

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS

CONTÍNUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS



PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

“SIMULACIÓN DE ENSAYOS TIPO SPALLING EN
PROBETAS DE POLÍMERO CUASIFRÁGIL”

AUTOR: Roberto Álvarez López

TUTOR: José Antonio Loya Lorenzo

Leganés, Junio 2011

Título: Simulación de ensayos tipo Spalling en probetas de polímero cuasifrágil

Autor: Roberto Álvarez López

Director: José Antonio Loya Lorenzo

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ___ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

A la Universidad Carlos III de Madrid y a todo su personal docente por la formación recibida, gracias a la cual me espera un futuro brillante.

A D. José Antonio Loya Lorenzo por su infinita paciencia y buena memoria para aconsejarme durante todo el tiempo que me ha llevado realizar este proyecto.

A mis padres, Manuel y Luisa, por todo el apoyo recibido en todos los aciertos y errores de mi vida.

Y gracias a todos los que habéis creído en mí pero, sobre todo, gracias a los que no lo hicisteis.

RESUMEN

Las propiedades de los materiales varían según las solicitaciones a las que se vean sometidos por lo que, a la hora de ensayarlos, las condiciones del laboratorio deben reproducir lo más fielmente posible las condiciones de servicio a las que estará sometido el material.

Este trabajo aporta un estudio numérico sobre los ensayos “Spalling”, una nueva técnica que permite determinar las propiedades mecánicas de materiales cuasifrágiles en condiciones dinámicas mediante tracción indirecta. Se ha llevado a cabo un estudio de esta técnica mediante el programa de elementos finitos ABAQUS, empleando para ello probetas de PMMA (polimetil metacrilato) de sección rectangular y cilíndrica con el fin de determinar el comportamiento de dichas probetas durante el ensayo.

En este proyecto se presenta un amplio estudio de la utilización de la técnica Spalling utilizada sobre probetas de material cuasifrágil para comprender qué fenómenos ocurren en ensayos de tracción a altas velocidades de deformación y por qué, recogiendo datos muy útiles que ahorrarán tiempo y dinero en ensayos de laboratorio.

ABSTRACT

The material properties changed according to the requirements which they are subjected so that, when tested, the laboratory conditions must reproduce as faithfully as possible the service conditions that the material will be subjected.

This work provides a numerical study of the “Spalling” test, a new technique to determine the mechanical properties of quasi-brittle materials under dynamic conditions by indirect traction. It was carried out a study of this technique by the finite element program ABAQUS, using rectangular and cylindrical specimens of PMMA (polymethyl methacrylate) to determine the behavior of these specimens during the test.

This project presents a wide study of Spalling technique used on quasi-brittle specimens to understand what phenomena occur in tensile tests at high strain rates and why, collecting useful data that will save time and money on laboratory test.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Introducción.....	3
1.2	Objetivos	5
1.3	Contenido del proyecto	5
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1	Ondas elásticas unidimensionales.....	9
2.2	Aspectos microestructurales de la rotura dinámica	14
2.3	Técnicas de caracterización de materiales.....	18
2.3.1	Técnicas de ensayo a velocidades de deformación bajas y medias	20
2.3.2	El proceso de análisis dinámico.....	26
2.3.3	Técnicas de ensayo a velocidades de deformación altas 31	
2.3.4	Técnicas de ensayo a velocidades de deformación muy altas.....	33
2.4	Técnicas de simulación numérica.....	35
2.4.1	El método de las diferencias finitas.....	36
2.4.2	El método de los elementos finitos.....	37
3	METODOLOGÍA DEL ENSAYO SPALLING	41
3.1	Dispositivo experimental	45
3.2	Características del PMMA	55
3.3	Análisis del proceso.....	59
3.4	Modelización numérica del ensayo.....	63
3.4.1	Efecto adicional: La multifisuración.....	66
3.5	Procedimiento de cálculo de la resistencia a tracción.....	69

3.6 Simulación numérica del ensayo	71
4 RESULTADOS FINALES.....	81
4.1 Influencia de la sección de la probeta.....	85
4.1.1 Probetas de sección cuadrada.....	85
4.1.2 Probetas de sección cilíndrica	88
4.1.3 Comparación de la sección.....	90
4.1.4 Conclusión	93
4.2 Influencia del espesor del proyectil.....	96
4.2.1 Flyer 2mm	96
4.2.2 Flyer 5mm	97
4.2.3 Comparación del espesor del proyectil	110
4.2.4 Conclusión	111
4.3 Influencia del material del proyectil.....	113
4.3.1 Flyer de aluminio Ø20x2mm	113
4.3.2 Flyer de acero Ø20x2mm.....	114
4.3.3 Comparación material del proyectil.....	117
4.3.4 Conclusión	118
4.4 Influencia del diámetro del proyectil.....	120
4.4.1 Flyer de Aluminio Ø10x5mm.....	120
4.4.2 Flyer de Aluminio Ø10x2mm.....	132
4.4.3 Flyer de Acero Ø10x5mm	135
4.4.4 Flyer de Acero Ø10x2mm	150
4.4.5 Comparación diámetro del proyectil.....	151
4.4.6 Conclusión	153
4.5 Influencia del ángulo de impacto	156
4.5.1 Desalineamiento probeta-flyer de 1°	158
4.5.2 Desalineamiento probeta-flyer de 2°	173
4.5.3 Desalineamiento probeta-flyer de 5°	188

4.5.4 Comparación ángulo de impacto	200
4.5.5 Conclusión	203
5 CONCLUSIONES.....	207
5.1 Conclusiones.....	209
5.2 Trabajo futuro.....	211
6 BIBLIOGRAFIA	213

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Avance de una onda unidimensional en un medio elástico (F. Gálvez. 1999).....	10
Figura 2.2 Reflexión de una onda en un extremo libre (F. Gálvez. 1999)	12
Figura 2.3 Transmisión y reflexión de ondas en cambio de sección y material (F. Gálvez. 1999)	13
Figura 2.4 Mecanismos de formación de fisuras para cargas de compresión en materiales frágiles. (Meyers 1994).....	18
Figura 2.5 Aspectos dinámicos de los ensayos mecánicos.....	20
Figura 2.6 Tensiones en el plano de aplicación de las cargas en una probeta de un ensayo brasileño.	22
Figura 2.7 Esquema de la distribución de tensiones en el plano de aplicación de la carga	23
Figura 2.8 Máquina de ensayos neumática.....	24
Figura 2.9 Péndulo Charpy.....	25
Figura 2.10 Torre de caída	26
Figura 2.11 Proceso de análisis dinámico.....	28

Figura 2.12 Esquema del ensayo de la barra Hopkinson (F. Gálvez. 1999)	31
Figura 2.13 Proyectil que impacta directamente sobre la probeta (F. Gálvez. 1999).....	32
Figura 2.14 Distintas configuraciones de ensayos a tracción en materiales metálicos (F. Gálvez. 1999)	32
Figura 2.15 Ensayo de compresión diametral o ensayo brasileño (F. Gálvez. 1999)	33
Figura 2.16 Esquema del dispositivo de impacto de placas (F. Gálvez. 1999).....	33
Figura 2.17 Rotura y resultados en el impacto de placas	35
Figura 3.1 Esquema de impacto.....	44
Figura 3.2 Onda de compresión reflejada	44
Figura 3.3 Holder, cilindro hueco donde se aloja la probeta.....	45
Figura 3.4 Sabot y Flyer	46
Figura 3.5 Plataforma de ensayos (J.A. Loya, 2006)	47
Figura 3.6 Esquema probeta	48
Figura 3.7 Detalle colocación de las galgas en el plano de simetría (J.A. Loya, 2006).....	48
Figura 3.8 Detalle colocación de las galgas en la superficie exterior	49
Figura 3.9 Proyectil: Flyer+Sabot	49
Figura 3.10 Puente Wheatstone.....	50
Figura 3.11 La señal recogida por las galgas y llevada a los amplificadores.....	51
Figura 3.12 Osciloscopio NICOLET	51

Figura 3.13 Amplificadores FYLDE	51
Figura 3.14 Alojamiento del láser	52
Figura 3.15 Posicionamiento del láser	52
Figura 3.16 Detalle del láser.....	52
Figura 3.17 Simulación del montaje del laboratorio	54
Figura 3.18 Simplificación del modelo del laboratorio para simularlo numéricamente	54
Figura 3.19 Propagación de la onda en el flyer y probeta.....	59
Figura 3.20 Reflexión de una onda de compresión y su cambio a tracción en el extremo libre de un ensayo de “Spalling”	61
Figura 3.21 Información recogida por la instrumentación de la probeta (F. Gálvez. 1999)	62
Figura 3.22 Fotografía de alta velocidad utilizada para obtener la posición de las roturas producidas durante un ensayo de Spalling (F. Gálvez. 1999)	63
Figura 3.23 Registros obtenidos en un ensayo instrumentado en dos posiciones distintas (F. Gálvez. 1999).....	64
Figura 3.24 Modelización numérica del ensayo. Atenuación del pulso de tracción producido por la rotura de la probeta (F. Gálvez. 1999)	65
Figura 3.25 Fotografía de un ensayo realizado en carburo de boro. Se aprecia la multifisuración	66
Figura 3.26 Reflexión de una onda en un extremo libre. La onda incidente produce una fisura única.....	67
Figura 3.27 Reflexión de una onda en un extremo libre. La onda incidente produce la multifisuración	68

Figura 3.28 Reflexión de una onda en un extremo libre. La onda incidente produce una fisura única.....	68
Figura 3.29 Crecimiento teórico del pulso de tracción sin rotura para determinar la resistencia a tracción de la probeta (F. Gálvez. 1999).....	70
Figura 3.30 Modelo hecho en ABAQUS de la simulación numérica.....	72
Figura 3.31 Condiciones de contorno aplicadas al modelo.....	76
Figura 3.32 Mallado del modelo.....	76
Figura 3.33 Cruce de pulso de compresión con el reflejado de tracción.....	77
Figura 3.34 Proceso de reflexión de una onda en un extremo libre.....	79
Figura 4.1 Elementos analizados de la probeta en las simulaciones para determinar si existe tensión plana.....	84
Figura 4.2 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque.....	86
Figura 4.3 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	88
Figura 4.4 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque.....	89
Figura 4.5 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	90
Figura 4.6 Interpolación valor máximo.....	91
Figura 4.7 Comparación de la tensión σ_{11} en probetas de sección cuadra y cilíndrica. Plano 25%.....	92

Figura 4.8 Comparación de la tensión σ_{11} en probetas de sección cuadra y cilíndrica. Plano medio.	93
Figura 4.9 Deformación del flyer en el impacto	94
Figura 4.10 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	96
Figura 4.11 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	97
Figura 4.12 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	98
Figura 4.13 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	99
Figura 4.14 Tensión-Tiempo.....	100
Figura 4.15 Deformación-Tiempo	101
Figura 4.16 Tensión-Distancia.....	102
Figura 4.17 Diferencia de áreas	103
Figura 4.18 Tensión-Tiempo.....	104
Figura 4.19 Deformación-Tiempo	105
Figura 4.20 Tensión-Distancia.....	106
Figura 4.21 Diferencia de áreas	106
Figura 4.22 Tensión-Tiempo.....	107
Figura 4.23 Deformación-Tiempo	108
Figura 4.24 Tensión-Distancia.....	108
Figura 4.25 Diferencia de áreas	109
Figura 4.26 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de 2 y 5mm. Plano 25%	110
Figura 4.27 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de 2 y 5mm. Plano medio.....	111

Figura 4.28 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	113
Figura 4.29 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	114
Figura 4.30 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	115
Figura 4.31 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	116
Figura 4.32 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de aluminio y acero de 2mm. Plano 25%	117
Figura 4.33 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de aluminio y acero de 2mm. Plano 50%	118
Figura 4.34 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	121
Figura 4.35 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	122
Figura 4.36 Tensión-Tiempo.....	123
Figura 4.37 Deformación-Tiempo	124
Figura 4.38 Tensión-Distancia.....	124
Figura 4.39 Diferencia de áreas	125
Figura 4.40 Tensión-Tiempo.....	126
Figura 4.41 Deformación-Tiempo	127
Figura 4.42 Tensión-Distancia.....	127
Figura 4.43 Diferencia de áreas	128
Figura 4.44 Tensión-Tiempo.....	129

Figura 4.45 Deformación-Tiempo	130
Figura 4.46 Tensión-Distancia.....	130
Figura 4.47 Diferencia de áreas	131
Figura 4.48 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	132
Figura 4.49 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	133
Figura 4.50 Tensión-Tiempo.....	134
Figura 4.51 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	136
Figura 4.52 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	137
Figura 4.53 Tensión-Tiempo.....	138
Figura 4.54 Deformación-Tiempo	139
Figura 4.55 Tensión-Distancia.....	140
Figura 4.56 Diferencia de áreas	140
Figura 4.57 Tensión-Tiempo.....	141
Figura 4.58 Deformación-Tiempo	142
Figura 4.59 Tensión-Distancia.....	142
Figura 4.60 Diferencia de áreas	143
Figura 4.61 Tensión-Tiempo.....	144
Figura 4.62 Deformación-Tiempo	145
Figura 4.63 Tensión-Distancia.....	146
Figura 4.64 Diferencia de áreas	146
Figura 4.65 Tensión-Tiempo.....	147
Figura 4.66 Deformación-Tiempo	148
Figura 4.67 Tensión-Distancia.....	148

Figura 4.68 Diferencia de áreas	149
Figura 4.69 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque	150
Figura 4.70 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque.....	151
Figura 4.71 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de acero de $\varnothing 20 \times 5 \text{mm}$ y $\varnothing 10 \times 5 \text{mm}$. Plano 25%.....	152
Figura 4.72 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de acero de $\varnothing 20 \times 5 \text{mm}$ y $\varnothing 10 \times 5 \text{mm}$. Plano 50%.....	153
Figura 4.73 Deformación flyer-probeta.....	154
Figura 4.74 Ángulo entre caras en el momento del impacto	156
Figura 4.75 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}	158
Figura 4.76 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}	159
Figura 4.77 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}	160
Figura 4.78 Tensiones del elemento central	161
Figura 4.79 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}	162
Figura 4.80 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}	163
Figura 4.81 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}	164
Figura 4.82 Tensiones del elemento central	165

