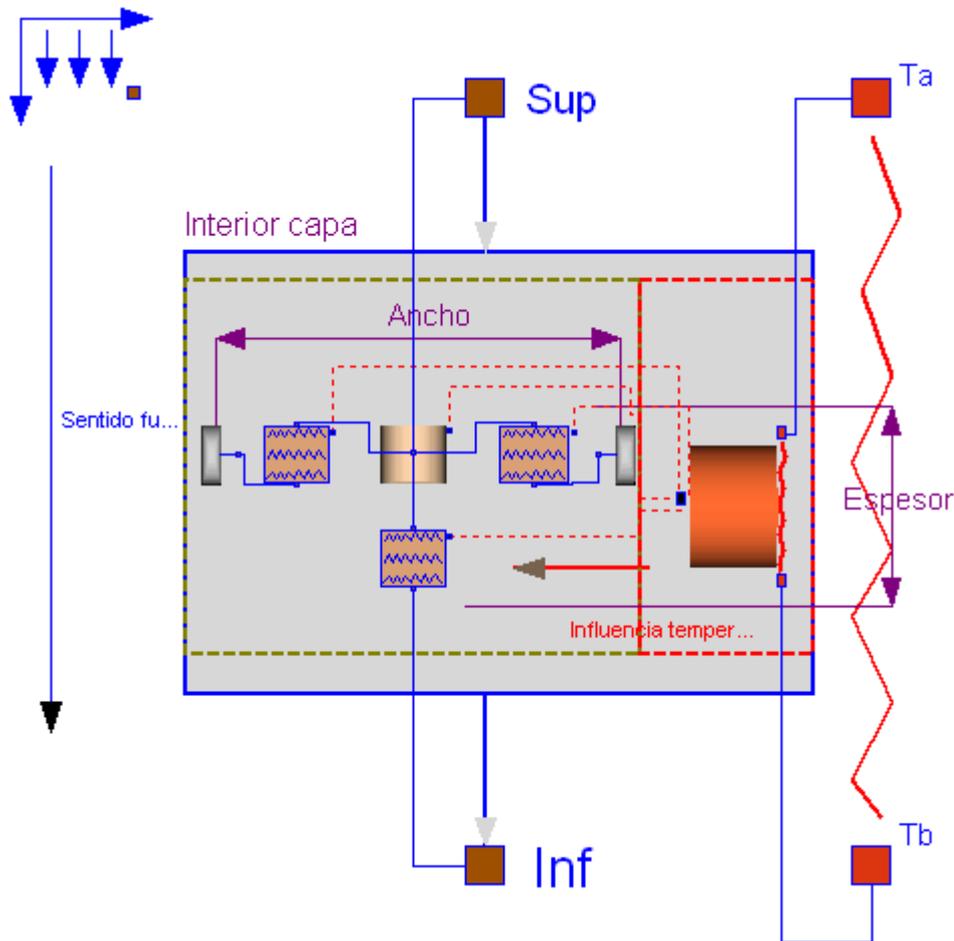
connect(sub_Capa_1.cMsup, cMsup);
connect(sub_Capa_1.cTsup, cTsup);
connect(sub_Capa_6.cTinf, cTinf);
connect(sub_Capa_6.cTsup, sub_Capa_5.cTinf);
connect(sub_Capa_5.cTsup, sub_Capa_4.cTinf);
connect(sub_Capa_4.cTsup, sub_Capa_3.cTinf);
connect(sub_Capa_3.cTsup, sub_Capa_2.cTinf);
connect(sub_Capa_2.cTsup, sub_Capa_1.cTinf);
connect(sub_Capa_2.cMinf, sub_Capa_3.cMsup);
connect(sub_Capa_3.cMinf, sub_Capa_4.cMsup);
connect(sub_Capa_4.cMinf, sub_Capa_5.cMsup);
connect(sub_Capa_5.cMinf, sub_Capa_6.cMsup);
connect(sub_Capa_6.cMinf, cMinf);
connect(sub_Capa_1.cMinf, sub_Capa_2.cMsup);
end Capa;

```

---

## FirmesCarreteras.Interfaces.Sub\_Capa

Interfaz que es común a todas las sub-capas que conforman la estructura del firme.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	Espesor	0	Espesor de la sub-capa. [m]
Real	Ancho	2*DatosHuella.a	Longitud entre la pared izquierda y la pared derecha. Es el ancho de la suma de los dos componentes en el eje x. [m]
Real	posicion_capa	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la sub-capa. [m]
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.

Real	numero_subcapa		Indica la posición dentro de la capa empezando por 0.
<a href="#">HuellaDatos</a>	DatosHuella	FirmesCarreteras.Carga.Datos...	Datos de la huella del vehículo que pasa sobre la sub-capa.
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa	FirmesCarreteras.Estructura....	Datos del material que conforma la sub-capa que se está usando.
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.
Boolean	Capa	false	Indica que el componente se encuentra en capa.
Real	amort_x	DatosCapa.Amort_x	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.
Real	amort_z	DatosCapa.Amort_z	Coefficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.
Real	angulo	26.6	Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre 0° y 90°. [°]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

partial model Sub_Capa
  "Interfaz que es común a todas las sub-capas que conforman la estructura del firme."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends Interfaces.DosConectoresMecanicosSolo;
  extends Interfaces.DosConectoresTermicosCapa;

  //*****
  //*****
  //Sistema de coordenadas de referencia global:
  //*****
  //*****

```

```

inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

//*****
//*****
//Estructura mecánica de la sub-capa:
//*****
//*****
replaceable model Comp_Izquierda =
    FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico;
replaceable model Comp_Derecha =
    FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico;
replaceable model Comp_Profundidad =
    FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico;
replaceable model Comp_Inercial =
    FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial;

//Comportamiento mecánico del material ante las tensiones horizontales y
verticales:
    Comp_Izquierda CompIzq(DatosCapa=DatosCapa, dy=dx, N_comp={1,0},
Suelo=Suelo, Posicion=1,
    r_inicio={-1,0},
    S=dz^2*3.141516, Capa=Capa);
    Comp_Derecha CompDrch(DatosCapa=DatosCapa, dy=dx, N_comp={1,0},
Suelo=Suelo, Posicion = 2,
    r_inicio={1,0},
    S=dz^2*3.141516, Capa=Capa);
    Comp_Profundidad CompProf(DatosCapa=DatosCapa, dy=dz, S=S, N_comp={0,1},
Suelo=Suelo, Posicion = 3,
    r_inicio={0,1},Capa=Capa);
    Comp_Inercial CompInerc(DatosCapa=DatosCapa, dz=dz, S=S, N_comp={1,1},
r_ini={0,posicion_capa}, pos=posicion_capa, Inercia=Inercia);

//Estructura de confinamiento lateral de la sub-capa:
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Pared ParedIzq(posicion_x=-dx,
    posicion_z=posicion_capa)
    "Pared a la izquierda del elemento que sufre la carga.";
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Pared ParedDrch(posicion_x=dx,
    posicion_z=posicion_capa)
    "Pared a la derecha del elemento que sufre la carga.";

//*****
//*****
//Estructura térmica de la sub-capa:
//*****
//*****
replaceable model ComportamientoT =
    FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo;
ComportamientoT CompTer(DatosCapa=DatosCapa, dy=dz)
    "Elemento térmico resistivo que conforman la capa.";

//*****
//*****
//Amortiguamiento estructural de la sub-capa:
//*****
//*****
Estructura.Comportamientos.Amortiguamiento amortiguamiento(pos=posicion_capa,
    amort_x=amort_x,
    amort_z=amort_z,
    E=DatosCapa.E,
    Poisson=DatosCapa.coef_Poisson, masa=DatosCapa.rho*dz*S);

```

```

//*****
*****
//Parámetros visibles de la sub-capa:
//*****
*****
//Componentes y dimensiones:
public
parameter Real Espesor( unit="m") = 0 "Espesor de la sub-capa.";
parameter Real Ancho( unit="m") = 2*DatosHuella.a
    "Longitud entre la pared izquierda y la pared derecha. Es el ancho de la
suma de los dos componentes en el eje x.";
parameter Real posicion_capa( unit="m") = 0
    "Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la sub-capa.";
parameter Boolean Suelo = true
    "Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata
de un suelo, false es que no es un suelo.";
parameter Real numero_subcapa
    "Indica la posición dentro de la capa empezando por 0.";

//Datos sobre la huella del vehículo sobre la sub-capa:
parameter FirmesCarreteras.Carga.HuellaDatos DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1()
    "Datos de la huella del vehículo que pasa sobre la sub-capa.";
//Tipo de material que conforma la sub-capa:
parameter FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos DatosCapa=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular()
    "Datos del material que conforma la sub-capa que se está usando.";
parameter Boolean Inercia = true
    "Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.";
parameter Boolean Capa = false
    "Indica que el componente se encuentra en capa.";
parameter Real amort_x = DatosCapa.Amort_x
    "Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en horizontal.";
parameter Real amort_z = DatosCapa.Amort_z
    "Coeficiente de ajuste del amortiguamiento del material en vertical.";
parameter Real angulo( unit="°")= 26.6
    "Ángulo en grados de apertura del amortiguamiento geométrico. Valor entre
0° y 90°.";

//*****
*****
//Parámetros protegidos de la sub-capa:
//*****
*****
//Tipo de huella que aplica la carga:
protected
parameter Real Presion( unit="Pa") = DatosHuella.Presion
    "Presión ejercida por el vehículo sobre el firme.";

//*****
*****
//Parámetros para la consideración del amortiguamiento geométrico de la capa.
//*****
*****
parameter Real Radio = DatosHuella.a +
(numero_subcapa*2*tan(angulo*3.1415/180)*(posicion_capa+dz))
    "Radio de la huella dependiendo de la profundidad.";
parameter Real S( unit="m2")=
FirmesCarreteras.Utilis.Funciones.Superficie(Radio)
    "Superficie de la huella.";