Figura 4.83 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{11}	166
Figura 4.84 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{22}	167
Figura 4.85 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{33}	168
Figura 4.86 Tensiones del elemento central	169
Figura 4.87 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{11}	170
Figura 4.88 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{22}	171
Figura 4.89 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{33}	172
Figura 4.90 Tensiones del elemento central	172
Figura 4.91 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{11}	173
Figura 4.92 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{22}	174
Figura 4.93 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{33}	175
Figura 4.94 Tensiones del elemento central	176
Figura 4.95 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{11}	177
Figura 4.96 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{22}	178
Figura 4.97 Comparación en los elementos de la tensión	
σ_{33}	179
Figura 4.98 Tensiones del elemento central	180

Figura 4.99 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}	181
Figura 4.100 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}	182
Figura 4.101 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}	183
Figura 4.102 Tensiones del elemento central	184
Figura 4.103 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}	184
Figura 4.104 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}	185
Figura 4.105 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}	186
Figura 4.106 Tensiones del elemento central	187
Figura 4.107 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}	188
Figura 4.108 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}	189
Figura 4.109 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}	190
Figura 4.110 Tensiones del elemento central	191
Figura 4.111 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}	192
Figura 4.112 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}	193
Figura 4.113 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}	194
Figura 4.114 Tensiones del elemento central	195

Figura 4.115 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}	196
Figura 4.116 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}	197
Figura 4.117 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}	198
Figura 4.118 Tensiones del elemento central	199
Figura 4.119 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1º y 2º. Plano 25%	200
Figura 4.120 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1º y 5º. Plano 25%	201
Figura 4.121 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1º y 2º. Plano 50%	202
Figura 4.122 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1º y 5º. Plano 50%	203

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características generales del PMMA	58
Tabla 3.2 Propiedades mecánicas del PMMA.....	58
Tabla 4.1 Comparación de la tensión σ_{11} del elemento central de cada caso con su teórica	119

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Los materiales frágiles tales como la cerámica, el vidrio... ofrecen unas propiedades muy interesantes para ciertas aplicaciones que otros materiales convencionales no pueden satisfacer, como:

- Excelente relación rigidez/peso.
- Excelente relación resistencia/peso.
- Buen comportamiento ante la temperatura.
- Alta resistencia a la corrosión.

Pero también ofrecen algunos inconvenientes:

- Gran sensibilidad a la presencia de defectos.
- Elevada fragilidad, limitando así su campo de aplicación.

Por lo tanto, existen cierto tipo de ensayos que, debido a las propiedades del material, no pueden realizarse y se han de buscar formas alternativas de evaluar las propiedades de dichos materiales.

Por otra parte, los ensayos deben emular lo más fielmente posible las solicitaciones reales a las que se enfrentará el material durante su vida útil para obtener resultados válidos. La técnica de ensayos “Spalling” permite ensayar materiales a velocidades de deformación difícilmente alcanzables mediante las técnicas de tracción directa convencionales. Las máquinas de ensayos convencionales, mecánicas o hidráulicas, permiten obtener velocidades en el actuador del orden de cm/s, con lo que pueden obtenerse velocidades de deformación de hasta 10^{-1} s^{-1} aproximadamente y, en este trabajo, se busca alcanzar velocidades de deformación del orden de 10^5 s^{-1} .

Además, en el ensayo convencional de tracción directa es necesario amarrar los extremos de las probetas con mordazas y esto no es posible hacerlo con materiales frágiles ya que la probeta rompería. Se han desarrollado otros métodos alternativos para poder medir esta propiedad, como por ejemplo:

- El ensayo de **flexión en tres puntos**, que nos proporciona el módulo de rotura, una magnitud relacionada en cierta forma con la resistencia a tracción.
- El ensayo de **compresión diametral o ensayo brasileño**, que nos proporciona la resistencia a tracción, pero requiere asumir ciertas hipótesis adicionales sobre el comportamiento del material bajo cargas triaxiales.

Es sabido que las propiedades mecánicas varían con la velocidad de aplicación de las cargas, esto significa que el ensayo no es estático, si no dinámico, lo que lo complica aún más. En el campo de los ensayos a altas velocidades de deformación, existe una gran escasez de datos experimentales, y la información se reduce a unos pocos resultados de algunos materiales. Es más, se carece incluso de una metodología de ensayos, por lo que el desarrollo constituye un objetivo de gran interés.

La utilización de resultados obtenidos en condiciones estáticas ignorando la influencia de la velocidad de deformación no es un procedimiento adecuado. Y, el empleo de modelos que, incluso incluyendo el efecto de la velocidad de deformación, requieren el uso de parámetros de escasa base física o de difícil medida pueden llevar a resultados erróneos, con lo que tampoco es un procedimiento científico correcto. La metodología a seguir en los ensayos dinámicos es simular mediante la técnica de elementos finitos el modelo a ensayar. Posteriormente, se comprobarán dichos resultados empíricamente en un laboratorio. Probablemente se obtendrán datos y conclusiones distintas a los del modelo simulado, con estos datos se mejorará la simulación y se volverá a ensayar. Este proceso se repetirá hasta encontrar unos datos válidos.

El objetivo de este trabajo es diseñar y optimizar, mediante ensayos de simulación numérica, un modelo (probeta y proyectil) que ofrezca las mejores características para la correcta realización del ensayo Spalling en el laboratorio. La simulación servirá también para estudiar y comprender qué factores entran en juego en este tipo de ensayos y poder entender los resultados que se obtendrán en el laboratorio.

1.2 Objetivos

El desarrollo de este trabajo persigue los siguientes objetivos:

- Realizar un estudio analítico y numérico del ensayo Spalling, es decir, un ensayo de tracción indirecta a altas velocidades de deformación.
- Diseñar, analizar y optimizar un modelo (probeta y proyectil) mediante la técnica de elementos finitos que pueda ser reproducido en un ensayo de laboratorio. Con este modelo se pretende obtener datos útiles para, a la hora de realizar los ensayos de laboratorio, tener unas directrices que seguir ahorrando así tiempo y dinero.
- Estudiar qué factores del ensayo influyen en los resultados obtenidos y por qué, para poder actuar sobre el modelo con el fin de realizar el ensayo de forma correcta.
- Estudiar, profundizar y aumentar el campo de datos de los resultados obtenidos mediante los ensayos Spalling.

1.3 Contenido del proyecto

Este trabajo se estructura en seis capítulos. En éste primero, se hace una pequeña introducción al tema que se va a tratar, presentando las complicaciones que existen y los objetivos que se quieren conseguir con este proyecto.

El segundo capítulo recopila la información necesaria para poder entender los fenómenos que se producen en la rotura de materiales a altas velocidades de deformación, que es el tema de este trabajo. Se presenta la teoría de propagación de ondas elásticas unidimensionales así como de los aspectos más importantes, a nivel microestructural, de la rotura dinámica de materiales. Además se describe el proceso de análisis que se debe seguir a la hora de realizar ensayos como el que se estudia en este trabajo. Se describen las diferentes técnicas empíricas de caracterización de materiales más utilizadas, profundizando en los métodos empleados en técnicas de altas velocidades de deformación.

En el tercer capítulo se describe con total precisión el ensayo Spalling, que es el ensayo que aquí se estudia. Se describe la metodología del ensayo, el dispositivo que se utiliza en el laboratorio para realizarlo, la información numérica que se recoge del ensayo... También se exponen las propiedades del material objeto del estudio, el PMMA. Por último, se muestra la forma en que se ha realizado la simulación numérica del ensayo Spalling, incluyendo datos como: dimensiones de la probeta ensayada, velocidad de impacto, forma y tipo de mayado, tiempo de simulación...

En el capítulo cuarto se han realizado grupos de simulaciones alterando un parámetro en cada uno de ellos para ver cómo afecta dicho parámetro a los resultados obtenidos. Los parámetros que se han ido modificando son:

- Sección de la probeta.
- Espesor del proyectil.
- Material del proyectil.
- Diámetro del proyectil.
- Ángulo de impacto del proyectil con la probeta.

Se han presentado las gráficas de los resultados obtenidos y, para cada grupo, se ha extraído una conclusión de cómo afecta el parámetro analizado en el ensayo y qué debe modificarse para mejorar el modelo con el fin de llegar a un modelo óptimo que reproducir en el laboratorio.

Las conclusiones obtenidas así como unas directrices del trabajo futuro que debe realizarse para seguir profundizando en este campo se exponen en el capítulo quinto. El sexto, y último capítulo, recoge la bibliografía utilizada para la realización de este proyecto.

Por último, se incluyen anexos de todas las simulaciones realizadas con sus correspondientes gráficas, con el fin de que el lector pueda comprobar que la simulación numérica de los ensayos dinámicos es una parte muy importante que reduce en gran cantidad de tiempo y dinero en ensayos de laboratorio.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Ondas elásticas unidimensionales

La teoría de la propagación de ondas elásticas unidimensionales en sólidos está ampliamente desarrollada en estudios de Kolsky y Rinehart, y su aplicación a fenómenos de impacto puede consultarse en Zukas (1982 y 1991). Las aplicaciones de la propagación de ondas elásticas más comunes se describen en los estudios de Johnson (1972).

Una onda es una perturbación de tensión que se propaga en el seno de un material. Si los valores de tensión no superan el límite elástico del material, es una onda elástica. En este caso, las ondas de tensión y las de deformación son proporcionales, además, las deformaciones son recuperables, haciendo que una vez la onda haya pasado por un punto del material, éste recupera las mismas condiciones que tenía antes del paso de la onda. La teoría de ondas elásticas enuncia que la propagación se realiza en dos tipos de ondas, longitudinales y transversales. Las ondas longitudinales son aquellas en las que la dirección de propagación es paralela al movimiento de las partículas, mientras que en las ondas transversales la dirección de propagación es perpendicular a la dirección del movimiento de las partículas. La velocidad de propagación de las ondas elásticas longitudinales (C_L) es diferente a la de las ondas transversales (C_T):

$$(2.1) \quad C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$(2.2) \quad C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

siendo E el módulo elástico del material, G el módulo de rigidez transversal y ρ la densidad del material.

A partir de ahora, debemos tener en cuenta unas hipótesis para que la teoría de propagación de ondas sea válida:

- Las barras por las que se propagan las ondas tienen una longitud mucho mayor que su diámetro ($L \gg D$).

- Las barras siguen un comportamiento elástico, es decir, las ondas de tensión no superan el límite elástico del material.

Las ondas se propagarán en la dirección longitudinal de las barras y el movimiento de las partículas tendrá lugar en la misma dirección. Por tanto, el movimiento de las partículas se determina aplicando la ley de Newton, que dará lugar a la siguiente ecuación de ondas unidimensionales:

$$(2.3) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

donde u es el desplazamiento de las partículas de la barra, t es el tiempo, x es la longitud en el sentido de la propagación y c es la velocidad de propagación de las ondas elásticas o velocidad del sonido en las barras, y es una constante.

Esta ecuación puede integrarse proporcionando el siguiente resultado:

$$(2.4) \quad u(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct)$$

donde $f(x-ct)$ representa una onda que viaja en el sentido positivo del eje x a velocidad c , mientras que $g(x+ct)$ representa otra onda que viaja en el sentido negativo del eje x a la misma velocidad. Las condiciones de contorno son las que determinan estas dos funciones.

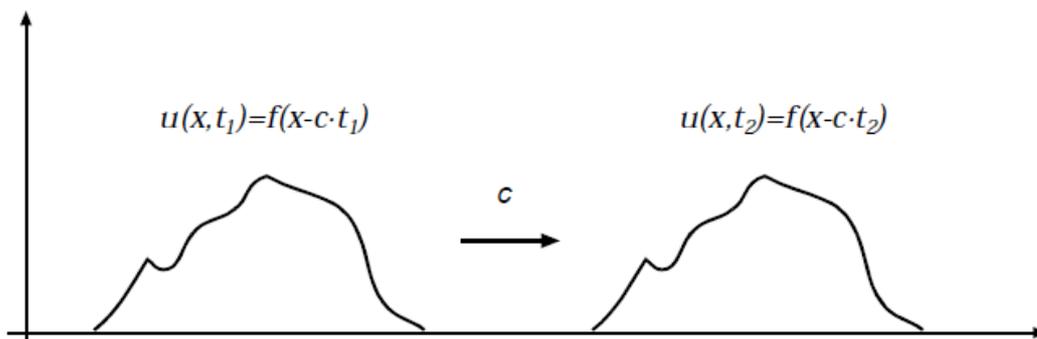


Figura 2.1 Avance de una onda unidimensional en un medio elástico (F. Gálvez. 1999)

La hipótesis de que las barras tienen un comportamiento elástico, permite medir las deformaciones que sufre la probeta mediante la instrumentación de ésta con puentes de bandas extensométricas, pudiendo así determinar las funciones enunciadas anteriormente. La deformación, ε , se puede calcular como la derivada del desplazamiento, u , respecto al espacio, x . Además, como asumimos comportamiento elástico, la tensión, σ , es proporcional a la deformación:

$$(2.5) \quad \varepsilon(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = f'(x-ct) + g'(x+ct)$$

$$(2.6) \quad \sigma(x,t) = E\varepsilon(x,t) = E[f'(x-ct) + g'(x+ct)]$$

donde el apóstrofe representa la derivada primera respecto a la variable entre paréntesis. Además se puede determinar la velocidad de cada una de las partículas de la barra mediante la siguiente expresión:

$$(2.7) \quad v(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -cf'(x-ct) + cg'(x+ct)$$

Teniendo en cuenta las expresiones de tensión y velocidad, se cumple que:

$$(2.8) \quad \sigma = \pm \rho cv$$

Esta expresión utilizará en signo negativo en el caso que la onda se desplace en el sentido positivo del eje x (onda de compresión), y el signo positivo en caso contrario (onda de tracción).