```

```

//*****
*****
//Parámetros de dimensiones de la sub-capa:
//*****
*****
parameter Real dx( unit="m") = Ancho/2
    "Longitud en reposo del componente de la sub-capa en el eje x.";
parameter Real dz( unit="m") = Espesor
    "Longitud en reposo del componente de la sub-capa en el eje z.";

//*****
*****
//Variables que vamos a calcular dentro de la sub-capa:
//*****
*****
public
    Real Deflexion( unit="m", start=0)
        "Desplazamiento del elemento de inercia en el eje z.";
    Real Def_long_izq( unit="def", start=0)
        "Deformación producida en el eje x en el sentido positivo. Compresiones
serán negativas, tracciones positivas.";
    Real Def_long_der( unit="def", start=0)
        "Deformación producida en el eje x en el sentido negativo. Compresiones
serán negativas, tracciones positivas.";
    Real Def_vert( unit="def", start=0)
        "Deformación vertical producida en el eje z. Compresiones serán negativas y
tracciones positivas.";
    Real Def_long( unit="def", start=0)
        "Deformación producida en el eje x. Compresiones serán negativas,
tracciones positivas.";
    Real pos_ini[2]( unit="m", start={0,posicion_capa})
        "Deformación producida en el eje x. Compresiones serán negativas,
tracciones positivas.";
    Real sigma_h( unit="Pa") "Tensiones horizontales sobre la capa.";
    Real sigma_v( unit="Pa") "Tensiones verticales sobre la capa.";

//*****
*****
//Ecuaciones de la clase:
//*****
*****

algorithm
    pos_ini := {0,posicion_capa};
    Deflexion := CompInerc.cM.s[2] - posicion_capa;
    Def_long_izq := CompIzq.Def;
    Def_long_der := CompDrch.Def;
    Def_vert := CompProf.Def;
    Def_long := CompDrch.Def;
    sigma_h := CompDrch.cMsup.F[1]/S;
    sigma_v := CompProf.cMsup.F[2]/S;

equation
    connect(CompDrch.cMsup, CompInerc.cM);
    connect(CompDrch.cMinf, ParedDrch.cM);
    connect(CompInerc.cM, CompProf.cMsup);
    connect(CompTer.cSenal, CompDrch.cSenal);
    connect(CompTer.cSenal, CompProf.cSenal);
    connect(CompTer.cSenal, CompIzq.cSenal);
    connect(CompTer.cSenal, CompInerc.cSenal);
    connect(CompTer.cTsup, cTsup);

```

```

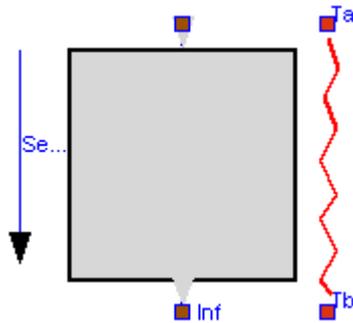
connect(CompTer.cTinf, cTinf);
connect(CompInerc.cM, cMsup);
connect(CompProf.cMinf, cMinf);
connect(ParedIzq.cM, CompIzq.cMinf);
connect(CompIzq.cMsup, CompInerc.cM);
connect(amortiguamiento.cMinf, cMinf);
connect(amortiguamiento.cMsup, CompInerc.cM);

```

```
end Sub_Capa;
```

## FirmesCarreteras.Interfaces.AdherenciaCapa

Interfaz que es común a todas las adherencias entre capas que conforman la estructura del firme.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	pos	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa. [m]

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

### Modelica definition

```
partial model AdherenciaCapa
```

```
"Interfaz que es común a todas las adherencias entre capas que conforman la estructura del firme."
```

```

//*****
*****
//Herencia:

```

```
//*****
*****
extends Interfaces.DosConectoresMecanicosSolo;
extends Interfaces.DosConectoresTermicosCapa;

//*****
*****
//Parámetros visibles de la capa de adherencia:
//*****
*****
parameter Real pos( unit="m" ) = 0
    "Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa.";

end AdherenciaCapa;
```

---

## FirmesCarreteras.Interfaces.AdherenciaMecanica

Interfaz que es común a todas las adherencias entre capas que conforman la estructura del firme.

### Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	pos	0	Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa. [m]

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.

### Modelica definition

```
partial model AdherenciaMecanica
    "Interfaz que es común a todas las adherencias entre capas que conforman la
    estructura del firme."

//*****
*****
//Herencia:
//*****
*****
extends Interfaces.DosConectoresMecanicosSolo;

//*****
*****
//Parámetros visibles de la capa de adherencia:
```

```
//*****
*****
parameter Real pos( unit="m") = 0
    "Profundidad a la que se encuentra el comienzo de la capa.";

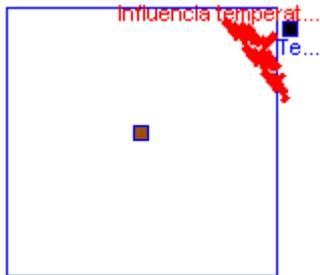
end AdherenciaMecanica;
```

## Firmes Carreteras.Interfaces.Comportamiento Inercia



### I

Interfaz de los distintos modelos de comportamiento inercial de los materiales que conforman el firme.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está usando.
Real	pos		Posición vertical dentro de la capa del elemento. [m]
Real	dz		Longitud en reposo del componente de la capa, se trata del espesor del elemento. [m]
Real	S		Superficie de la huella. [m2]
Real	N_comp[2]	{1,1}	Número de componentes en serie en el eje x y en el z respectivamente.
Real	r_ini[2]		Posición del elemento inercial con respecto al sistema de coordenadas global. [m]
Boolean	Inercia	true	Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.

### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cM	
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para recibir la señal de entrada correspondiente con la temperatura.

### Modelica definition

```

partial model ComportamientoInercial
  "Interfaz de los distintos modelos de comportamiento inercial de los
  materiales que conforman el firme."

  //*****
  //Conectores para la interacción con el exterior:
  //*****
  FirmesCarreteras.Conectores.Mecanico cM;
  input Conectores.Senal cSenal
  "Conector para recibir la señal de entrada correspondiente con la
  temperatura.";

  //*****
  //Variables de la clase:
  //*****
  //Variables:
  Real Temp( unit="°C") "Temperatura del elemento de suelo.";

  //*****
  //Parámetros visibles:
  //*****
  //Parámetros:
public
  parameter FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos DatosCapa
  "Datos del material que conforma la capa que se está usando.";
  parameter Real pos( unit="m")
  "Posición vertical dentro de la capa del elemento.";
  parameter Real dz( unit="m")
  "Longitud en reposo del componente de la capa, se trata del espesor del
  elemento.";
  parameter Real S( unit="m2") "Superficie de la huella.";
  parameter Real N_comp[2] = {1,1}
  "Número de componentes en serie en el eje x y en el z respectivamente.";
  parameter Real r_ini[2]( unit="m")
  "Posición del elemento inercial con respecto al sistema de coordenadas
  global.";
  parameter Boolean Inercia = true
  "Parámetro que indica si se consideran los efectos inerciales o no.";

  //*****
  //Parámetros no visibles:
  //*****
protected
  parameter Real dh( unit="m")= (if noEvent(N_comp[2]<>0) then dz/N_comp[2]
  else dz/N_comp[1])
  "Longitud en reposo del componente atómico que conforma el
  comportamiento.";
  parameter Real k2 = DatosCapa.k2
  "Parámetro del suelo que se calcula a partir del índice de poros del suelo
  o de la densidad relativa.";
  parameter Real Poisson = DatosCapa.coef_Poisson
  "Coeficiente de Poisson del material.";

```

```

parameter Real Ke( unit="N/m2") = DatosCapa.E
  "Constante elástica del material.";
parameter Real b( unit="Pa·s") = DatosCapa.b
  "Coeficiente de viscosidad del material.";
parameter Real rho( unit="kg/m3") = DatosCapa.rho
  "Densidad del material que conforma la capa.";
parameter Real K0 = DatosCapa.K0 "Coeficiente de empuje horizontal.";

//*****
//*****
//Ecuaciones de la clase:
//*****
//*****
equation
  Temp = cSenal.Signal;

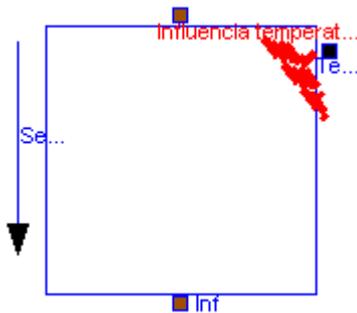
end ComportamientoInercial;

```

---

## Firmes Carreteras.Interfaces.Comportamiento Mecanico

Interfaz de los distintos modelos de comportamiento mecánico de los materiales que conforman el firme.



### Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está usando.
Real	dy		Espesor del comportamiento mecánico. [m]
Real	S		Superficie de la huella. [m2]
Real	N_comp[2]	{1,1}	Número de componentes atómicos en serie en el eje x y en el eje z respectivamente.
Real	r_inicio[2]		Posición inicial del componente en el sentido del conector cMsup al cMinf.
Boolean	Suelo	true	Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata de un suelo, false es que no es un suelo.
Integer	Posicion	3	Indica la posición dentro de la capa.
Boolean	Capa	true	Indica que el componente se encuentra en capa.

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.
input <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para recibir la señal de entrada correspondiente con la temperatura.

## Modelica definition

```
partial model ComportamientoMecanico
  "Interfaz de los distintos modelos de comportamiento mecánico de los
  materiales que conforman el firme."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends DosConectoresMecanicosSolo;

  //*****
  //*****
  //Conectores para la interacción con el exterior:
  //*****
  //*****
  input Conectores.Senal cSenal
    "Conector para recibir la señal de entrada correspondiente con la
    temperatura.";

  //*****
  //*****
  //Sistema de coordenadas de referencia global:
  //*****
  //*****
  outer FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

  //*****
  //*****
  //Variables:
  //*****
  //*****
  //Variables:
  Real Temp( unit="°C" ) "Temperatura del elemento de suelo.";
  Real dTemp( unit="°C/s", start=0 )
    "Derivada con respecto al tiempo de la temperatura.";
  Real Def( unit="def", start=0 ) "Deformación del elemento.";

  //*****
  //*****
  //Parámetros visibles:
  //*****
  //*****
  //Parámetros:
public
  parameter FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos DatosCapa
    "Datos del material que conforma la capa que se está usando.";
```

```

parameter Real dy( unit="m") "Espesor del comportamiento mecánico.";
parameter Real S( unit="m2") "Superficie de la huella.";
parameter Real N_comp[2]= {1,1}
  "Número de componentes atómicos en serie en el eje x y en el eje z
respectivamente.";
parameter Real r_inicio[2]
  "Posición inicial del componente en el sentido del conector cMsup al
cMinf.";
parameter Boolean Suelo= true
  "Indica si se trata de suelo o de algún otro material. true es que se trata
de un suelo, false es que no es un suelo.";
parameter Integer Posicion = 3 "Indica la posición dentro de la capa.";
parameter Boolean Capa = true
  "Indica que el componente se encuentra en capa.";

//*****
//*****
//Parámetros no visibles:
//*****
//*****
protected
parameter Real dh( unit="m")= (if noEvent(N_comp[2]<>0) then dy/N_comp[2]
else dy/N_comp[1])
  "Longitud en reposo del componente atómico del comportamiento mecánico del
material.";
parameter Real k2 = DatosCapa.k2
  "Parámetro del suelo que se calcula a partir del índice de poros del suelo
o de la densidad relativa.";
parameter Real Poisson = DatosCapa.coef_Poisson
  "Coeficiente de Poisson del material.";
parameter Real Ke( unit="N/m2") = DatosCapa.E
  "Constante elástica del material.";
parameter Real Mc( unit="N/m2") = DatosCapa.Mc
  "Módulo de corte del material.";
parameter Real b( unit="Pa·s") = DatosCapa.b
  "Coeficiente de viscosidad del material.";
parameter Real rho( unit="kg/m3") = DatosCapa.rho
  "Densidad del material que conforma la capa.";
parameter Real K0 = DatosCapa.K0 "Coeficiente de empuje horizontal.";
parameter Real masa = DatosCapa.rho*dy*S;

//*****
//*****
//Ecuaciones de la clase:
//*****
//*****
equation
  Temp = cSenal.Signal;
  dTemp = der(Temp);
  Def = (FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Longitud(cMinf.s - cMsup.s) - dy)
  /dy;

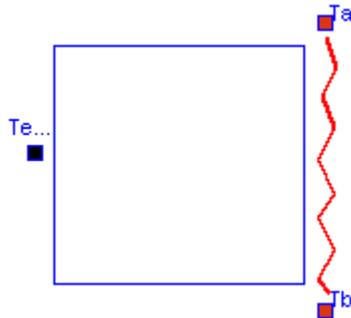
end ComportamientoMecanico;

```

---

# Firmes Carreteras.Interfaces.Comportamiento Termico

Interfaz de los distintos modelos de comportamiento térmico de los materiales que conforman el firme.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
<a href="#">CapaDatos</a>	DatosCapa		Datos del material que conforma la capa que se está usando.
Real	dy		Longitud del elemento resistivo dentro de la capa sólida. [m]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.
output <a href="#">Senal</a>	cSenal	Conector para enviar la señal de la temperatura en esa posición dentro de la capa de firme.

## Modelica definition

```

partial model ComportamientoTermico
  "Interfaz de los distintos modelos de comportamiento térmico de los
  materiales que conforman el firme."

  //*****
  //*****
  //Herencia:
  //*****
  //*****
  extends DosConectoresTermicosCapa;

  //*****
  //*****
  //Conector para comunicarse con el exterior:
  //*****
  //*****
  output Conectores.Senal cSenal
  
```

```

"Conector para enviar la señal de la temperatura en esa posición dentro de
la capa de firme.";

//*****
//*****
//Parámetros visibles:
//*****
//*****
//Parámetros:
parameter FirmesCarreteras.Estructura.Capas.CapaDatos DatosCapa
"Datos del material que conforma la capa que se está usando.";
parameter Real dy( unit="m")
"Longitud del elemento resistivo dentro de la capa sólida.";

end ComportamientoTermico;

```

---

## FirmesCarreteras.Interfaces.Bloque\_Salida

**Bloque que contiene una salida de número real que corresponde con una señal.**



### Connectors

Type	Name	Description
output	<a href="#">Senal</a> y	Conector que se utiliza como salida.

### Modelica definition

```

partial block Bloque_Salida
  "Bloque que contiene una salida de número real que corresponde con una
señal."

//*****
//*****
//Conector para comunicarse con el exterior:
//*****
//*****
  output Conectores.Senal y "Conector que se utiliza como salida.";

end Bloque_Salida;

```

---

## FirmesCarreteras.Interfaces.Bloque\_Entrada

Bloque que contiene un conector de entrada.



### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Senal</a>	cEn	Conector que se usa como la señal de entrada al bloque.

### Modelica definition

```
partial block Bloque_Entrada
  "Bloque que contiene un conector de entrada."

  //*****
  //*****
  //Conector para comunicarse con el exterior:
  //*****
  //*****
  FirmesCarreteras.Conectores.Senal cEn
  "Conector que se usa como la señal de entrada al bloque.";

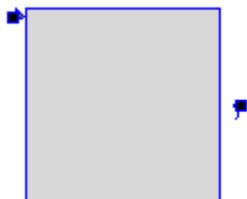
  //*****
  //*****
  //Variable de entrada:
  //*****
  //*****
  input Real x;
equation
  x = cEn.Signal;

end Bloque_Entrada;
```

---

## FirmesCarreteras.Interfaces.Bloque\_Ent\_Sal

Bloque de entrada y salida de señales.



### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Senal</a>	cEn	Conector que se usa como la señal de entrada al bloque.
output <a href="#">Senal</a>	y	Conector que se utiliza como salida.

## Modelica definition

```

partial block Bloque_Ent_Sal "Bloque de entrada y salida de señales."

//*****
//*****
//Herencia:
//*****
//*****
    extends Interfaces.Bloque\_Entrada;
    extends Interfaces.Bloque\_Salida;

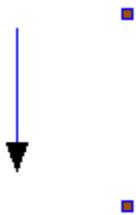
end Bloque_Ent_Sal;

```

---

## [FirmesCarreteras.Interfaces.DosConectoresMecanicos](#)

Interfaz que contiene dos conectores mecánicos que definen las variables del plano de control de un volumen de control.



## Parameters

Type	Name	Default	Description
Real	s_small	1e-6	
Real	r_inicio[2]		Vector unitario que marca la dirección inicial del elemento con respecto al plano del conector cMsup. [m]

## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

partial model DosConectoresMecanicos
  "Interfaz que contiene dos conectores mecánicos que definen las variables del
plano de control de un volumen de control."

//*****
//*****
  //Herencia:
//*****
//*****
  extends DosConectoresMecanicosSolo;

//*****
//*****
  //Sistema de coordenadas de referencia global:
//*****
//*****
  outer FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

//*****
//*****
  //Variables:
//*****
//*****
  //Variables:
  Real epsilon(unit="m")
    "Se trata de la diferencia entre el desplazamiento de un plano de control y
el otro.";
  Real f( unit="N", start=0)
    "Fuerza actuando en cada uno de los planos de control. Positiva si actua en
el plano cMinf y dirigida de cMsup a cMinf.";
  Real r_rel_a[2]( start=r_inicio, fixed=false, unit="m")
    "Posición relativa entre los dos planos de control tomando como origen el
plano del conector cMsup.";
  Real e_a[2] "Vector unitario en la dirección de cMsup a cMinf.";

//*****
//*****
  //Parámetros:
//*****
//*****
  parameter Real s_small=1e-6;
  parameter Real r_inicio[2]( unit="m")
    "Vector unitario que marca la dirección inicial del elemento con respecto al
plano del conector cMsup.";

//*****
//*****
  //Ecuaciones que relacionan las variables:
//*****
//*****
equation
  r_rel_a = cMinf.s - cMsup.s;
  epsilon = noEvent(max(FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Longitud(r_rel_a),
s_small));
//FirmesCarreteras.Utiles.Funciones.Longitud(r_rel_a);
  e_a = r_rel_a/epsilon;
  cMsup.F = -e_a*f;
  cMinf.F = -cMsup.F;

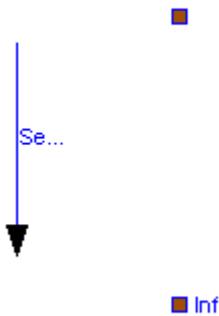
```

```
end DosConectoresMecanicos;
```

---

## FirmesCarreteras.Interfaces.DosConectoresMecanicosSolo

Interfaz que contiene dos conectores mecánicos que definen las variables del plano de control de un volumen de control.



### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	cMsup	Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Mecanico</a>	cMinf	Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.

### Modelica definition

```
partial model DosConectoresMecanicosSolo
  "Interfaz que contiene dos conectores mecánicos que definen las variables del
  plano de control de un volumen de control."