Un caso particular e importante para los ensayos se produce cuando una barra de longitud determinada impacta sobre otra considerada seminfinita. En este caso, se crea un pulso de compresión cuya longitud es proporcional a la longitud de la barra que impacta. El tiempo de contacto coincide con el tiempo que tardan las ondas en recorrer el doble de la longitud de la barra.

$$(2.9) \quad t_p = 2 \frac{L}{c}$$

Otro caso que se debe considerar es el que corresponde a una onda que llega a un extremo libre de una barra. La condición de contorno que se impone es la de tensión nula en el extremo. Esto implica que una onda de compresión viajando por una barra, al llegar al extremo, se reflejará viajando en sentido contrario y se transformará en una onda igual, pero de signo contrario (onda de tracción). La ecuación que describe la tensión en este caso es:

$$(2.10) \quad \sigma(x_{ex}, t) = E[f'(x_{ex} - ct) + g'(x_{ex} + ct)] = 0$$

Entonces se ha de cumplir que $f'(x - ct) = -g'(x + ct)$, tal y como se aprecia en la Figura 2.2.

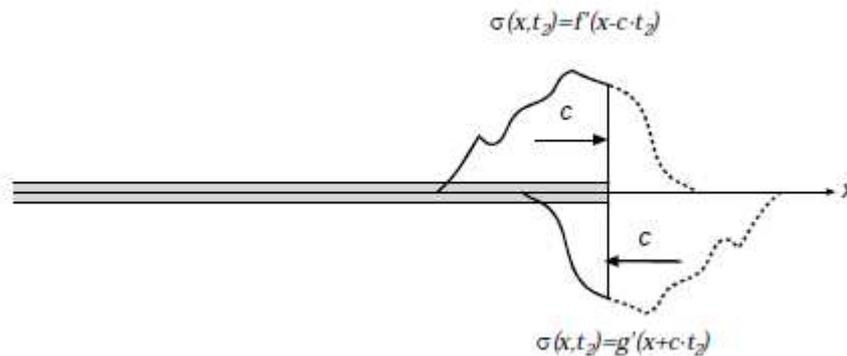


Figura 2.2 Reflexión de una onda en un extremo libre (F. Gálvez. 1999)

El estado tensional total es la suma de las ondas presentes en la probeta, como se expresa en la ecuación (2.6). La reflexión de las ondas es la base de los ensayos Spalling, donde una onda de compresión de valor inferior a la resistencia a compresión del material se reflejará en el extremo final de la probeta convirtiéndose en una onda de tracción de mayor valor que la resistencia a tracción del material, con lo que producirá la rotura de la probeta.

Cualquier cambio en las características del medio en el que se propagan las ondas, ya sea por variación del área, de la densidad o de otras características, modificará las condiciones de propagación. Por ejemplo, cuando una onda, que llamaremos incidente, con un valor de tensión σ_I alcanza la superficie de separación entre dos barras en contacto con diferente sección transversal y de

diferente material, parte de ella se transmitirá a la segunda barra dando lugar a una onda transmitida de valor σ_T y parte se reflejará sobre la primera barra dando lugar a una onda reflejada de valor σ_R , como se muestra en la Figura 2.3. Esto ocurre siempre, excepto cuando la onda incidente es de tracción y las barras están simplemente en contacto, sin tener ninguna fijación entre ellas, pues en este caso las barras se separarían siendo la onda transmitida nula y, por tanto, la onda reflejada es igual a la incidente.

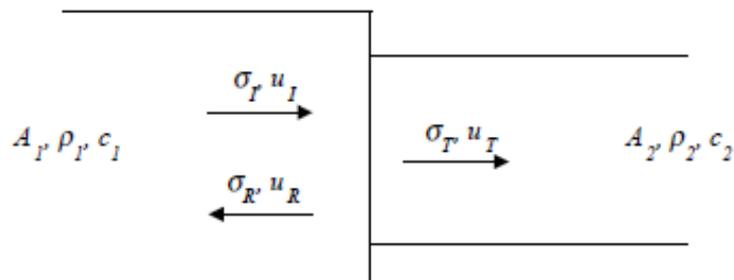


Figura 2.3 Transmisión y reflexión de ondas en cambio de sección y material (F. Gálvez. 1999)

Cuando la onda incidente es de compresión, existe onda transmitida y las condiciones de contorno que se deben aplicar en el contacto son:

- Igualdad de fuerzas

$$(2.11) \quad A_1(\sigma_I + \sigma_R) = A_2\sigma_T$$

- Continuidad de velocidades

$$(2.12) \quad v_I - v_R = v_T$$

Esta última expresión puede escribirse en función de las tensiones utilizando la ecuación (2.8), obteniendo:

$$(2.13) \quad \frac{\sigma_I}{\rho_1 c_1} - \frac{\sigma_R}{\rho_1 c_1} = \frac{\sigma_T}{\rho_2 c_2}$$

y resolviendo σ_R y σ_T en función de σ_I , se obtiene que las ondas transmitida y reflejada son:

$$(2.14) \quad \sigma_T = C_T \sigma_I, \text{ siendo } C_T = \frac{2A_1 \rho_2 c_2}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2}$$

$$(2.15) \quad \sigma_R = C_R \sigma_I, \text{ siendo } C_R = \frac{A_2 \rho_2 c_2 - A_1 \rho_1 c_1}{A_1 \rho_1 c_1 + A_2 \rho_2 c_2}$$

siendo C_T y C_R los coeficientes de transmisión y reflexión respectivamente.

Si las dos barras tienen la misma sección, e introducimos el concepto de impedancia, definida como $z = \rho \cdot c$, estas expresiones se simplifican:

$$(2.16) \quad \sigma_T = C_T \sigma_I, \quad C_T = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

$$(2.17) \quad \sigma_R = C_R \sigma_I, \quad C_R = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}$$

El coeficiente de transmisión es siempre positivo, por lo que la onda transmitida tiene siempre el mismo signo que la onda incidente, es decir, si la onda incidente es de compresión la transmitida también lo será. El signo de onda reflejada depende del signo de la diferencia de impedancias de ambos materiales, como puede deducirse de las expresiones.

Cuando ambos materiales tienen la misma impedancia, el cociente de reflexión es nulo y el de transmisión es de valor unidad. Esto significa que no habrá onda reflejada y, por tanto, la onda transmitida será igual que la incidente.

2.2 Aspectos microestructurales de la rotura dinámica

La mayoría de las roturas dinámicas pueden dividirse en tres clases:

- Rotura por tracción
- Rotura por compresión

- Rotura por cortante

Las roturas se producen por defectos del material y el proceso que siguen es nucleación, crecimiento y coalescencia de grietas. La microestructura afecta tanto a la iniciación como al crecimiento de bandas de cortante que son las precursoras del fallo en cortante y en tracción.

La rotura dinámica por tracción está determinada por el estado de cargas y la dinámica de la generación, propagación e interconexión de fisuras. Este tipo de rotura se caracteriza por una velocidad de propagación de fisuras muy elevada. Dicha velocidad, V_c , ha sido estimada por varios autores (Louro 1989) y se supone que está limitada por la velocidad de las ondas de Rayleigh, C_R , a través de la siguiente expresión:

$$(2.18) \quad V_C = C_R \left(1 - e^{\alpha(K_I^2 - K_{IC}^2)} \right)$$

donde K_{IC} y K_I son, respectivamente, el valor crítico y el valor actual del factor de intensidad de tensiones. Otro aspecto importante es la dependencia del tamaño de los fragmentos que se producen en la rotura con la velocidad de deformación. Según ha demostrado que:

- El número de fragmentos producidos en la rotura aumenta con la velocidad de impacto [Field (1985)]
- En condiciones de carga idénticas, mayor tamaño de grano produce menor número de fragmentos que tamaños de grano menores. Esto se debe a que, cuando el tamaño de grano es mayor, existen menos fronteras de grano que pueden ser origen de la figuración [Louro (1989)]

La rotura por cortante puede tener origen microestructural o térmico. Hay que mencionar que las bandas de cortante adiabáticas son precursoras del fallo y proporcionan un camino para la propagación de grietas. A nivel de microestructura, el material no es un sólido continuo y homogéneo. La iniciación de la localización del cortante puede ser activada por:

- **Factores geométricos**: son factores externos que pueden ser lugares de concentración de tensiones.
- **Factores microestructurales**: son regiones en las que se localiza un aumento de la debilidad de la microestructura por algún motivo, como partículas fracturadas, acumulación de dislocaciones, planos de deslizamiento...Las bandas de cortante adiabáticas son los lugares más propicios para que se inicie el fallo, en los que las tensiones de tracción abrirán las grietas con facilidad.

La rotura dinámica por compresión se produce porque, a nivel microestructural, se localizan regiones en las que aparecen importantes tensiones de tracción. Mientras que los materiales dúctiles pueden soportar grandes deformaciones por compresión sin que se produzca el fallo, en materiales más frágiles se producen pequeñas fisuras. Esto se debe a que al aplicar tensiones de compresión, por efecto Poisson, se producen tensiones de tracción en otras regiones debido a la falta de homogeneidad microestructural, con lo que se puede iniciar el proceso de figuración. Estos defectos microestructurales son los responsables de que pueda producirse la rotura por compresión, entre ellos podemos mencionar los siguientes:

- Huecos microscópicos entre granos alrededor de los cuales pueden generarse tensiones de tracción.
- Bordos de granos entre granos de diferentes materiales o con anisotropía elástica, en los que se producen incompatibilidades en tensiones elásticas.
- Fronteras de grano frágiles que se pueden fracturar debido a la aparición de tensiones cortantes producto de la compresión aplicada.

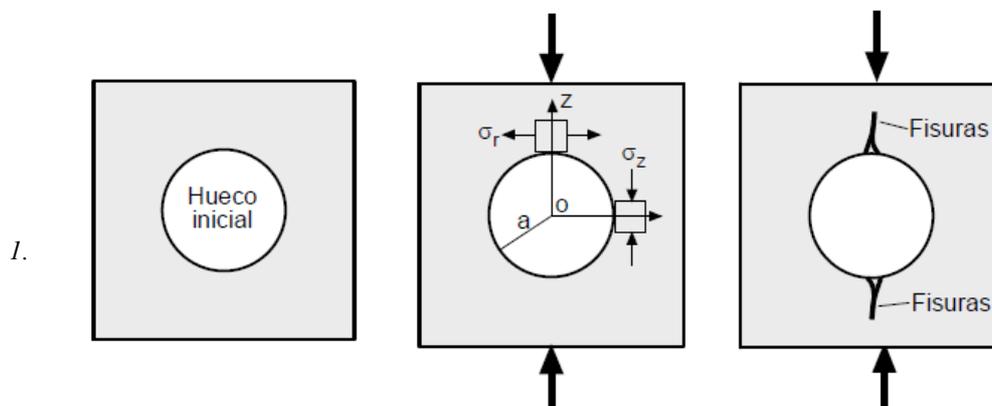
En la figura adaptada de Meyers (1994), pueden apreciarse estos tres mecanismos de fallo.

El primer tipo corresponde a la configuración de huecos de tipo esférico en el interior del sólido, que bajo cargas de compresión se producen tensiones de

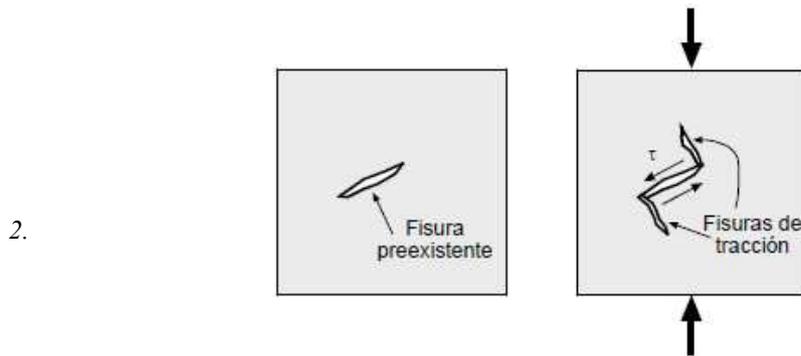
tracción que dan lugar a fisuras en los bordes de los huecos en la dirección de aplicación de las cargas.

En el segundo, la compresión provoca, en una fisura orientada de forma aleatoria, una concentración de tensiones en sus extremos desembocando en la aparición de más fisuras que se abren por tracción. En este tipo de roturas puede comprenderse que el confinamiento de las fisuras limita este tipo de rotura, haciendo que, al aumentar la presión de confinamiento, aumente la resistencia a compresión.

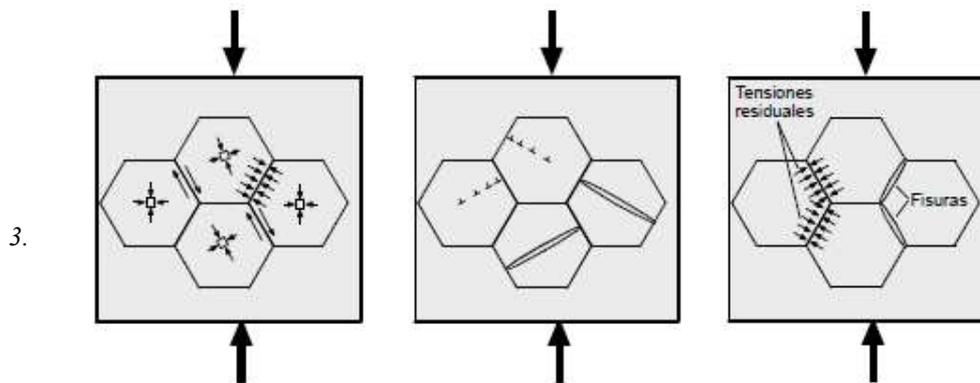
El tercer tipo de rotura por compresión se debe a la anisotropía elástica de los granos y a la generación de dislocaciones y maclas, que pueden dar lugar a la formación de fisuras tanto al cargar como al descargar el material. Se produce cuando la concentración de tensiones se localiza en los bordes de grano. Lankford (1977) describió este tipo de situaciones que aparecen incluso cuando se somete al sólido a una pequeña fracción de su tensión de rotura.



Iniciación de fisuras por huecos esféricos



Iniciación de fisuras en bordes de fisuras existentes



Iniciación de fisuras por concentración de tensiones en los bordes de grano

*Figura 2.4 Mecanismos de formación de fisuras para cargas de compresión en materiales frágiles.
(Meyers 1994)*

2.3 Técnicas de caracterización de materiales

Existen multitud de técnicas de ensayo normalizadas para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales a bajas velocidades de deformación. Sin embargo, el comportamiento de muchos materiales varía en función de la velocidad con la que se aplican las cargas, es decir, con la velocidad de deformación. Esta influencia puede ser comprobada incluso en las máquinas de ensayo convencionales con solo variar la velocidad del actuador de dichas máquinas.