  //*****
  //*****
  //Conectores para interactuar con el exterior:
  //*****
  //*****
  Conectores.Mecanico cMsup
    "Conector mecánico situado en la parte superior del volumen de control.";
  Conectores.Mecanico cMinf
    "Conector mecánico situado en la parte inferior del volumen de control.";

end DosConectoresMecanicosSolo;
```

---

## FirmesCarreteras.Interfaces.DosConectoresTermicos

Interfaz que contiene dos conectores térmicos.



## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```

partial model DosConectoresTermicos
  "Interfaz que contiene dos conectores térmicos."

  //*****
  //Conectores para interactuar con el exterior:
  //*****
  Conectores.Termico cTsup
    "Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.";
  Conectores.Termico cTinf
    "Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.";

  //*****
  //Variables internas de la clase:
  //*****
  //Variables:
  Real dT( unit="°C")
    "Diferencia de temperatura entre la superficie del elemento y el fondo.
    Cuando es negativa es que la temperatura del fondo del elemento es mayor.";
  Real Q_flujo( unit="W/m2")
    "Flujo de calor que entra y sale del elemento por unidad de superficie.";

  //*****
  //Ecuaciones que relacionan las variables:
  //*****
equation
  dT = cTsup.T - cTinf.T;
  cTsup.Qt = Q_flujo;
  cTinf.Qt = -Q_flujo;

end DosConectoresTermicos;

```

---

# FirmesCarreteras.Interfaces.DosConectoresTermicosSolo

Interfaz que contiene dos conectores térmicos.



## Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

## Modelica definition

```
partial model DosConectoresTermicosSolo
  "Interfaz que contiene dos conectores térmicos."

  //*****
  //*****
  //Conectores para interaccionar con el exterior:
  //*****
  //*****
  Conectores.Termico cTsup
    "Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.";
  Conectores.Termico cTinf
    "Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.";

  //*****
  //*****
  //Variables internas de la clase:
  //*****
  //*****
  //Variables:
  Real Q_flujo( unit="W/m2")
    "Flujo de calor que entra y sale del elemento por unidad de superficie.";

  //*****
  //*****
  //Ecuaciones que relacionan las variables de la clase:
  //*****
  //*****
```

```
equation
  cTsup.Qt = Q_flujo;
  cTinf.Qt = -Q_flujo;

end DosConectoresTermicosSolo;
```

---

## [FirmesCarreteras.Interfaces.DosConectoresTermicosCapa](#)

Interfaz que contiene dos conectores térmicos.



### Connectors

Type	Name	Description
<a href="#">Termico</a>	cTsup	Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.
<a href="#">Termico</a>	cTinf	Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.

### Modelica definition

```
partial model DosConectoresTermicosCapa
  "Interfaz que contiene dos conectores térmicos."

  //*****
  //Conectores para interactuar con el exterior:
  //*****
  Conectores.Termico cTsup
    "Conector térmico situado en la parte superior del volumen de control.";
  Conectores.Termico cTinf
    "Conector térmico situado en la parte inferior del volumen de control.";

end DosConectoresTermicosCapa;
```

---

## [FirmesCarreteras.Conectores](#)

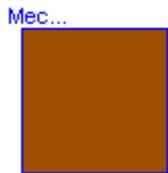
**Paquete que contiene los conectores que agrupan las variables que conectan a los componentes.**

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Mecanico</a>	Conector que transporta las variables mecánicas que interaccionan entre los elementos.
<a href="#">Termico</a>	Conector que contiene las variables térmicas de interacción entre los elementos.
<a href="#">Senal</a>	Conector para establecer la entrada o salida de una señal.

## FirmesCarreteras.Conectores.Mecanico

**Conector que transporta las variables mecánicas que interaccionan entre los elementos.**



### Contents

Type	Name	Description
Real	s[2]	Variable que representa la posición del plano de control del volumen al que pertenece el conector. [m]
flow Real	F[2]	Variable que representa la fuerza a través del plano de control del volumen al que pertenece el conector. [N]

### Modelica definition

```
connector Mecanico
  "Conector que transporta las variables mecánicas que interaccionan entre los
  elementos."

  //*****
  //*****
  //Variables que contiene el conector:
  //*****
  //*****
  Real s[2]( unit="m")
    "Variable que representa la posición del plano de control del volumen al
    que pertenece el conector.";
  flow Real F[2]( unit="N")
    "Variable que representa la fuerza a través del plano de control del
    volumen al que pertenece el conector.";

end Mecanico;
```

---

## FirmesCarreteras.Conectores.Termico

Conector que contiene las variables térmicas de interacción entre los elementos.

Term...



### Contents

Type	Name	Description
Real	T	Temperatura en el plano de control en el que se encuentra el conector. [°C]
flow Real	Qt	Flujo de calor a través del plano de control por unidad de superficie. [W/m2]

### Modelica definition

```
connector Termico
  "Conector que contiene las variables térmicas de interacción entre los
  elementos."

  //*****
  //Variables que contiene el conector:
  //*****
  Real T( unit="°C")
    "Temperatura en el plano de control en el que se encuentra el conector.";
  flow Real Qt( unit="W/m2")
    "Flujo de calor a través del plano de control por unidad de superficie.";

end Termico;
```

---

## FirmesCarreteras.Conectores.Senal

Conector para establecer la entrada o salida de una señal.



### Contents

Type	Name	Description
Real	Signal	Señal que se quiere transmitir.

### Modelica definition

```
connector Senal
  "Conector para establecer la entrada o salida de una señal."

//*****
//*****
  //Variables que contiene el conector:
//*****
//*****
  Real Signal "Señal que se quiere transmitir.";
end Senal;
```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos

Paquete que contiene algunos modelos de ejemplo.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Validaciones</a>	En este paquete se encuentran los modelos empleados en la validación de los componentes del sistema.
<a href="#">Casos Estudio</a>	Casos de estudio que se han modelizado.

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones

En este paquete se encuentran los modelos empleados en la validación de los componentes del sistema.

## Package Content

Name	Description
<a href="#">Val_Carga</a>	Modelos que se han utilizado en la validación de la carga aplicada.
<a href="#">Val Estructura</a>	Modelos empleados en la validación de los componentes que conforman las estructuras.
<a href="#">Val Entorno</a>	Modelos desarrollados para la validación de los componentes que representan el entorno del sistema.

---

## [FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val\\_Carga](#)

Modelos que se han utilizado en la validación de la carga aplicada.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Validacion_ModeloCarga</a>	

---

## [FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val\\_Carga.Validacion\\_ModeloCarga](#)

### Modelica definition

```
model Validacion_ModeloCarga
```

```
    inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;  
    FirmesCarreteras.Carga.FuerzaAplicada fuerzaAplicada;  
    FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal(  
        Offset=0,  
        TiempoIni=1,  
        Amplitud=1,  
        Fase=0,  
        FreqHz=1,  
        TiempoFin=3);  
    Estructura.Componentes.ElementoInercial elementoInercial(  
        rho=1500,  
        dy=0.5,  
        S=0.053,  
        pos=0,  
        r_ini={0,0});  
    Estructura.Componentes.ElementoInercial elementoInercial1(  
        rho=1500,  
        dy=0.5,  
        S=0.053,  
        pos=0,
```

```

    r_ini={0,0});
    Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico(DatosHuella=
        FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=3.4),
        n=2,
        Amplitud_x=1,
        Cr=0.012);
    FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal1(
        Offset=0,
        TiempoIni=1,
        Amplitud=1,
        Fase=0,
        FreqHz=2,
        TiempoFin=3);
equation
    connect(fuente_Senoidal.y, fuerzaAplicada.cSenal);
    connect(elementoInercial.cM, fuerzaAplicada.cM);
    connect(modelo_Carga_Trafico.mecanico, elementoInercial1.cM);
    connect(fuente_Senoidal1.y, fuerzaAplicada.cSenal2);
end Validacion_ModeloCarga;

```

---

## [FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val\\_Estructura](#)

Modelos empleados en la validación de los componentes que conforman las estructuras.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Validacion_Comp_Inercial</a>	Validación del comportamiento inercial de un material.
<a href="#">Validacion_Comp_Elastico</a>	Validación del comportamiento elástico de un material.
<a href="#">Validacion_Comp_ViscoElastico</a>	Validación del comportamiento visco-elástico del un material. Se trata del modelo de Voight.
<a href="#">Validacion_Amortiguamiento</a>	Validación del amortiguamiento del material.
<a href="#">Validacion_Sub_Capa_Elastica</a>	Validación de la sub-capa elástica.
<a href="#">Validacion_Sub_Capa_Viscoelastica</a>	Validación de la sub-capa viscoelástica.
<a href="#">Validacion_Capa_ViscoElastica</a>	Validación del comportamiento de la capa viscoelástica.
<a href="#">Validacion_Capa_Elastica</a>	Validación del comportamiento de la capa elástica.
<a href="#">Validacion_Comp_ViscoElastico_2</a>	Validación del comportamiento visco-elástico del un material. Se trata del modelo de Voight.

---

# FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Comp\_Inercial

Validación del comportamiento inercial de un material.