En muchas aplicaciones prácticas los materiales se someten a procesos de deformación a alta velocidad, por lo que es necesario tener información acerca de las propiedades mecánicas en condiciones lo más cercanas posible a las de servicio. Estas condiciones pueden ser muy distintas de las que proporcionan las máquinas de ensayos convencionales. En esta sección se van a comentar las técnicas de ensayo más empleadas para la determinación de las propiedades mecánicas a altas velocidades de deformación, describiendo con el máximo detalle la técnica que se estudia en este trabajo, el ensayo Spalling.

Al aumentar la velocidad de deformación se deben tener en cuenta algunos aspectos característicos de los ensayos dinámicos. En la Figura 2.5 (Lindholm, 1971) se muestran los distintos tipos de ensayos característicos, incluyendo el método de aplicación de la carga, la velocidad de deformación media y el tiempo característico del ensayo. En ella, las divisiones que separan cada velocidad de deformación sirven para identificar los diferentes métodos de ensayo y no suponen una variación del comportamiento del material.

Las técnicas de ensayos dinámicos cubren aquellos procedimientos en los que las fuerzas de inercia son apreciables. Los mayores problemas que aparecen en estos ensayos están íntimamente asociados con la aparición de este tipo de fuerzas. En los ensayos considerados como intermedios, la resonancia mecánica entre el dispositivo de ensayo y la probeta puede ser importante y debe tenerse en cuenta. Cuando los ensayos se realizan por impacto de barras, la escala de tiempos se corresponde con el que tardan las ondas elásticas en recorrer una longitud característica en el dispositivo del ensayo a su velocidad de propagación. Cuando se trabaja a muy altas velocidad de deformación, la escala de tiempos y las dimensiones de la probeta deben ser adecuadas para que se den las condiciones de deformación uniaxial, generando un estado de tensiones tal que dé lugar al paso y reflexión de ondas de choque en probetas de tipo plano.

Otro de los efectos producidos por la velocidad del ensayo está relacionado con la temperatura. Mientras que a bajas velocidades de deformación los ensayos son normalmente isotermos, cuando la velocidad de deformación es elevada, el ensayo puede considerarse adiabático ya que el calor generado durante el

proceso de deformación no elástico no tiene tiempo de disiparse y la temperatura media de la probeta aumenta.

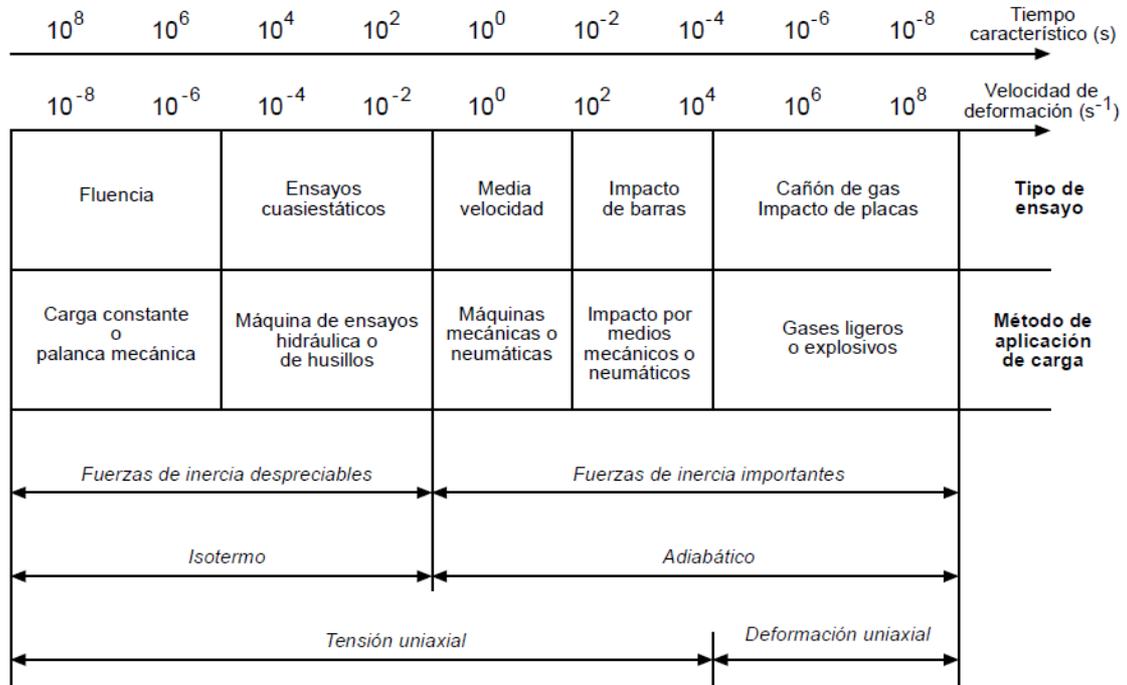


Figura 2.5 Aspectos dinámicos de los ensayos mecánicos

En resumen, definir las propiedades mecánicas de los materiales a altas velocidades de deformación requiere solventar todos los problemas comentados anteriormente desarrollando técnicas de ensayo experimentales que proporcionen medidas fiables de las propiedades del material.

2.3.1 Técnicas de ensayo a velocidades de deformación bajas y medias

Las máquinas de ensayos convencionales, ya sean hidráulicas o mecánicas, permiten obtener velocidades en el actuador del orden de centímetros por segundo (cm/s), con lo que pueden obtenerse velocidades de deformación de hasta aproximadamente $10^{-1}s^{-1}$. Este tipo de ensayos se consideran cuasiestáticos y no entran en la categoría de dinámicos.

Para determinar la resistencia a tracción estática de materiales de alto módulo elástico y elevada dureza, no se puede realizar el ensayo convencional de tracción uniaxial, ya que al ser materiales muy duros se necesita ejercer una elevada fuerza en los amarres de la probeta, pero al ser materiales frágiles ésta rompería. Se utilizan sofisticados métodos de amarre que introducen el problema del desalineamiento. Estas modificaciones convierten al sencillo ensayo convencional de tracción uniaxial en un método caro y complicado de realizar.

Para evitar estas dificultades, se ha utilizado los ensayos de tracción en tres o cuatro puntos (Lankford 1978, Quinn 1990), consisten en flexionar una probeta generando una banda de compresión por un lado, y una de tracción por el lado opuesto. Es una buena aproximación para estimar la resistencia a tracción de los materiales, pero no proporcionan el valor real al no estar el material sometido a un estado de cargas uniaxial.

Los ensayos de compresión diametral de discos, o ensayo brasileño, constituyen otra alternativa para determinar la resistencia a tracción de materiales cuya resistencia a tracción es mucho menor que su resistencia a compresión. Consiste en aplicar una carga de compresión a una probeta de geometría cilíndrica según uno de sus diámetros provocando, por efecto Poisson, la tracción en los puntos ortogonales a los de la aplicación de la carga. Su empleo está muy extendido en hormigón y materiales pétreos (Neville 1973, Rocco 1996). No obstante, estos ensayos tienen el mismo problema que los de flexión, la probeta está sometida a un estado de tensiones biaxial, conviviendo tensiones de tracción con tensiones de compresión de, al menos, tres veces superiores.

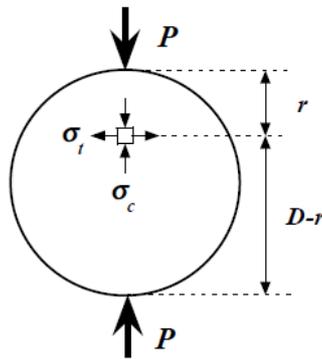


Figura 2.6 Tensiones en el plano de aplicación de las cargas en una probeta de un ensayo brasileño.

Según la teoría de la elasticidad, que puede consultarse en Timoshenko (1972), las tensiones que aparecen en el plano de tracción son:

$$(2.19) \quad \sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

$$(2.20) \quad \sigma_c = \frac{2P}{\pi LD} \left(\frac{D^2}{r(D-r)} - 1 \right)$$

donde P es la carga aplicada, r la distancia al punto de aplicación de una de las cargas, L la longitud de la probeta y D su diámetro.

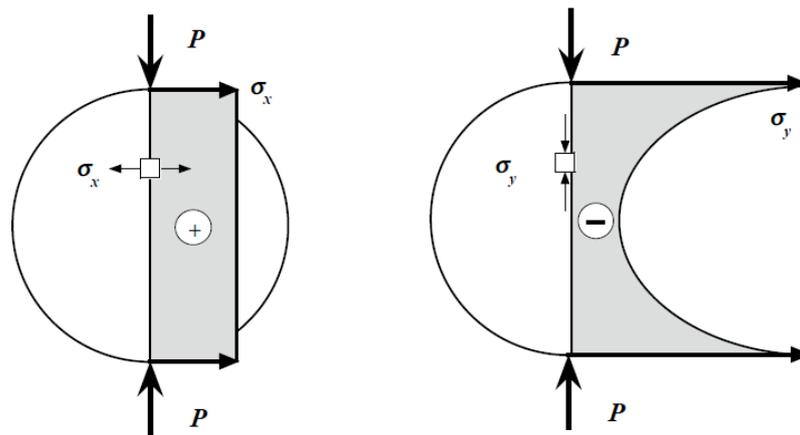


Figura 2.7 Esquema de la distribución de tensiones en el plano de aplicación de la carga

Como vemos en la Figura 2.7, las tensiones de tracción que aparecen, son máximas y constantes en el plano de aplicación de las cargas, mientras que las de compresión son variables a lo largo de él con un mínimo en el centro geométrico que es tres veces superior a las de tracción.

Para recurrir a velocidades de deformación más elevadas se puede recurrir a métodos neumáticos o mecánicos. En las máquinas neumáticas, las más comunes son las de actuador de tipo pistón (Maiden, 1966) como la representada en la Figura 2.8. En ellas, se aplica un desplazamiento en uno de los extremos de la probeta mediante un pistón, mientras, el otro extremo de la probeta se sujeta a una barra que se encuentra instrumentada mediante galgas extensométricas con el objeto de medir la carga aplicada. En estos ensayos se obtienen registros de carga y desplazamiento en función del tiempo que permiten obtener la curva de comportamiento del material.

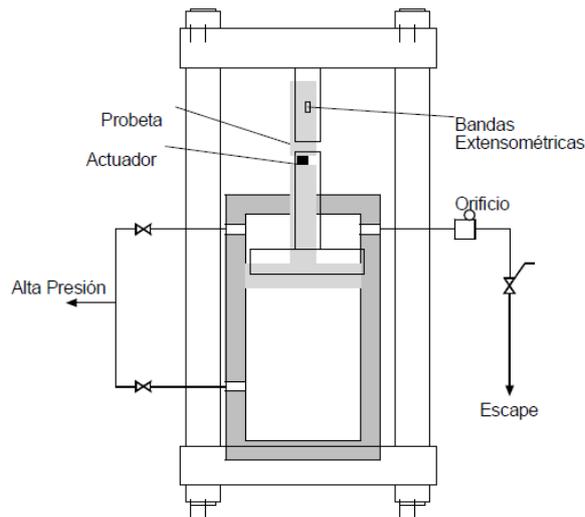


Figura 2.8 Máquina de ensayos neumática

Los sistemas de tipo pendular, como el péndulo Charpy, utilizan la fuerza de la gravedad para acelerar una masa que impactará con la probeta. Esta técnica se encuadra en las velocidades medias de deformación. La disposición de la probeta es la de un ensayo de flexión en tres puntos. Desde un ángulo inicial se deja caer el péndulo hasta golpear la probeta, situada en la vertical. Cuando el péndulo rompe la probeta, este asciende hasta otro ángulo diferente, mediante un cálculo geométrico simple puede determinarse la diferencia de alturas y, a partir de ella, obtener la energía absorbida en el impacto. Mediante esta técnica se puede obtener una medida cualitativa de la energía de fractura, aunque mediante péndulos instrumentados puede registrarse también la historia de fuerzas aplicadas y el desplazamientos del punto de aplicación de la carga. Con estos datos podemos determinar la tenacidad de fractura del material.

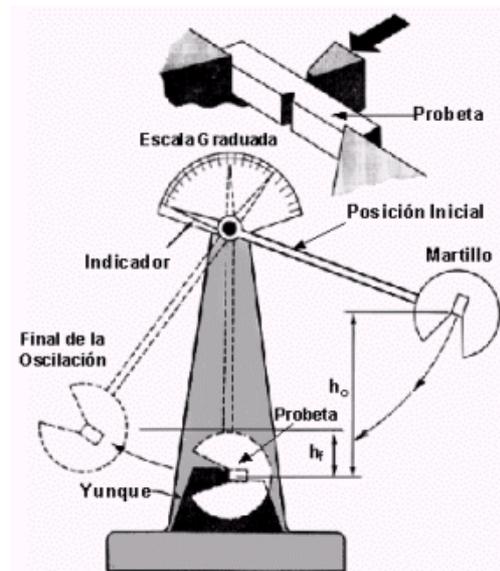


Figura 2.9 Péndulo Charpy

La torre de caída, al igual que el péndulo Charpy, utiliza la fuerza gravitatoria para acelerar una masa, aunque algunos equipos disponen de un sistema de aire comprimido que permite obtener mayores velocidades. Esta técnica se encuadra dentro de las velocidades de deformación medias. En la Figura 2.10 se representa un esquema de este tipo de equipos. El tipo de ensayo más común con estos equipos es el ensayo de flexión en tres puntos. El funcionamiento es tan simple como dejar caer desde una altura determinada una masa guiada por unos carriles con un percutor acoplado que impactará sobre la probeta. El sistema se completa con una célula de carga que puede estar en el percutor o en la base, en este último caso, la influencia de las fuerzas de inercia en los componentes del sistema de carga es menor. La velocidad de impacto se mide a través de un sistema de células fotoeléctricas. Se obtiene un registro de cargas en función del tiempo, las velocidades de deformación oscilan aproximadamente entre 1 y 10^2 s⁻¹.

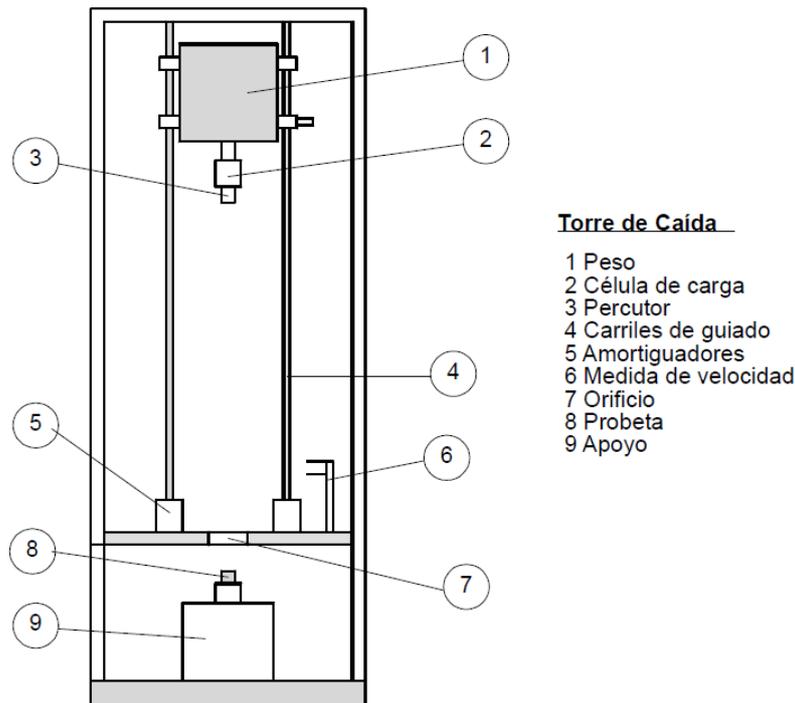


Figura 2.10 Torre de caída

2.3.2 El proceso de análisis dinámico

La precisión que se puede alcanzar en muchos casos de diseño con solicitaciones estáticas es muy alta, sobre todo si se trata de un análisis de un sistema construido con materiales isótropos, lineales y sin tensiones residuales (por ejemplo, tensiones acumuladas debido al proceso de fabricación). Este tipo de problemas aparecen muy frecuentemente en la práctica y puede ser eficazmente resuelto mediante el análisis por elementos finitos, obteniéndose diseños que pueden ser considerados como definitivos, es decir, sin necesidad de recurrir a la construcción y ensayos de prototipos. En estos casos, la construcción de prototipos sería para comprobar los aspectos funcionales del diseño, pero no para comprobar los aspectos de resistencia del sistema.

Por el contrario, en los casos de análisis dinámico, la precisión que se puede esperar es mucho menor. El efecto de fuerzas disipativas, la dificultad de una estimación precisa de las solicitaciones y la complejidad del proceso de análisis, que obliga a utilizar modelos con menos grados de libertad en general, junto con

el hecho de que el comportamiento resistente del material está ahora gobernado por las Teorías de la Fatiga, hacen que la fiabilidad de los resultados del análisis dinámico de un modelo de elementos finitos sea más baja que en los casos de análisis estático.

Por ello, es muy frecuente en estos casos tener que construir prototipos que son ensayados dinámicamente para comprobar la corrección del diseño, tanto desde el punto de vista del comportamiento estructural vibratorio como de la resistencia a fatiga. No obstante, es de esperar que el trabajo teórico realizado sobre el modelo de elementos finitos sirva para desarrollar un diseño de calidad, y así ahorrar tiempo y dinero en la modificación de prototipos.

Por otro lado, los resultados obtenidos en los ensayos pueden ser utilizados para realimentar el modelo teórico con datos más precisos (por ejemplo, los amortiguamientos modales). Las modificaciones que se van a realizar sobre los prototipos para mejorar su comportamiento pueden ser previamente simuladas en el modelo teórico mejorado por los datos experimentales.

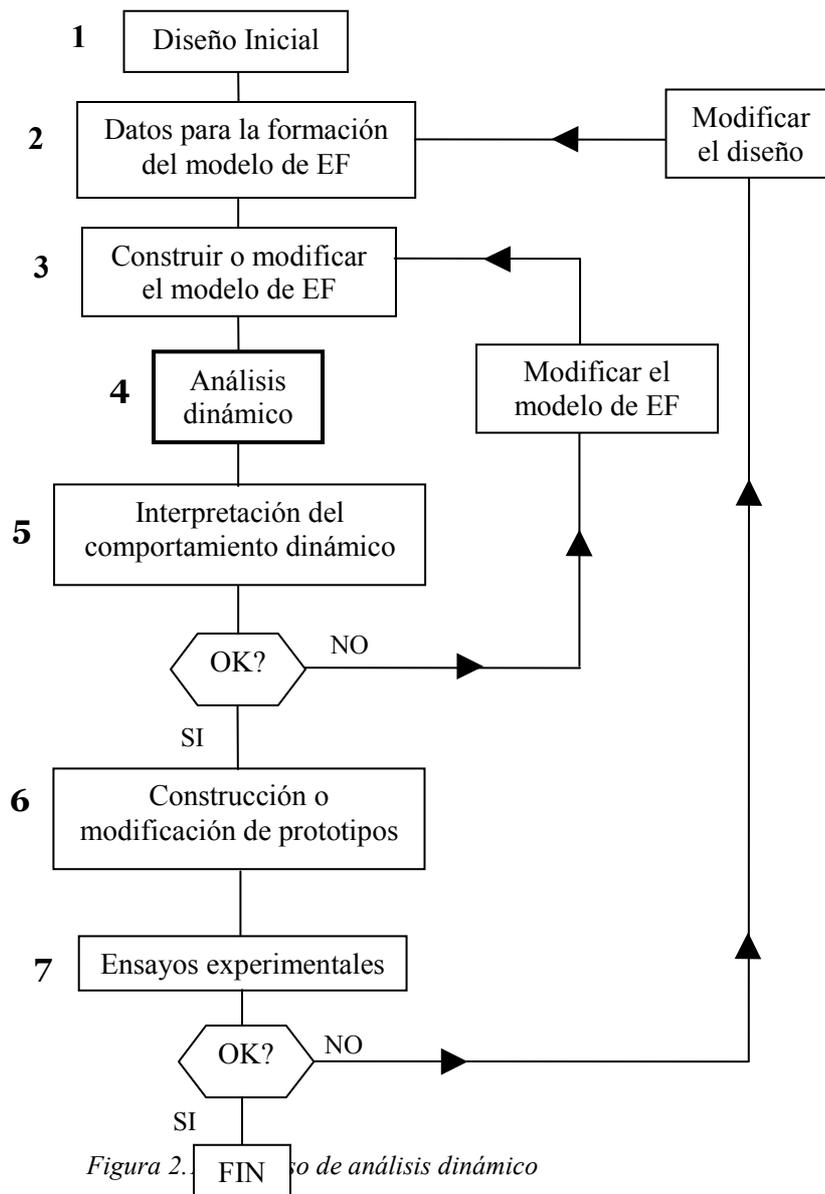


Figura 2. Esquema de análisis dinámico

Este esquema muestra la secuencia de operaciones básicas en el diseño de un sistema mecánico. El paso 4, puede ser considerado como el “procesador dinámico”, que plantea y resuelve las ecuaciones del modelo de elementos finitos. Sin embargo, no siempre se trata directamente de resolver las ecuaciones de equilibrio dinámico sino que a veces interesa únicamente conocer algunos datos del modelo, como por ejemplo los modos y frecuencias de vibración. Por otra parte, existen varias formas de resolver las ecuaciones de la dinámica, y es el analista o diseñador quien debe decidir sobre la más conveniente en cada caso, lo cual no sucede en el análisis estático. Además, la

interpretación de los resultados es ahora más compleja, ya que estos deben ser analizados en el dominio del tiempo y, a veces, en el de la frecuencia. Así pues, podemos afirmar que en caso del análisis dinámico, el grado de participación del diseñador es mucho más elevado y crítico que en el caso estático.

CONCLUSIONES

- a)** Se debe recurrir al análisis dinámico en aquellos casos en los que las solicitaciones que actúan sobre el modelo de elementos finitos sean variables con el tiempo, y su contenido en frecuencia aumente en el rango de frecuencias naturales del modelo. En otros casos, se puede realizar un análisis cuasiestático, despreciando las fuerzas de inercia y las disipativas, si la variación de las solicitaciones es importante. Si esta variación no es importante, puede realizarse un análisis estático.
- b)** Debe recordarse que las tensiones que se producen tanto en el comportamiento cuasiestático como en el dinámico, dependen del tiempo y por ello el comportamiento del material deberá ser comprobado con los procedimientos de la Fatiga de Materiales.
- c)** Si el modelo representa un sistema con movimiento debe considerarse un sistema de referencia inercial y uno local. Como consecuencia, en el planteamiento del equilibrio dinámico aparece una matriz de masa, una de rigidez (la misma que en análisis estático) y una de amortiguamiento, pero además aparecen otras matrices complementarias que dependen de las propiedades cinemáticas del movimiento del sistema. Dichas matrices son: la de Coriolis, la de rigidez centrífuga y la de rigidez giratoria.
- d)** Las matrices de masas son relativamente sencillas de calcular a partir de las funciones de interpolación y densidad del elemento. En este caso, se obtiene una matriz denominada consistente o de masa distribuida y, en general, es una matriz completa. Existe otro planteamiento que supone que la masa está concentrada en los nudos

del elemento, en este caso se obtiene una matriz diagonal que se denomina de masa concentrada.

- e)** Cada uno de los enfoques tiene sus ventajas e inconvenientes, concretamente si la matriz de masa de un modelo es concentrada, y por tanto diagonal, es muy sencillo de obtener su inversa, mientras que si la matriz es consistente es muy costosa de invertir. Por el contrario, en los casos en los que la flexión sea un factor importante en el comportamiento del sistema, es recomendable utilizar matrices consistentes ya que proporcionan mejores resultados. A veces se utilizan aproximaciones de concentración que dan lugar a matrices singulares.
- f)** Las condiciones de ligadura se introducen en la ecuación de equilibrio dinámico eliminando las filas y columnas, correspondientes a los grados de libertad ligados, en las matrices del sistema. En el caso de que el soporte tenga unos desplazamientos dependientes del tiempo, y por supuesto conocidos, se obtiene un término complementario para el vector de fuerzas correspondiente a las acciones de inercia, disipativas y elásticas del sistema.
- g)** El análisis dinámico es más costoso que el elástico, y el grado de precisión que es posible obtener es menor. Efectos como el amortiguamiento o la dificultad de estimación fiable de las fuerzas variables, junto con otros problemas de índole numérica y computacional son los responsables de esta menor precisión.
- h)** Por ello, los ensayos de prototipos son fundamentales para poder conocer en más profundidad el comportamiento dinámico de los sistemas mecánicos. A su vez, los resultados de los ensayos pueden servir para realimentar con datos más precisos el modelo de elementos finitos, y obtener así soluciones de mayor calidad.

2.3.3 Técnicas de ensayo a velocidades de deformación altas

Para realizar ensayos a velocidades de deformación consideradas altas, la técnica más utilizada es la barra Hopkinson, descrita inicialmente por Kolsky (1949) y basada en las observaciones de Hopkinson (1913). Mediante esta técnica pueden alcanzarse velocidades de deformación del orden de 10^3 s^{-1} .

El ensayo consiste en colocar una probeta entre dos barras de longitud mucho mayor que su diámetro y aplicar una carga repentina en uno de los extremos de las barras. De este modo, con distintas variantes de este método descritas en Johnson (1972) y Zukas (1982 y 1990), es posible realizar ensayos a compresión, tracción, torsión o flexión. La aplicación de la carga suele hacerse mediante el impacto de un proyectil. Al ensayar de esta forma, se pueden producir deformaciones plásticas en los extremos de las barras que están en contacto con la probeta si el material a ensayar es mucho más resistente que éstas (como por ejemplo, en materiales cerámicos). El ensayo de la barra Hopkinson requiere que las barras permanezcan en régimen elástico durante el ensayo. Midiendo las deformaciones que sufren las barras es posible determinar la curva tensión-deformación de la probeta bajo ciertas hipótesis. La medida de estas deformaciones se hace mediante bandas extensométricas adheridas a las barras.



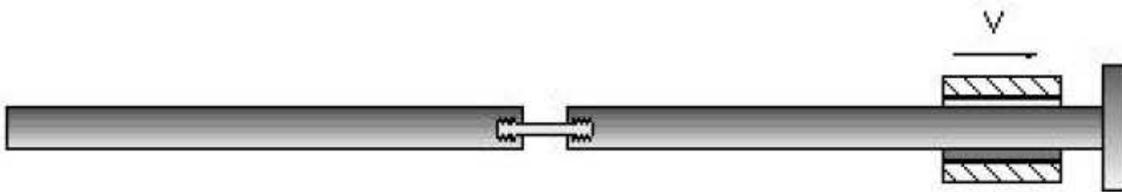
Figura 2.12 Esquema del ensayo de la barra Hopkinson (F. Gálvez. 1999)

Para alcanzar velocidades de deformación aún mayores, autores como Wulf (1974) o Gorham (1979) han suprimido la barra incidente, haciendo que el proyectil impacte directamente con la probeta.



Figura 2.13 Proyectil que impacta directamente sobre la probeta (F. Gálvez. 1999)

Para la realización de ensayos de tracción en materiales metálicos, las probetas tipo hueso son las más utilizadas. Harding (1960) y Albertini (1974), con el uso de explosivos, emplearon el esquema de la Figura 2.14.a). Lindholm (1968) utilizó la configuración de la Figura 2.14.b). Nicholas (1980) introdujo la utilización del collar representado en la Figura 2.14.c).



a) Configuración empleada por Harding y Albertini.



b) Configuración empleada por Lindholm.



c) Configuración empleada por Nicholas

Figura 2.14 Distintas configuraciones de ensayos a tracción en materiales metálicos (F. Gálvez. 1999)

Los ensayos de tracción tienen el inconveniente de que, aún con los sistemas más sofisticados, es muy difícil conseguir una buena alineación, por ello son pocos los estudios que se realizan de este tipo (Lataillade, 1986). Como método

alternativo se utiliza el ensayo de compresión diametral o ensayo brasileño (Rodríguez 1994) representado en la Figura 2.15.