## Modelica definition

```
model Validacion_Comp_Inercial
  "Validación del comportamiento inercial de un material."

  inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija1;
  FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo1(dy=0.1, DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
  Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial1(
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    pos=0,
    dz=0.1,
    S=0.053,
    r_ini={0,0});
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico(Amplitud_x=0, DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.4),
    Amplitud_z=-1);
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija2;
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija3;
  FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo2(dy=0.1, DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
  Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial2(
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    pos=0,
    dz=0.1,
    S=0.053,
    r_ini={0,0});
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico1(          DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.4), Amplitud_x=1);
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija4;
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija5;
  FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo3(dy=0.1, DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
  Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial3(
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    pos=0,
    dz=0.1,
    S=0.053,
    r_ini={0,0});
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico2(          DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.4),
    Amplitud_z=0,
```

```

    Amplitud_x=1);
    FirmsCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija6;
equation
    connect(temperaturaFija1.cT, comp_TermicoResistivo1.cTsup);
    connect(comp_Inercial1.cSenal, comp_TermicoResistivo1.cSenal);
    connect(modelo_Carga_Trafico.mecanico, comp_Inercial1.cM);
    connect(temperaturaFija2.cT, comp_TermicoResistivo1.cTinf);
    connect(comp_Inercial2.cSenal, comp_TermicoResistivo2.cSenal);
    connect(modelo_Carga_Trafico1.mecanico, comp_Inercial2.cM);
    connect(temperaturaFija4.cT, comp_TermicoResistivo2.cTinf);
    connect(comp_TermicoResistivo2.cTsup, temperaturaFija3.cT);
    connect(temperaturaFija5.cT, comp_TermicoResistivo3.cTsup);
    connect(modelo_Carga_Trafico2.mecanico, comp_Inercial3.cM);
    connect(temperaturaFija6.cT, comp_TermicoResistivo3.cTinf);
    connect(comp_TermicoResistivo3.cSenal, comp_Inercial3.cSenal);
end Validacion_Comp_Inercial;

```

---

## FirmsCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Comp\_Elastico

**Validación del comportamiento elástico de un material.**

### Modelica definition

```

model Validacion_Comp_Elastico
    "Validación del comportamiento elástico de un material."
    inner FirmsCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

    FirmsCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo1(posicion_z=0.10,
        posicion_x=0);
    FirmsCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija1;
    FirmsCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
        comp_TermicoResistivo1(dy=0.1, DatosCapa=
            FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
    Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico comp_Elastico1(
        dy=0.1,
        S=0.053,
        r_inicio={0,1},
        N_comp={0,1},
        Capa=false,
        DatosCapa=
            FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
    Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial1(
        DatosCapa=
            FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
        pos=0,
        dz=0.1,
        S=0.053,
        r_ini={0,0},
        Inercia=false);
    Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico(Amplitud_x=0,
        DatosHuella=FirmsCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=120));

```

```

FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija2;
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo2(posicion_z=0.10,
    posicion_x=0);
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija3;
FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo2(dy=0.1, DatosCapa=
        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico comp_Elastico2(
    dy=0.1,
    S=0.053,
    r_inicio={0,1},
    N_comp={0,1},
    Capa=false,
    DatosCapa=
        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico1(
    Amplitud_x=0,
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=120));
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija4;
equation
connect(comp_Elastico1.cMinf, suelo1.cM);
connect(comp_TermicoResistivo1.cSenal, comp_Elastico1.cSenal);
connect(temperaturaFija1.cT, comp_TermicoResistivo1.cTsup);
connect(comp_Inercial1.cSenal, comp_TermicoResistivo1.cSenal);
connect(comp_Inercial1.cM, comp_Elastico1.cMsup);
connect(modelo_Carga_Trafico.mecanico, comp_Inercial1.cM);
connect(temperaturaFija2.cT, comp_TermicoResistivo1.cTinf);
connect(comp_Elastico2.cMinf,suelo2. cM);
connect(comp_TermicoResistivo2.cSenal,comp_Elastico2. cSenal);
connect(temperaturaFija4.cT, comp_TermicoResistivo2.cTinf);
connect(comp_TermicoResistivo2.cTsup, temperaturaFija3.cT);
connect(modelo_Carga_Trafico1.mecanico, comp_Elastico2.cMsup);
end Validacion_Comp_Elastico;

```

---

## **FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Comp\_ViscoElastico**

**Validación del comportamiento visco-elástico del un material. Se trata del modelo de Voight.**

### **Modelica definition**

```

model Validacion_Comp_ViscoElastico
    "Validación del comportamiento visco-elástico del un material. Se trata del
    modelo de Voight."
    inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

    FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo1(posicion_x=0,
        posicion_z=0.3);
    FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija1;
    FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
        comp_TermicoResistivo1(dy=0.1, DatosCapa=
            FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa());

```

```

Estructura.Comportamientos.Comp_ViscoElastico comp_ViscoElasticol(
    dy=0.3,
    S=0.053,
    DatosCapa=
        FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(),
    r_inicio={0,1},
    N_comp={0,1},
    Suelo=false);
Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial1(
    pos=0,
    dz=0.3,
    r_ini={0,0},
    S=0.053,
    DatosCapa=
        FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa());
FirmsCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija3;
FirmsCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo2(        DatosCapa=
        FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(),
dy=0.1);
Estructura.Comportamientos.Comp_ViscoElastico comp_ViscoElastico2(
    dy=0.3,
    S=0.053,
    DatosCapa=
        FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(),
    r_inicio={0,1},
    N_comp={0,1},
    Suelo=false,
    n=0.5,
    Tref=50);
Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial2(
    pos=0,
    dz=0.3,
    r_ini={0,0},
    S=0.053,
    DatosCapa=
        FirmsCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa());
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico1(
        DatosHuella=
        FirmsCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.4), Amplitud_x=0);
Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable(Tmax=
    50);
Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal(
    Offset=0,
    TiempoIni=0,
    TiempoFin=3,
    Amplitud=1,
    FreqHz=0.5,
    Fase=0);
Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(Tfija=8,
    posicion_z=0.3);
Utiles.Fuentes.Fuente_Impulso fuente_Impulso(
    Offset=0,
    TiempoIni=1,
    Amplitud=1);
Utiles.Fuentes.Fuente_Cero fuente_Cero;
Carga.FuerzaAplicada fuerzaAplicada;
equation
connect(comp_Inercial1.cM, comp_ViscoElasticol.cMsup);
connect(comp_TermicoResistivo1.cTsup, temperaturaFija1.cT);
connect(comp_TermicoResistivo1.cSenal, comp_Inercial1.cSenal);

```

```

connect(comp_TermicoResistivo1.cSenal, comp_ViscoElastico1.cSenal);
connect(temperaturaFija3.cT, comp_TermicoResistivo1.cTinf);
connect(comp_ViscoElastico1.cMinf, suelo1.cM);
connect(comp_TermicoResistivo2.cSenal, comp_Inercial2.cSenal);
connect(comp_TermicoResistivo2.cSenal, comp_ViscoElastico2.cSenal);
connect(modelo_Carga_Trafico1.mecanico, comp_Inercial2.cM);
connect(comp_Inercial2.cM, comp_ViscoElastico2.cMsup);
connect(temperaturaVariable.cT, comp_TermicoResistivo2.cTsup);
connect(fuente_Senoidal.y, temperaturaVariable.y);
connect(sueloCoordenadas.mecanico, comp_ViscoElastico2.cMinf);
connect(sueloCoordenadas.termico, comp_TermicoResistivo2.cTinf);
connect(fuerzaAplicada.cM, comp_Inercial1.cM);
connect(fuente_Impulso.y, fuerzaAplicada.cSenal);
connect(fuente_Cero.y, fuerzaAplicada.cSenal2);
end Validacion_Comp_ViscoElastico;

```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Amortiguamiento

**Validación del amortiguamiento del material.**

### Modelica definition

```

model Validacion_Amortiguamiento
  "Validación del amortiguamiento del material."

  inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

  FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp\_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo1(dy=0.1, DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular\(\));
  Estructura.Comportamientos.Comp\_Inercial Masa_z(

DatosCapa=FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular\(\),
  pos=0,
  dz=0.1,
  S=0.053,
  r_ini={0,0});

  Carga.Modelo\_Carga\_Trafico Carga_z(
    Amplitud_x=0,
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=3.4),
    Amplitud_z=1);
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija2;
  Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo(posicion_z=0.1, posicion_x=0);
  Estructura.Comportamientos.Comp\_Elastico Eje_v_compElastico(

DatosCapa=FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular\(\),
  dy=0.1,
  S=0.053,
  r_inicio={0,1},
  Capa=false);

```

```

Entorno.EntornoMecanico.Pared pared(posicion_z=0, posicion_x=-0.13);
Entorno.EntornoMecanico.Pared pared1(posicion_z=0, posicion_x=0.13);
Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico Eje_x_com_izq(

DatosCapa=FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    dy=0.13,
    S=0.053,
    r_inicio={-1,0},
    Posicion=1,
    Capa=false);

Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial Masa_x(

DatosCapa=FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    pos=0,
    dz=0.1,
    S=0.053,
    r_ini={0,0});

Carga.Modelo_Carga_Trafico Carga_x(
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=3.4),
    Amplitud_x=1,
    Amplitud_z=1);
Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico Eje_x_com_der(

DatosCapa=FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    dy=0.13,
    S=0.053,
    r_inicio={1,0},
    Posicion=2,
    Capa=false);

FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo2(dy=0.1, DatosCapa=
        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija1;
Estructura.Comportamientos.Amortiguamiento Amort_z(
    masa=7.95,
    E=100e6,
    Poisson=0.4,
    amort_x=0,
    amort_z=0);
Estructura.Comportamientos.Amortiguamiento Amort_x(
    masa=7.95,
    E=100e6,
    Poisson=0.4,
    amort_x=0,
    amort_z=0);
Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo1(posicion_z=0.1, posicion_x=0);
Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico Eje_v_compElasticol(

DatosCapa=FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    dy=0.1,
    S=0.053,
    r_inicio={0,1},
    Capa=false);

equation
connect(Masa_z.cSenal, comp_TermicoResistivo1.cSenal);
connect(Carga_z.mecanico, Masa_z.cM);