Figura 2.15 Ensayo de compresión diametral o ensayo brasileño (F. Gálvez. 1999)

Este método proporciona un valor de la resistencia a tracción del material, aunque como se ha comentado anteriormente, el estado de cargas en la probeta no es uniaxial.

2.3.4 Técnicas de ensayo a velocidades de deformación muy altas

Cuando la velocidad de deformación que se quiere conseguir es mucho más elevada, hay que pasar de condiciones de tensión uniaxial a deformación uniaxial. La técnica que se utiliza normalmente es la del impacto de placas. Esta técnica permite obtener el límite elástico del material en condiciones de deformación uniaxial. El dispositivo de impacto de placas, que puede consultarse en Zukas (1982) y más detalladamente en Yaziv (1985), se ha representado en la Figura 2.16. Es un dispositivo que permite caracterizar materiales a muy altas velocidades de deformación, superiores a 10^5 s^{-1} .

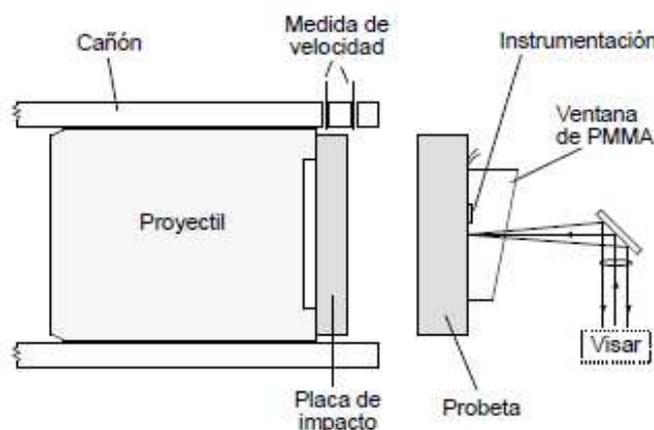


Figura 2.16 Esquema del dispositivo de impacto de placas (F. Gálvez. 1999)

Este dispositivo consiste básicamente en lanzar una placa plana a una velocidad del orden de 10^2m/s contra otra placa fija, que es la probeta. El empleo de geometrías planas asegura que, durante unos pocos microsegundos, el estado tensional de la probeta sea de deformación uniaxial, existiendo únicamente deformaciones en la dirección del impacto. Esta situación continúa hasta que las ondas de tensión generadas por el impacto se reflejan en el extremo opuesto de la probeta.

Como consecuencia del fuerte impacto, se forman ondas de choque que se propagan a través del material con un frente muy abrupto de discontinuidades en la tensión, la deformación y en la velocidad de las partículas (Rosenberg, 1994).

Este tipo de ensayos se utilizan para determinar la ecuación de estado además del límite elástico en deformación uniaxial o Hugoniot, σ_{HEL} . Durante el ensayo se produce un pulso de tensión que presenta una primera parte elástica seguida de otra parte plástica, como podemos ver en la Figura 2.17. La parte plástica está retrasada con respecto a la plástica debido a que la velocidad de propagación de las ondas plásticas es menor que la de las elásticas. La amplitud de la zona elástica del registro obtenido proporciona el Hugoniot (límite elástico en deformación uniaxial). Autores como Rosenberg (1991 y 1994), Kipp (1992) o Rajendran (1994 y 1996) han presentado ensayos en diferentes materiales cerámicos como Al_2O_3 , NaI , B_4C , SiC o TiB_2 .

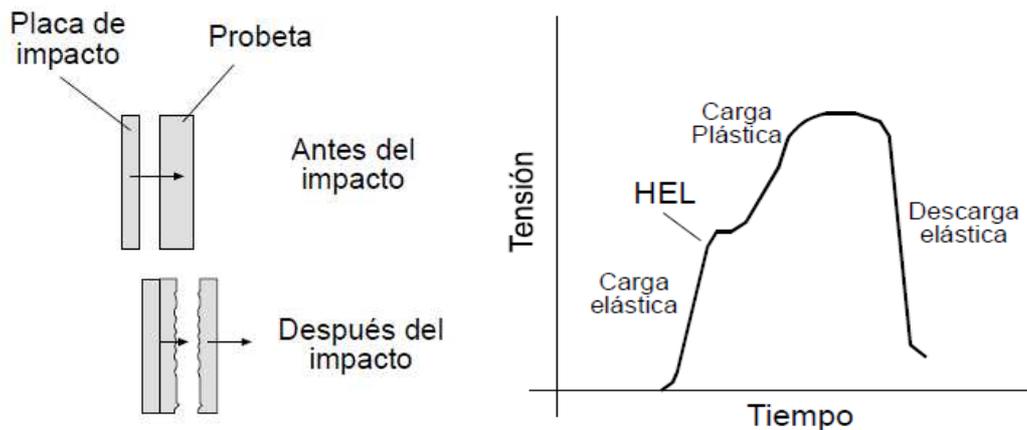


Figura 2.17 Rotura y resultados en el impacto de placas

Para determinar las propiedades del material dañado por las tensiones que aparecen debido a la reflexión de la onda de choque, Yaziv (1985), ha sofisticado el ensayo mediante la técnica de doble impacto. La probeta es impactada por dos placas separadas por una pequeña holgura. La primera placa produce la apertura de fisuras en el material por reflexión de ondas de tracción, mientras que la segunda placa cierra estas fisuras recompackando el material. En estos estudios se concluye que el fallo en los materiales ocurre debido a cargas de tracción. No obstante, por encima del Hugoniot, el material puede dañarse por compresión.

2.4 Técnicas de simulación numérica

Las técnicas de simulación numérica que resuelven problemas dinámicos tienen ciertas peculiaridades que las hacen distintas de otros códigos numéricos. Los problemas dinámicos se caracterizan por:

- La presencia de ondas de choque, produciendo discontinuidades en las velocidades y/o en las tensiones.
- Existe una respuesta localizada del material, donde la configuración de la estructura tiene una importancia secundaria frente a las características y el comportamiento del material en las proximidades de la zona de aplicación de las cargas.

- Los tiempos de aplicación de cargas y de respuesta son muy cortos, del orden de milisegundos o inferiores.

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los sólidos bajo cargas dinámicas o situaciones de impacto se encuadran en cuatro categorías:

- Ecuaciones de conservación: masa, momento lineal, momento angular y energía.
- Ecuaciones constitutivas.
- Criterios de fallo.
- Comportamiento posterior al fallo.

Estas ecuaciones son fáciles de formular pero difíciles de resolver, por lo que se recurre a la discretización espacial. Por lo tanto, es necesario formular una serie de ecuaciones discretas que en el límite presentan el mismo comportamiento que las ecuaciones en derivadas parciales originales. Los dos métodos que se emplean en los códigos que resuelven problemas de impacto y propagación de ondas son el método de las diferencias finitas y el método de los elementos finitos.

2.4.1 El método de las diferencias finitas

Método descrito por Richtmeyer (1967) o Fried (1967), se puede considerar una solución aproximada a un problema exacto. Esto se debe a que se tratan las ecuaciones que gobiernan el proceso físico en forma diferencial, de forma que las derivadas se reemplazan por operadores en diferencias análogas.

Con este procedimiento se obtienen una serie de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas por técnicas estándar. En este método, las ecuaciones del movimiento de cada elemento se plantean como gradientes de presión de las celdas que lo rodean.

2.4.2 El método de los elementos finitos

Este método puede consultarse en Bathe (1982) o Grandin (1986). Es el método que se utiliza en este trabajo y es un método alternativo para discretizar las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en el dominio espacial.

Aquí la discretización se introduce desde el principio y no se modifican las ecuaciones diferenciales ni se cambian las derivadas. Se reemplazan los infinitos grados de libertad por un sistema de grados de libertad finito de características aproximadas al modelo inicial. Por esta razón, el modelo de elementos finitos se considera una solución exacta a un problema aproximado.

Los códigos de elementos finitos tienen ciertas ventajas al tratar con diferentes geometrías y variaciones en el tamaño y tipo de malla. Esto se debe a que, en el método de elementos finitos, las ecuaciones del movimiento se plantean como ecuaciones nodales de fuerzas para cada elemento sin que dependan de la forma de la malla que lo rodea.

De cualquier modo, en la mayoría de los casos, la forma discreta de las ecuaciones del movimiento de los códigos de elementos finitos son equivalentes a aquellas del método de diferencias finitas y no existe base matemática distinta entre los dos métodos, por ello el grado de precisión de los dos métodos es similar.

La discretización espacial puede realizarse de dos formas:

- Lagrangiana: la discretización se realiza en el material, y por tanto se deforma con el material
- Euleriana: la discretización es espacial, por lo que la masa fluye a través de las celdas.

Cada uno presenta sus ventajas e inconvenientes para cada tipo de problema, por lo que dependiendo del caso uno será más apropiado que el otro y viceversa. Por ello los códigos suelen incluir ambas posibilidades.

Debido a que en los códigos lagrangianos no hay flujo de material entre las celdas de discretización, se requieren menos cálculos por cada ciclo. Sin embargo, debido a que la malla se distorsiona al deformarse, pueden producirse deformaciones elevadas, lo que incrementará el tiempo de cálculo. Esto se debe a que en fenómenos de propagación de ondas, el paso de integración está basado en la dimensión del elemento más pequeño y, cuando esta dimensión tiende a disminuir, el tiempo de paso suele crecer al ser inversamente proporcional. La solución general para grandes distorsiones es el remallado. Esta solución puede llegar a crear una malla semi-euleriana, ya que si se remalla en cada ciclo el método se convertiría en un cálculo euleriano.

Para corregir el problema de las grandes deformaciones de los elementos de algunos códigos introduce lo que se denomina como “erosión”. Este fenómeno se refiere a que, bajo ciertas circunstancias, cuando se llega a una elevada deformación de la celda, ésta se elimina. Los cálculos hechos con algoritmos de erosión suelen mostrar una buena concordancia con los problemas para los que se ha diseñado, pero no son aplicables a otros tipos de situaciones. En problemas que presentan grandes deformaciones o cuando los materiales pueden mezclarse, es necesario recurrir al cálculo euleriano.

El proceso de cálculo suele recurrir a una integración explícita que se implementa fácilmente en los códigos. El tiempo de integración condiciona a estabilidad del cálculo, ya que si es demasiado elevado puede no converger, y si es demasiado pequeño se eleva de manera exponencial los cálculos a realizar y, por tanto, el tiempo de la simulación. El tiempo máximo del paso de integración se determina con el cociente entre la mínima distorsión de celda y el máximo entre las velocidades de las partículas, o la velocidad de propagación de las ondas, a través de la siguiente expresión:

$$(2.21) \quad \Delta t = \frac{\min(\Delta x)}{\max(c, u)}$$

siendo c la velocidad de propagación de las ondas en el material, u la velocidad de las partículas y la minimización se hace en toda la malla.

Un aspecto importante es el tratamiento de los contactos en el choque. En problemas de impactos, las diferentes mallas que componen tanto el proyectil como la probeta, están obligadas a interactuar entre sí. Para la localización de esta situación existen los algoritmos llamados de búsqueda de contactos y se encargan de determinar si un nodo atraviesa alguna superficie. Para establecer las condiciones de contacto, los algoritmos de contacto entre caras se encargan de imponer condiciones a los nodos que entran en contacto. Estos pueden estar basado en métodos de penalización con nodo maestro y nodo esclavo, o basados en los multiplicadores de Lagrange.

Otra cuestión particular de este tipo de cálculos numéricos se conoce como viscosidad artificial. Las ondas de choque son discontinuidades matemáticas que no se pueden acomodar directamente en la formulación continua, que es la base de los códigos numéricos. Para solucionar este problema se introduce una viscosidad artificial que suaviza los frentes de ondas de choque sobre unos pocos anchos de celda. Se utilizan términos lineales y cuadráticos que suavizan y amplían el frente de onda en la dirección de propagación y disminuyen su amplitud.

Las simulaciones que se han realizado en este trabajo tienen las siguientes características:

- Utilización del método de los elementos finitos.
- Discretización Lagrangiana.
- Integración implícita de paso de integración fijo (10^{-6} s). La integración implícita realiza más cálculos que la explícita por lo que la precisión aumenta, aunque el tiempo de cálculo aumenta considerablemente.
- No existen grandes deformaciones, con lo que no es necesario recurrir ni al remallado ni a la “erosión”.

- Las mallas de proyectil y probeta interactúan entre sí.
- Se utiliza el método de penalización con superficie maestra (*Master Surface*) y superficie esclava (*Slave Surface*).

3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO SPALLING

Ésta es una nueva técnica de ensayo que permite determinar la resistencia a tracción, a altas velocidades de deformación en condiciones reales de carga uniaxial. Hasta ahora, su principal aplicación era para ensayar materiales frágiles. Se definen materiales frágiles aquellos que no pueden ser ensayados mediante otros métodos de tracción directa debido a sus condiciones de fragilidad, como por ejemplo el vidrio, no puede realizarse un ensayo de tracción directa ya que sería necesario sujetar los extremos de la probeta con mordazas aplicando una gran fuerza, el material no soportaría dicha carga y rompería. Normalmente la resistencia a tracción de estos materiales se determinaba mediante ensayos indirectos, por lo que esta nueva técnica puede aportar una interesante y valiosa información sobre el comportamiento dinámico de los materiales denominados como frágiles.

El ensayo Spalling se basa en la propagación y reflexión controlada de ondas elásticas en el interior del material objeto de estudio. Este método está inspirado en los ensayos de la barra Hopkinson y consiste en:

Un proyectil, que definiremos como “flyer”, alojado inicialmente en un objeto llamado “sabot”, es disparado a gran velocidad mediante una pistola de gas contra una probeta de sección rectangular y longitud L , impactando sobre ésta en la dirección de su eje longitudinal.

Como consecuencia del impacto, el flyer transmite los esfuerzos a la probeta generando una onda de compresión que viaja a lo largo de la probeta hasta llegar al extremo libre. Al llegar al extremo, la onda se refleja convirtiéndose así en una onda de la misma magnitud y longitud que la onda incidente, pero de tracción. La aparición de tensiones de tracción en la probeta produce la rotura del material.