```

```

connect(temperaturaFija2.cT, comp_TermicoResistivo1.cTinf);
connect(Masa_z.cM, Eje_v_compElastico.cMsup);
connect(Eje_v_compElastico.cMinf, suelo.cM);
connect(temperaturaFija2.cT, comp_TermicoResistivo1.cTsup);
connect(Eje_v_compElastico.cSenal, comp_TermicoResistivo1.cSenal);
connect(pared.cM, Eje_x_com_izq.cMsup);
connect(Carga_x.mecanico, Masa_x.cM);
connect(Eje_x_com_izq.cMinf, Masa_x.cM);
connect(Eje_x_com_der.cMsup, Masa_x.cM);
connect(Eje_x_com_der.cMinf, pared1.cM);
connect(temperaturaFija1.cT, comp_TermicoResistivo2.cTinf);
connect(temperaturaFija1.cT, comp_TermicoResistivo2.cTsup);
connect(comp_TermicoResistivo2.cSenal, Eje_x_com_der.cSenal);
connect(comp_TermicoResistivo2.cSenal, Masa_x.cSenal);
connect(comp_TermicoResistivo2.cSenal, Eje_x_com_izq.cSenal);
connect(Amort_z.cMsup, Masa_z.cM);
connect(Amort_z.cMinf, suelo.cM);
connect(Amort_x.cMsup, Masa_x.cM);
connect(Amort_x.cMinf, suelo1.cM);
connect(Eje_v_compElastico1.cMsup, Masa_x.cM);
connect(Eje_v_compElastico1.cMinf, suelo1.cM);
connect(Eje_v_compElastico1.cSenal, comp_TermicoResistivo2.cSenal);
end Validacion_Amortiguamiento;

```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Sub\_Capa\_Elastica

**Validación de la sub-capa elástica.**

### **Modelica definition**

```

model Validacion_Sub_Capa_Elastica
  "Validación de la sub-capa elástica."

  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija(
    Tfija=50);
  Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo(
    posicion_x=0,
    posicion_z=0.5);
  inner Utiles.SistemaCoordenadas Sist;
  FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaElastica Zahorra(
    numero_subcapa=0,
    redeclare model Comp_Izquierda =
      FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico,
    posicion_capa=0,
    Espesor=0.5,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.ZahorraNatural());

  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico1(
    DatosHuella=
      FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.5), Amplitud_x=1);
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija1(

```

```

        Tfija=50);
Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo1(          posicion_x=0,
        posicion_z=0.5);
FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaElastica Granular(
        numero_subcapa=0,
        redeclare model Comp_Izquierda =
                FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico,
        posicion_capa=0,
        Espesor=0.5,
        DatosCapa=
                FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico2(
        DatosHuella=
                FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.5), Amplitud_x=1);
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija2(
        Tfija=50);
Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo2(          posicion_x=0,
        posicion_z=0.5);
FirmesCarreteras.Estructura.Sub_Capas.sub_CapaElastica Cohesivo(
        numero_subcapa=0,
        redeclare model Comp_Izquierda =
                FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_Elastico,
        posicion_capa=0,
        Espesor=0.5,
        DatosCapa=
                FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloCohesivo());
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico3(
        DatosHuella=
                FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.5), Amplitud_x=1);
equation
connect(suelo.cM, Zahorra.cMinf);
connect(temperaturaFija.cT, Zahorra.cTsup);
connect(temperaturaFija.cT, Zahorra.cTinf);
connect(Zahorra.cMsup, modelo_Carga_Trafico1.mecanico);
connect(suelo1.cM, Granular.cMinf);
connect(temperaturaFija1.cT, Granular.cTsup);
connect(temperaturaFija1.cT, Granular.cTinf);
connect(Granular.cMsup, modelo_Carga_Trafico2.mecanico);
connect(suelo2.cM, Cohesivo.cMinf);
connect(temperaturaFija2.cT, Cohesivo.cTsup);
connect(temperaturaFija2.cT, Cohesivo.cTinf);
connect(Cohesivo.cMsup, modelo_Carga_Trafico3.mecanico);
end Validacion_Sub_Capa_Elastica;

```

---

## **FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Sub\_Capa\_Viscoelastica**

**Validación de la sub-capa viscoelástica.**

### **Modelica definition**

```
model Validacion_Sub_Capa_Viscoelastica
```

"Validación de la sub-capa viscoelástica."

```
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija2(  
    Tfija=30);  
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico2(Amplitud_x=1,  
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=12));  
Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica sub_CapaViscoElastica1(  
    numero_subcapa=0,  
    Espesor=0.5,  
    angulo=40,  
    DatosCapa=  
        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(  
            desfase=40));  
  
Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(  
    posicion_z=0.5, Tfija=20);  
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico3(  
    DatosHuella=  
        FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.5), Amplitud_x=1);  
Estructura.Sub_Capas.sub_CapaViscoElastica sub_CapaViscoElastica2(  
    numero_subcapa=0,  
    Espesor=0.5,  
    DatosCapa=  
        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(  
            E=1e9,  
            Mc=1e8,  
            b=1e8,  
            desfase=40),  
    n=0.5);  
Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas1(Tfija=8,  
    posicion_z=0.5);  
Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable(Tmax=  
    30, Tmin=10);  
Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal(  
    Offset=0,  
    TiempoFin=40,  
    Amplitud=1,  
    Fase=0,  
    TiempoIni=0,  
    FreqHz=1);  
equation  
connect(modelo_Carga_Trafico2.mecanico, sub_CapaViscoElastica1.cMsup);  
connect(sueloCoordenadas.mecanico, sub_CapaViscoElastica1.cMinf);  
connect(sueloCoordenadas.termico, sub_CapaViscoElastica1.cTinf);  
connect(modelo_Carga_Trafico3.mecanico, sub_CapaViscoElastica2.cMsup);  
connect(sueloCoordenadas1.mecanico, sub_CapaViscoElastica2.cMinf);  
connect(sueloCoordenadas1.termico, sub_CapaViscoElastica2.cTinf);  
connect(temperaturaVariable.cT, sub_CapaViscoElastica2.cTsup);  
connect(fuente_Senoidal.y, temperaturaVariable.y);  
connect(temperaturaFija2.cT, sub_CapaViscoElastica1.cTsup);  
end Validacion_Sub_Capa_Viscoelastica;
```

---

# FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Capa\_ViscoElastica

Validación del comportamiento de la capa viscoelástica.

## Modelica definition

```
model Validacion_Capa_ViscoElastica
  "Validación del comportamiento de la capa viscoelástica."

  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija2(
    Tfija=23);
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico(
    Cr=0.4,
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(
      Presion=0.7e6,
      a=0.1585,
      v=5.5));
  Estructura.Capas.Capa_ViscoElastica capa_ViscoElastica1(
    Suelo=false,
    Espesor=0.148,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(
        E=1e9,
        Mc=1e8,
        b=1e5,
        desfase=40),
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(a=0.1585));
  Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(Tfija=23,
    posicion_z=0.148);
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico1(
    DatosHuella=
      FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=3.5), Cr=0.4);
  Estructura.Capas.Capa_ViscoElastica capa_ViscoElastica2(
    Suelo=false,
    Espesor=0.2,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(
        E=1e9,
        Mc=1e8,
        b=1e5),
    n=0.5);
  Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas1(posicion_z=
    0.2);
  Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable(Tmax=
    30);
  Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal(
    Offset=0,
    TiempoIni=0,
    TiempoFin=5,
    Amplitud=1,
    FreqHz=10,
    Fase=0);
equation
  connect(capa_ViscoElastica1.cMinf, sueloCoordenadas.mecanico);
  connect(sueloCoordenadas.termico, capa_ViscoElastica1.cTinf);
```

```

connect(capa_ViscoElastical.cTsup, temperaturaFija2.cT);
connect(capa_ViscoElastical.cMsup, modelo_Carga_Trafico.mecanico);
connect(capa_ViscoElastica2.cMinf, sueloCoordenadas1.mecanico);
connect(sueloCoordenadas1.termico, capa_ViscoElastica2.cTinf);
connect(capa_ViscoElastica2.cMsup, modelo_Carga_Trafico1.mecanico);
connect(temperaturaVariable.cT, capa_ViscoElastica2.cTsup);
connect(fuente_Senoidal.y, temperaturaVariable.y);
end Validacion_Capa_ViscoElastica;

```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\_Capa\_Elastica

Validación del comportamiento de la capa elástica.

### Modelica definition

```

model Validacion_Capa_Elastica
  "Validación del comportamiento de la capa elástica."

  inner Utiles.SistemaCoordenadas Sist;
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija2(
    Tfija=50);
  FirmesCarreteras.Estructura.Capas.Capa\_Elastica capa_Elastical(
    Inercia=true,
    Espesor=0.5,
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(Presion=1.224e6),
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(
        E=100e6,
        Mc=1e6,
        Amort_x=0.035,
        Amort_z=0.035));

  Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo2(
    posicion_x=0,
    posicion_z=0.5);
  Carga.Modelo\_Carga\_Trafico modelo_Carga_Trafico(
    Amplitud_x=1,
    DatosHuella=FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(
      Presion=1.224e6,
      a=0.13,
      v=3.5));
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija1(
    Tfija=50);
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija3(
    Tfija=50);
  FirmesCarreteras.Estructura.Capas.Capa\_Elastica capa_Elastica2(
    Espesor=1,
    Inercia=true,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(
        E=1e5,
        Mc=1e6,
        Amort_x=0.35,

```

```

        Amort_z=0.35));
Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo1(posicion_z=1, posicion_x=0);
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico1(
        DatosHuella=
        FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1( v=3.5), Amplitud_x=1);
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija4(
        Tfija=50);
equation
connect(temperaturaFija1.cT, capa_Elastical.cTinf);
connect(temperaturaFija2.cT, capa_Elastical.cTsup);
connect(modelo_Carga_Trafico.mecanico, capa_Elastical.cMsup);
connect(capa_Elastical.cMinf, suelo2.cM);
connect(temperaturaFija4.cT, capa_Elastica2.cTinf);
connect(temperaturaFija3.cT, capa_Elastica2.cTsup);
connect(modelo_Carga_Trafico1.mecanico, capa_Elastica2.cMsup);
connect(capa_Elastica2.cMinf, suelo1.cM);
end Validacion_Capa_Elastica;

```

---

## [FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Estructura.Val idacion\\_Comp\\_ViscoElastico\\_2](#)

**Validación del comportamiento visco-elástico del un material. Se trata del modelo de Voight.**

### Modelica definition

```

model Validacion_Comp_ViscoElastico_2
  "Validación del comportamiento visco-elástico del un material. Se trata del
  modelo de Voight."
  inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;

  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo1(posicion_x=0,
    posicion_z=0.03);
  FirmesCarreteras.Estructura.Comportamientos.Comp_TermicoResistivo
    comp_TermicoResistivo(dy=0.1, DatosCapa=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa());
  Estructura.Comportamientos.Comp_ViscoElastico comp_ViscoElastico1(
    r_inicio={0,1},
    N_comp={0,1},
    Suelo=false,
    S=3e-3,
    DatosCapa=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(
    Mc=2e6, b=2e6),
    Capa=false,
    dy=0.03,
    Cambio=true,
    Tref=25,
    Frecload=1,
    n=1);
  Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial1(
    pos=0,

```

```

r_ini={0,0},
S=0.053,
dz=0.03,
DatosCapa=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(
        Mc=200e9,
        b=2e8,
        desfase=35);
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija3(
    Tfija=24);
Utiles.Fuentes.Fuente_Cero fuente_Cero;
Carga.FuerzaAplicada_2 fuerzaAplicada(DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(Presion=2e5, a=0.03));
Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal(
    Offset=0,
    TiempoIni=1,
    TiempoFin=40,
    Amplitud=1,
    Fase=0,
    FreqHz=1);
Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable(Tmax=
    50);
Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal1(
    Offset=0,
    TiempoIni=0,
    Amplitud=1,
    Fase=0,
    TiempoFin=40,
    FreqHz=0.1);
equation
connect(comp_Inercial1.cM, comp_ViscoElastico1.cMsup);
connect(comp_TermicoResistivo1.cSenal, comp_Inercial1.cSenal);
connect(comp_TermicoResistivo1.cSenal, comp_ViscoElastico1.cSenal);
connect(temperaturaFija3.cT, comp_TermicoResistivo1.cTinf);
connect(comp_ViscoElastico1.cMinf, suelo1.cM);
connect(fuerzaAplicada.cM, comp_Inercial1.cM);
connect(fuente_Cero.y, fuerzaAplicada.cSenal2);
connect(fuente_Senoidal.y, fuerzaAplicada.cSenal);
connect(fuente_Senoidal1.y, temperaturaVariable.y);
connect(temperaturaVariable.cT, comp_TermicoResistivo1.cTsup);
end Validacion_Comp_ViscoElastico_2;

```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val\_Entorno

Modelos desarrollados para la validación de los componentes que representan el entorno del sistema.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">Validacion_Entorno_Mecanico</a>	Validación del entorno mecánico modelado.
<a href="#">Validacion_Entorno_Termico</a>	Validación de los componentes que se emplean en el entorno térmico.

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val\_Entorno.Validacion\_Entorno\_Mecanico

Validación del entorno mecánico modelado.

### Modelica definition

```
model Validacion_Entorno_Mecanico
  "Validación del entorno mecánico modelado."

  inner FirmesCarreteras.Utiles.SistemaCoordenadas Sist;
  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo(posicion_x=0,
    posicion_z=0.1);
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico;
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico1;
  Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial(
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    pos=0,
    dz=0.1,
    S=0.053,
    r_ini={0,0});

  Utiles Fuentes.Fuente_Cero fuente_Cero;
  Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(
    posicion_z=0.1,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    Tfija=8);

  Estructura.Componentes.ElementoTermicoResistivo elementoTermicoResistivo(
    dy=0.1, K=1.5);
  Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial3(
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
    pos=0,
```

```

dz=0.1,
S=0.053,
r_ini={0,0});

Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable(Tmax=30);
Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal fuente_Senoidal(
  Offset=0,
  TiempoIni=0,
  TiempoFin=3,
  Amplitud=1,
  FreqHz=1,
  Fase=0);
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico2;
Estructura.Comportamientos.Comp_Inercial comp_Inercial1(
  DatosCapa=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(),
  pos=0,
  dz=0.1,
  S=0.053,
  r_ini={0,0});

Entorno.EntornoMecanico.Pared pared(posicion_z=0, posicion_x=0.1);
equation
connect(comp_Inercial.cM, modelo_Carga_Trafico.mecanico);
connect(comp_Inercial.cM, suelo.cM);
connect(sueloCoordenadas.termico, elementoTermicoResistivo.cTinf);
connect(modelo_Carga_Trafico1.mecanico, comp_Inercial3.cM);
connect(comp_Inercial3.cM, sueloCoordenadas.mecanico);
connect(fuente_Cero.y, comp_Inercial3.cSenal);
connect(temperaturaVariable.cT, elementoTermicoResistivo.cTsup);
connect(fuente_Senoidal.y, temperaturaVariable.y);
connect(comp_Inercial1.cM, modelo_Carga_Trafico2.mecanico);
connect(pared.cM, comp_Inercial1.cM);
connect(fuente_Cero.y, comp_Inercial.cSenal);
connect(comp_Inercial1.cSenal, fuente_Cero.y);
end Validacion_Entorno_Mecanico;

```

---

## [FirmesCarreteras.Ejemplos.Validaciones.Val Entorno.Validacion\\_Entorno\\_Termico](#)

**Validación de los componentes que se emplean en el entorno térmico.**

### **Modelica definition**

```

model Validacion_Entorno_Termico
  "Validación de los componentes que se emplean en el entorno térmico."
  Entorno.EntornoTermico.EntornoConveccion entornoConveccion;
  Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable(
    Tmax=30, Tmin=10);

  Estructura.Componentes.ElementoTermicoCapacitivo elementoTermicoCapacitivo(
    Datos=

```

```

        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(
            Cp=1200),
        T(start=8),
        deltax=0.01);
    Utiles.Fuentes.Fuente\_Senoidal fuente_Senoidal(
        Offset=0,
        Amplitud=1,
        TiempoIni=0,
        TiempoFin=86400,
        FreqHz=1.1574e-5,
        Fase=-3.1415/2);
    Entorno.EntornoTermico.EntornoRadiacionAtmosfera entornoRadiacionAtmosfera(
        Ee=0.9, Ea=0.9);
    Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable1(
        Tmax=30, Tmin=10);
    Entorno.EntornoTermico.EntornoRadiacion entornoRadiacion(alpha=0.15);
    Utiles.Fuentes.Fuente\_Senoidal fuente_Senoidal1(
        Offset=0,
        TiempoIni=0,
        TiempoFin=86400,
        FreqHz=1.1574e-5,
        Fase=-3.1415/2,
        Amplitud=900);
    Estructura.Componentes.ElementoTermicoResistivo elementoTermicoResistivo(
        K=1.3, dy=0.05);
    Estructura.Componentes.ElementoTermicoResistivo elementoTermicoResistivo1(
        K=1.3, dy=0.02);
    Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable temperaturaVariable2(Tmin=
        10, Tmax=20);
    Utiles.Fuentes.Fuente\_Senoidal fuente_Senoidal2(
        Offset=0,
        Amplitud=1,
        TiempoIni=0,
        TiempoFin=86400,
        FreqHz=1.1574e-5,
        Fase=-3.1415/2);
equation
    connect(fuente_Senoidal1.y, entornoRadiacion.cSenal);
    connect(fuente_Senoidal.y, temperaturaVariable.y);
    connect(temperaturaVariable1.y, fuente_Senoidal.y);
    connect(temperaturaVariable1.cT, entornoRadiacionAtmosfera.cTsup);
    connect(entornoRadiacion.cT, elementoTermicoCapacitivo.cT);
    connect(entornoRadiacionAtmosfera.cTinf, elementoTermicoCapacitivo.cT);
    connect(elementoTermicoResistivo.cTinf, elementoTermicoResistivo1.cTsup);
    connect(elementoTermicoCapacitivo.cT, elementoTermicoResistivo.cTsup);
    connect(elementoTermicoCapacitivo.cT, entornoConveccion.cTsup);
    connect(entornoConveccion.cTinf, temperaturaVariable.cT);
    connect(temperaturaVariable2.cT, elementoTermicoResistivo1.cTinf);
    connect(fuente_Senoidal2.y, temperaturaVariable2.y);
end Validacion_Entorno_Termico;

```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Casos\_Estudio

Casos de estudio que se han modelizado.

### Package Content

Name	Description
<a href="#">CapaEconTemp</a>	Cálculo de la temperatura superficial del firme debido al balance energético en la superficie.
<a href="#">CapaEconTemp2</a>	Variación de la temperatura en una estructura formada por capa visco y capa elástica.
<a href="#">DosCapasElasticas</a>	Modelo formado por dos capas elásticas de distinto material.
<a href="#">DosCapasViscoyElastica</a>	Modelo formado por dos capas de distinto material una de ellas viscoelástica.
<a href="#">CasoPistaEnsayo</a>	Estructura de uno de los ensayos realizados en la Pista de Ensayo de firmes del CEDEX.

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Casos\_Estudio.CapaEconTemp

Cálculo de la temperatura superficial del firme debido al balance energético en la superficie.