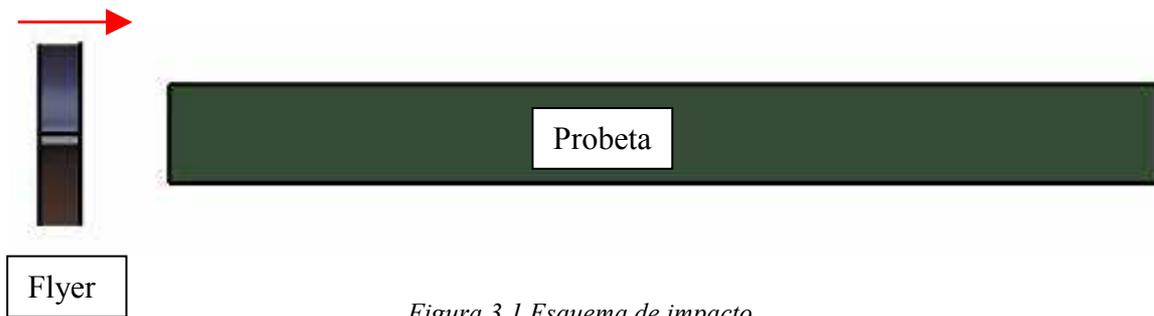


Figura 3.1 Esquema de impacto

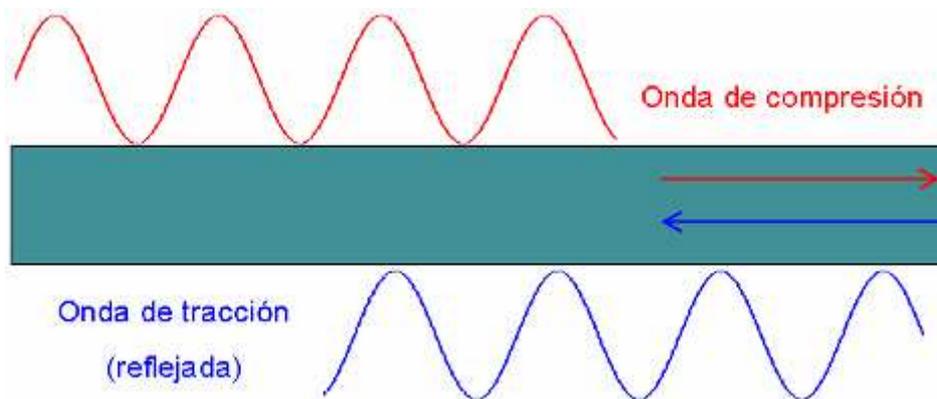


Figura 3.2 Onda de compresión reflejada

La probeta se encuentra instrumentada mediante galgas extensométricas que recogen las señales producidas por la deformación del material y, por tanto, poder así determinar el pulso de compresión generado por el impacto. A través de estos registros y de la posición de la primera fisura que aparece en la probeta se determina la resistencia a tracción del material

Este método que se ha descrito exige que se asuman ciertas hipótesis para poder aplicarse. Las hipótesis hacen referencia al material y a las condiciones del ensayo, y son las siguientes:

- Referentes al material:
 - El método es sólo aplicable cuando la resistencia a compresión de material es mucho más elevada que la resistencia a tracción.
 - El comportamiento del material bajo las cargas aplicadas durante el ensayo es elástico y lineal.

- Las compresiones previas que sufre la probeta antes de la aparición de tensiones de tracción no deben introducir ningún daño al material.
- Referentes al ensayo:
 - La configuración del ensayo debe garantizar que la propagación de ondas pueda ser considerada unidimensional ($L \gg D$).
 - Durante el ensayo se debe poder localizar con precisión una única fisura inicial, aunque puedan aparecer fisuras posteriores.

3.1 Dispositivo experimental

Plataforma del ensayo

El banco de ensayos con el que se realiza el experimento cuenta una cámara de vacío donde se aloja la probeta. La probeta está alojada en el holder, un cilindro hueco de poco espesor y lapeado (rectificado la superficie interior) con el fin de que ofrezca la mínima fricción posible cuando se produzca el impacto. Asumiremos la hipótesis de que la probeta está suspendida en el aire y alineada con el flyer que impactará sobre ella.

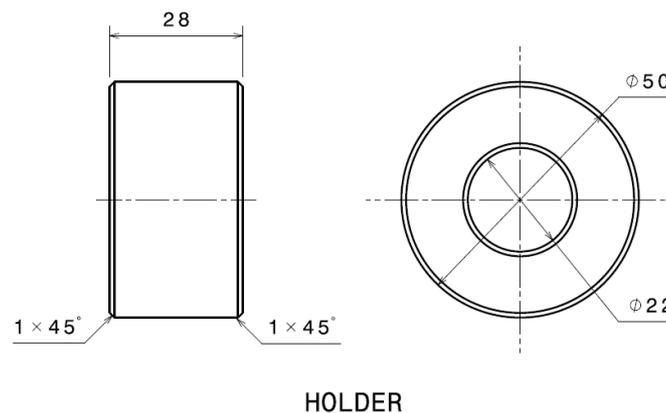


Figura 3.3 Holder, cilindro hueco donde se aloja la probeta

El flyer está hecho de Aluminio y se encuentra alojado en un polímero de 20-22mm de diámetro llamado sabot.

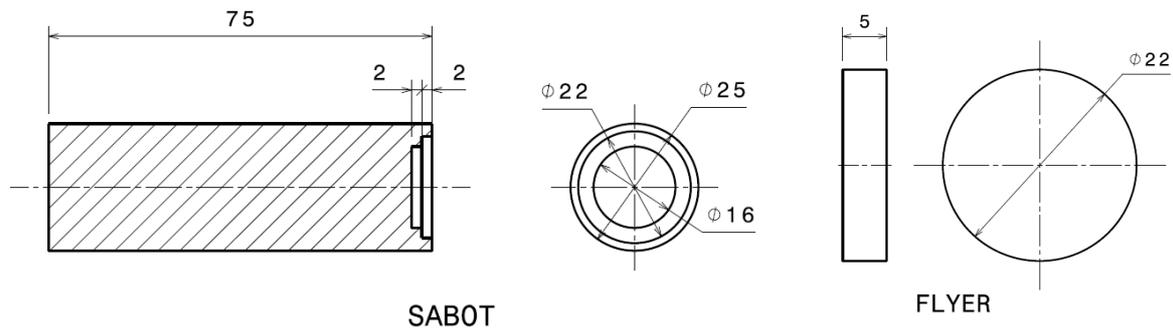


Figura 3.4 Sabot y Flyer

Ambos son disparados por una pequeña pistola de aire comprimido contra la probeta. Asumimos que el proyectil, que está perfectamente alineado con el eje de la probeta, impacta de manera perpendicular a la cara de ésta.

El aire comprimido procede de un compresor, de forma que modificando la presión de alimentación se puede variar la velocidad del proyectil.

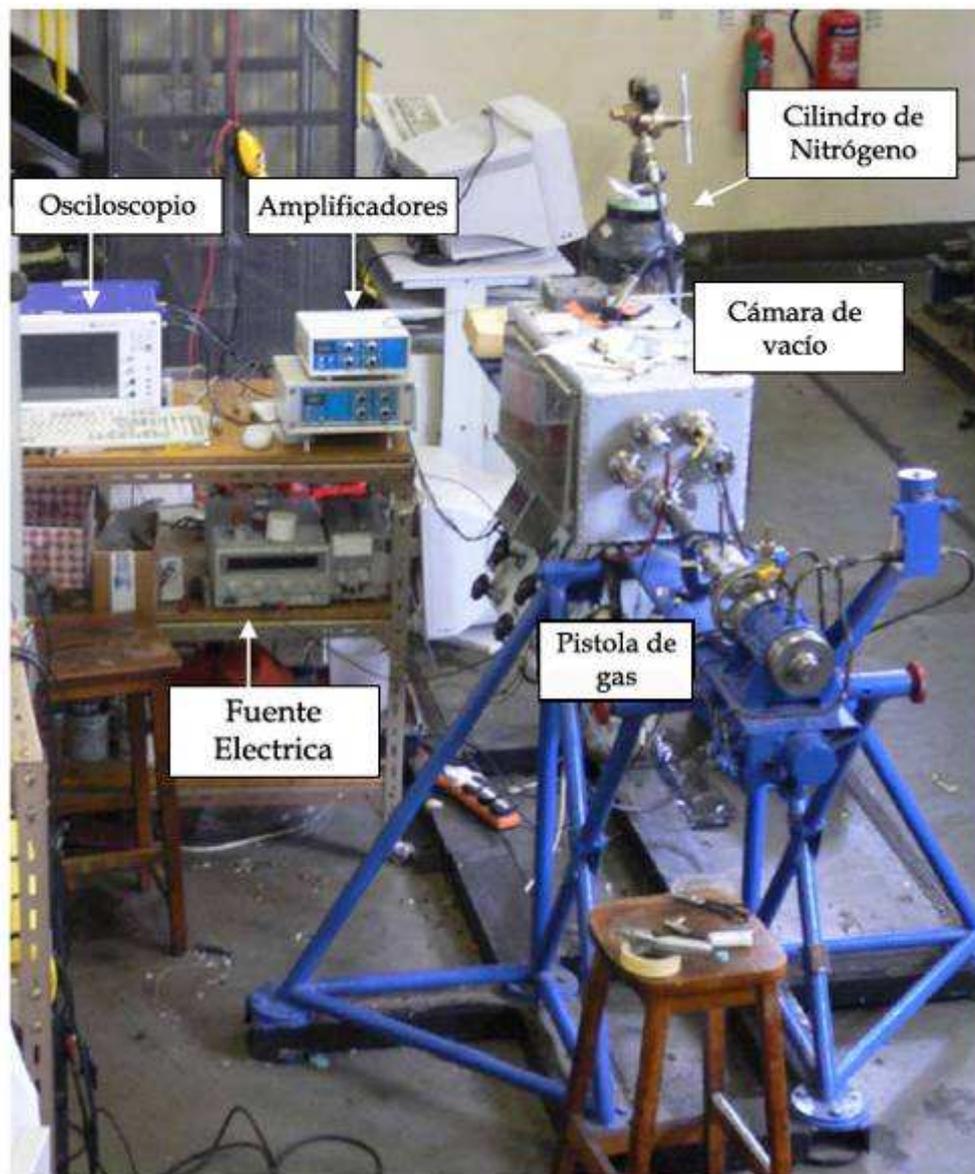


Figura 3.5 Plataforma de ensayos (J.A. Loya, 2006)

Probeta

La probeta está hecha de PMMA y está dividida en dos mitades de 100x10x4.75mm para poder alojar entre ellas (en el plano de simetría) galgas extensométricas y poder así recoger las señales que se producen por la deformación del material. Ambas mitades se unen con EPOXY a temperatura ambiente.

Este proceso es largo y complicado, además introduce nuevos problemas que requieren la aceptación de nuevas hipótesis:

- El material deja de ser homogéneo.
- Hay cuerpos (galgas) que dificultan la propagación de la onda.



Como consecuencia, se dificulta la propagación de la onda.

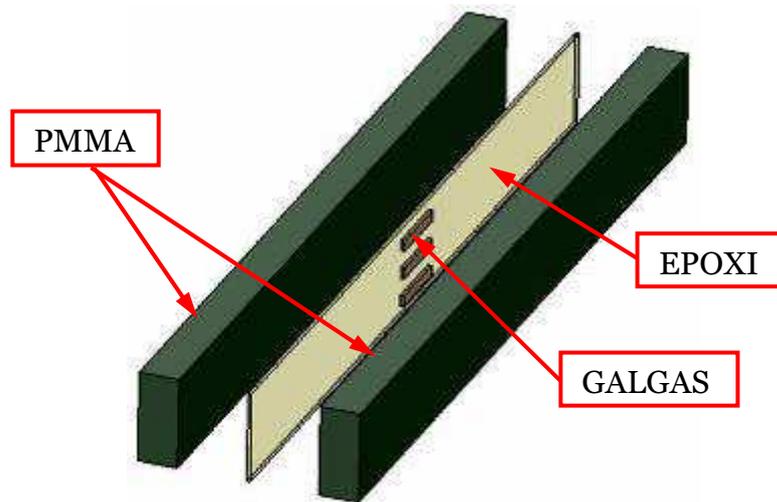


Figura 3.6 Esquema probeta

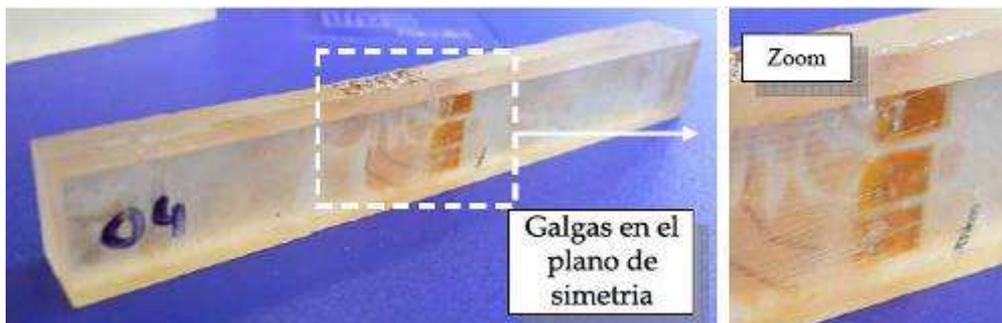


Figura 3.7 Detalle colocación de las galgas en el plano de simetría (J.A. Loya, 2006)

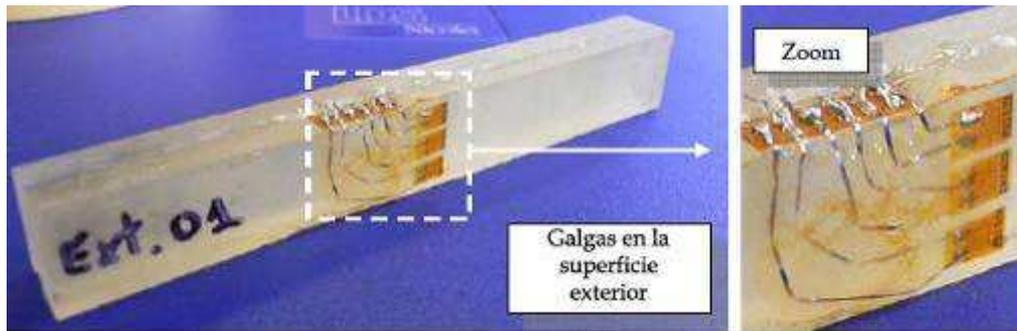


Figura 3.8 Detalle colocación de las galgas en la superficie exterior

Sería interesante analizar la diferencia entre colocar las galgas en el plano de simetría o en las superficies exteriores. Si la diferencia no es importante, es mejor fabricar las probetas como un bloque, eliminando así los problemas mencionados anteriormente y reduciendo en gran medida el tiempo de preparación de las probetas.