### Modelica definition

```
model CapaEconTemp
  "Cálculo de la temperatura superficial del firme debido al balance energético
  en la superficie."
```

```
FirmesCarreteras.Estructura.Componentes.ElementoTermicoCapacitivo
  elementoTermicoCapacitivo(T(start=8), Datos=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa\(\));
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.EntornoConveccion entornoConveccion;
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.EntornoRadiacion entornoRadiacion(
  alpha=0.19);
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.EntornoRadiacionAtmosfera
  entornoRadiacionAtmosfera(Ea=0.9);
FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable
  temperaturaVariable;
FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\_Senoidal carga_Senoidal(
  Offset=0,
  TiempoIni=0,
  FreqHz=5.78e-6,
  Fase=0,
  Amplitud=600,
  TiempoFin=172800);
FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente\_Senoidal carga_Senoidal1(
```

```

Offset=0,
TiempoIni=0,
FreqHz=5.78e-6,
Fase=0,
TiempoFin=172800,
Amplitud=1);
FirmesCarreteras.Carga.FuerzaAplicada fuerzaAplicada;
FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal carga_Senoidal2(
Offset=0,
Fase=0,
FreqHz=1,
TiempoIni=1,
TiempoFin=1.5,
Amplitud=0);
Estructura.Capas.Capa_Elastica capa_Elastica(Espesor=1,
Inercia=true,
DatosCapa=
FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(
Amort_x=0.001, Amort_z=0.001));
Estructura.Capas.Capa_Elastica capa_Elastical(Espesor=1, pos=1,
Inercia=true,
DatosCapa=
FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(
Amort_x=0.001, Amort_z=0.001));
Estructura.Capas.Capa_Elastica capa_Elastica2(Espesor=1, pos=2,
Inercia=true,
DatosCapa=
FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(
Amort_x=0.001, Amort_z=0.001));
Entorno.EntornoMecanico.Suelo suelo(posicion_z=3, posicion_x=0);
Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija;
inner Utiles.SistemaCoordenadas Sist;
FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal carga_Senoidal3(
Offset=0,
Fase=0,
TiempoIni=1,
TiempoFin=1.5,
FreqHz=2,
Amplitud=0);
equation
connect(capa_Elastica.cTsup, elementoTermicoCapacitivo.cT);
connect(capa_Elastica2.cTsup, capa_Elastical.cTinf);
connect(capa_Elastica.cTinf, capa_Elastical.cTsup);
connect(capa_Elastica.cMinf, capa_Elastical.cMsup);
connect(capa_Elastical.cMinf, capa_Elastica2.cMsup);
connect(carga_Senoidal.y, entornoRadiacion.cSenal);
connect(fuerzaAplicada.cM, capa_Elastica.cMsup);
connect(temperaturaVariable.cT, entornoRadiacionAtmosfera.cTsup);
connect(entornoConveccion.cTinf, temperaturaVariable.cT);
connect(carga_Senoidal1.y, temperaturaVariable.y);
connect(entornoRadiacion.cT, elementoTermicoCapacitivo.cT);
connect(entornoRadiacionAtmosfera.cTinf, elementoTermicoCapacitivo.cT);
connect(entornoConveccion.cTsup, elementoTermicoCapacitivo.cT);
connect(capa_Elastica2.cMinf, suelo.cM);
connect(temperaturaFija.cT, capa_Elastica2.cTinf);
connect(carga_Senoidal3.y, fuerzaAplicada.cSenal2);
connect(carga_Senoidal2.y, fuerzaAplicada.cSenal);
end CapaEconTemp;

```

---

# FirmesCarreteras.Ejemplos.Casos Estudio.CapaEconTemp2

Variación de la temperatura en una estructura formada por capa visco y capa elástica.

## Modelica definition

```
model CapaEconTemp2
  "Variación de la temperatura en una estructura formada por capa visco y capa
  elástica."

  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoTermico.TemperaturaVariable
    temperaturaVariable;
  FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal carga_Senoidal1(
    Offset=0,
    TiempoIni=0,
    FreqHz=5.78e-6,
    Fase=0,
    TiempoFin=500,
    Amplitud=1);
  FirmesCarreteras.Carga.FuerzaAplicada fuerzaAplicada;
  FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal carga_Senoidal2(
    Offset=0,
    Fase=0,
    Amplitud=1,
    TiempoIni=1,
    TiempoFin=500,
    FreqHz=1);
  Estructura.Capas.Capa_Elastica capa_Elastica(Espesor=0.5, pos=0.25);
  Estructura.Capas.Capa_ViscoElastica capa_ViscoElastica(Espesor=0.25);
  Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(posicion_z=0.75,
    posicion_x=0,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
  FirmesCarreteras.Utiles.Fuentes.Fuente_Senoidal carga_Senoidal3(
    Offset=0,
    Fase=0,
    Amplitud=1,
    TiempoIni=1,
    TiempoFin=500,
    FreqHz=2);
equation
  connect(capa_ViscoElastica.cTinf, capa_Elastica.cTsup);
  connect(capa_ViscoElastica.cMinf, capa_Elastica.cMsup);
  connect(carga_Senoidal1.y, temperaturaVariable.y);
  connect(capa_ViscoElastica.cTsup, temperaturaVariable.cT);
  connect(fuerzaAplicada.cM, capa_ViscoElastica.cMsup);
  connect(carga_Senoidal2.y, fuerzaAplicada.cSenal);
  connect(capa_Elastica.cMinf, sueloCoordenadas.mecanico);
  connect(capa_Elastica.cTinf, sueloCoordenadas.termico);
  connect(carga_Senoidal3.y, fuerzaAplicada.cSenal2);
end CapaEconTemp2;
```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Casos Estudio.DosCapasElastica

S

**Modelo formado por dos capas elásticas de distinto material.**

### Modelica definition

```
model DosCapasElasticas
  "Modelo formado por dos capas elásticas de distinto material."

  FirmesCarreteras.Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(
    posicion_z=1.2, DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
  Estructura.Capas.Capa_Elastica capa_Elastica(pos=0.2, Espesor=1,
    Suelo=true,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular());
  Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija;
  Estructura.Capas.Capa_Elastica capa_Elastical(Espesor=0.2,
    Suelo=false,
    DatosCapa=
      FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa());
  Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico;
equation

  connect(capa_Elastica.cMinf, sueloCoordenadas.mecanico);
  connect(capa_Elastical.cMinf, capa_Elastica.cMsup);
  connect(capa_Elastical.cTinf, capa_Elastica.cTsup);
  connect(temperaturaFija.cT, capa_Elastical.cTsup);
  connect(capa_Elastica.cTinf, sueloCoordenadas.termico);
  connect(modelo_Carga_Trafico.mecanico, capa_Elastical.cMsup);
end DosCapasElasticas;
```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Casos Estudio.DosCapasViscoy **Elastica**

**Modelo formado por dos capas de distinto material una de ellas viscoelástica.**

### Modelica definition

```
model DosCapasViscoyElastica
  "Modelo formado por dos capas de distinto material una de ellas
  viscoelástica."

  Estructura.Capas.Capa_Elastica capa_Elastica(pos=0.2,
    Suelo=true,
```

```

Espesor=1,
DatosCapa=
    FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(
        Amort_x=0.035, Amort_z=0.035));
Estructura.Capas.Capa_ViscoElastica capa_ViscoElastica(
    Espesor=0.2,
    Suelo=false,
    DatosCapa=
        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(
            Amort_x=0.035, Amort_z=0.035));
Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija;
Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(posicion_z=
    1.2);
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico(Cr=0.012);
equation

connect(temperaturaFija.cT, capa_ViscoElastica.cTsup);
connect(capa_ViscoElastica.cMinf, capa_Elastica.cMsup);
connect(capa_ViscoElastica.cTinf, capa_Elastica.cTsup);
connect(sueloCoordenadas.mecanico, capa_Elastica.cMinf);
connect(sueloCoordenadas.termico, capa_Elastica.cTinf);
connect(modelo_Carga_Trafico.mecanico, capa_ViscoElastica.cMsup);
end DosCapasViscoyElastica;

```

---

## FirmesCarreteras.Ejemplos.Casos Estudio.CasoPistaEnsayo

**Estructura de uno de los ensayos realizados en la Pista de Ensayo de firmes del CEDEX.**

### Modelica definition

```

model CasoPistaEnsayo
    "Estructura de uno de los ensayos realizados en la Pista de Ensayo de firmes
    del CEDEX."

    Estructura.Capas.Capa_ViscoElastica MB(
        Suelo=false,
        Inercia=true,
        Espesor=0.12,
        DatosCapa=
            FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.MezclaBituminosa(
                E=6000e6,
                Amort_x=0.035,
                Amort_z=0.035)) "Capa de mezcla bituminosa de la estructura";

    Estructura.Capas.Capa_Elastica SG(
        Espesor=0.5,
        Inercia=true,
        capa_en_e=1,
        pos=0.12,
        DatosCapa=
            FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloGranular(
                E=120e6,
                Amort_x=0.035,

```

```

        Amort_z=0.035)) "Suelo granular de la estructura";
Estructura.Capas.Capa_Elastica SC(
    Inercia=true,
    capa_en_e=2,
    pos=0.62,
    Espesor=0.5,
    DatosCapa=
        FirmesCarreteras.Estructura.Capas.DatosMateriales.SueloCohesivo(
            Mc=60e6,
            Amort_x=0.035,
            Amort_z=0.035)) "Suelo cohesivo de la estructura";
Carga.Modelo_Carga_Trafico modelo_Carga_Trafico(DatosHuella=
    FirmesCarreteras.Carga.DatosHuellas.HU1(v=3.5));
Entorno.EntornoTermico.TemperaturaFija temperaturaFija(Tfija=30);
Entorno.EntornoMecanico.SueloCoordenadas sueloCoordenadas(posicion_z=
    1.12, Tfija=18);
equation
connect(MB.cMinf, SG.cMsup);
connect(SG.cMinf, SC.cMsup);
connect(MB.cTinf, SG.cTsup);
connect(SG.cTinf, SC.cTsup);
connect(SC.cMinf, sueloCoordenadas.mecanico);
connect(sueloCoordenadas.termico, SC.cTinf);
connect(temperaturaFija.cT, MB.cTsup);
connect(modelo_Carga_Trafico.mecanico, MB.cMsup);
end CasoPistaEnsayo;

```