Proyectil

El proyectil que se lanza e impacta sobre la probeta está compuesto por un sabot y un flyer.

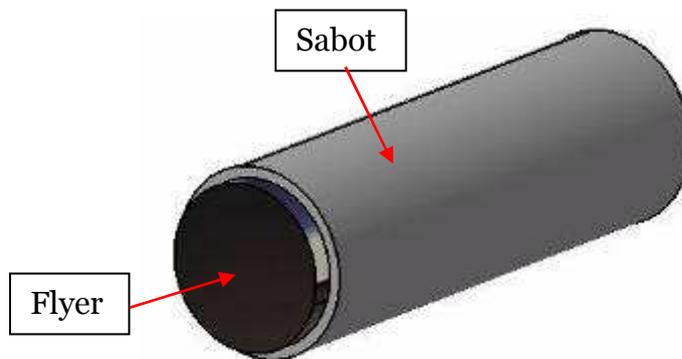


Figura 3.9 Proyectil: Flyer+Sabot

El flyer está hecho de Aluminio, tiene un diámetro de 20mm y un espesor de 5mm. Por su parte, el sabot, está fabricado en Nylon, tiene un diámetro de 25,4mm y un espesor de 26mm.

El flyer, está incrustado en el sabot unos 2,5mm. La función del sabot es asegurar que el impacto que realizará el flyer sobre la probeta se realice de forma plana, ya que si un disco de poco espesor es lanzado a gran velocidad, puede que se gire ligeramente durante el trayecto y el impacto no se produzca entre caras paralelas.

El pulso de compresión generado tiene una duración y magnitud determinadas por la longitud y la velocidad de impacto del proyectil respectivamente. Por ello, para poder controlar la duración de la carga aplicada, se pueden emplear distintas longitudes de proyectil. La magnitud del pulso se controla mediante la modificación de la velocidad de impacto, gobernada por la presión de alimentación del compresor.

Cuando el proyectil impacta sobre la probeta, el sabot y el flyer se separan. Además, el sabot está hecho de Nylon para que las ondas generadas en el impacto no se vean afectadas por el hecho de introducirlo en el ensayo.

Recogida de la señal

La recogida de las deformaciones producidas por el impacto se realiza mediante las bandas extensométricas que están adheridas a las caras de la probeta. Las señales registradas por las bandas pasan por una serie de amplificadores configurados en forma de puente rectificador usando cuatro resistencias (puente Wheatstone). Posteriormente se puede leer la señal en el osciloscopio.

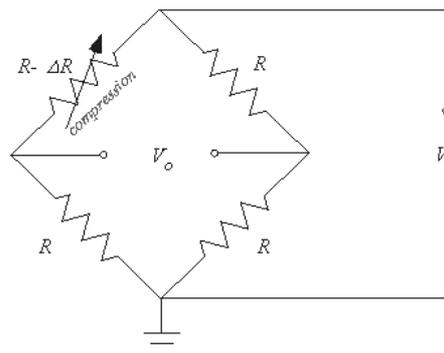


Figura 3.10 Puente Wheatstone



Figura 3.11 La señal recogida por las galgas y llevada a los amplificadores



Figura 3.12 Osciloscopio NICOLET



Figura 3.13 Amplificadores FYLDE

Alineamiento Láser

Para alinear la probeta con el flyer con la mayor precisión posible se utiliza un sistema láser. Este sistema consiste en colocar un láser en un alojamiento junto al proyectil apuntando a la probeta. Si en la superficie de impacto se visualiza un punto producido por el láser, entonces se producirá el impacto. Será necesario calibrar y fijar bien el láser para asegurar el correcto impacto del proyectil sobre la probeta.

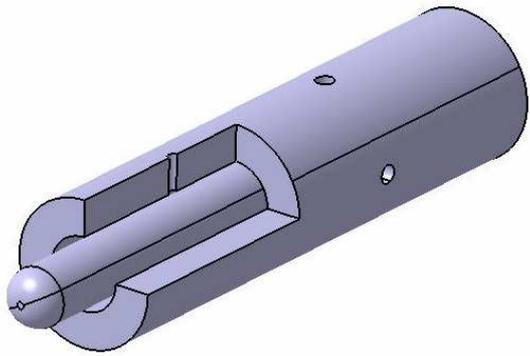


Figura 3.14 Alojamiento del láser

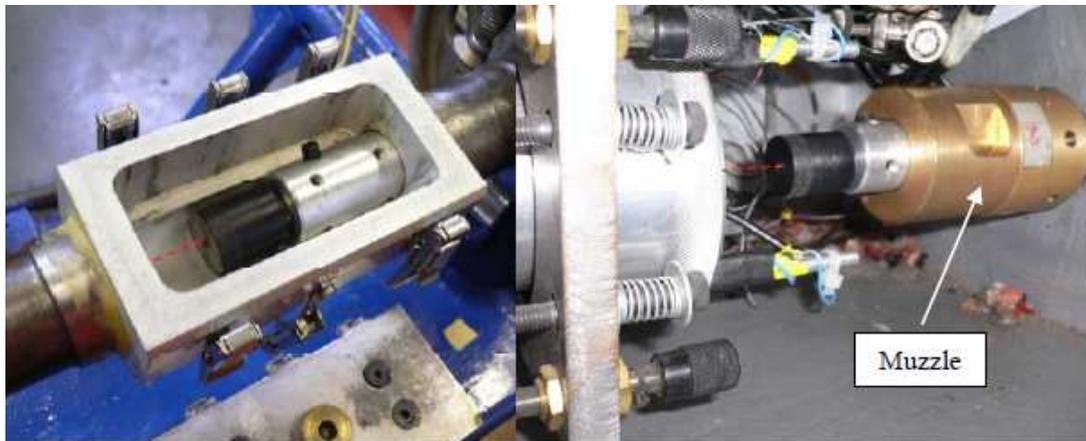


Figura 3.15 Posicionamiento del láser

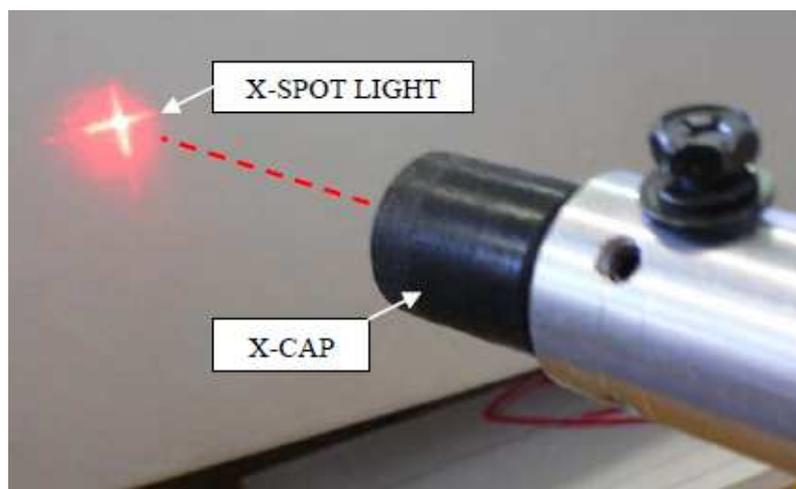


Figura 3.16 Detalle del láser

Este método no es muy deseable porque:

- Un alineamiento del láser como éste se utiliza para posicionar la probeta respecto al proyectil, y no al revés.
- Los métodos de medición óptica son de alta precisión, y si ponemos atención a pequeños desalineamientos entonces deberíamos tener en cuenta otros factores que hemos obviado.
- La superficie del flyer no se tiene en cuenta.
- No tenemos información del error de desalineamiento que el láser puede detectar.

Aunque usando este método:

- Un posicionamiento de la probeta como este, y utilizando un buen flyer y sabot, el ángulo de desalineamiento no se puede medir, pero probablemente sea muy pequeño.
- No sabemos cuán importante es una pequeña variación del ángulo de impacto. ¿Es un parámetro crítico? ¿Debemos suponer que éste no es un problema importante? Estas cuestiones son respondidas en el capítulo 0.

Montaje del conjunto

En el laboratorio, el montaje del conjunto debería quedar como muestra la Figura 3.17, con todos los elementos descritos anteriormente. En la simulación numérica que se realiza en este trabajo se simplifica el conjunto, representando sólo el flyer y la probeta, como se muestra en la Figura 3.18.

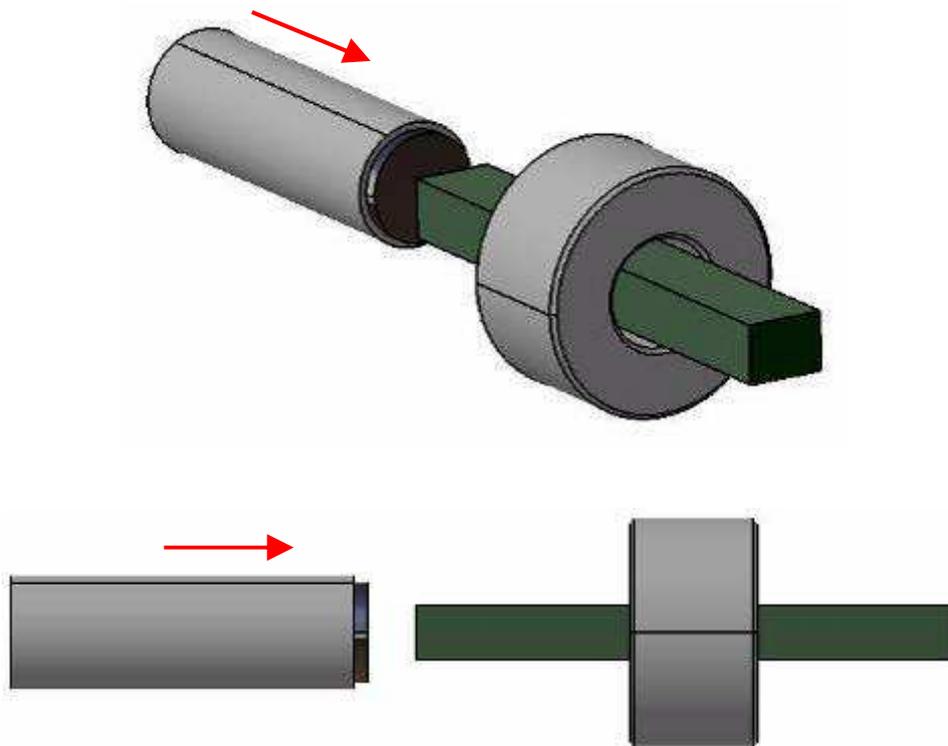


Figura 3.17 Simulación del montaje del laboratorio

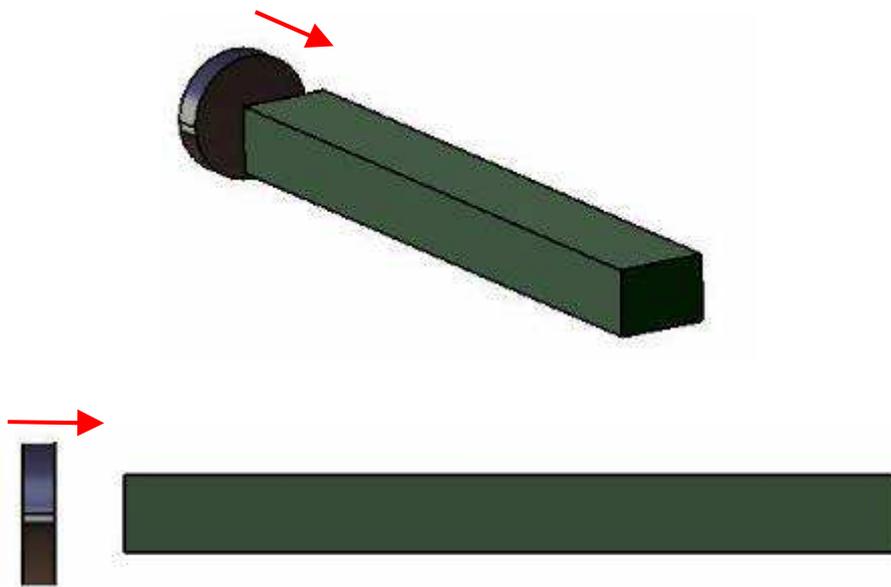


Figura 3.18 Simplificación del modelo del laboratorio para simularlo numéricamente

3.2 Características del PMMA

El polimetil metacrilato, $[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)-]_n$, también conocido por sus siglas PMMA, es un acrílico que se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo. Compite, en cuanto a aplicaciones se refiere, con otros plásticos como el policarbonato (PC) o el poliestireno (PS), pero el acrílico se destaca frente a otros plásticos transparentes en cuanto a resistencia a la intemperie y transparencia.

Es un material amorfo cuya propiedad más destacada es su excelente transparencia, de ahí que sus principales aplicaciones sean como sustituto del vidrio. Según los análisis microscópicos y de rayos-X, que indican que el material es amorfo, este polímero fue considerado durante muchos años atáctico¹, al igual que otros polímeros derivados del etileno sustituido. Sin embargo, hoy en día se sabe que los polímeros comerciales son más sindiotácticos² que atácticos. En una escala de determinación pudo considerarse alrededor del 54% sindiotáctico, 37% atáctico y 9% isotáctico³ [Brydson 1995].

En condiciones normales de uso, debido a que tiene una temperatura de transición vítrea (T_g) de 104°C y su naturaleza es amorfa, el PMMA es un material plástico transparente, duro, muy rígido y frágil, cuya tenacidad de fractura es superior a la del poliestireno (PS). A temperatura ambiente, el PMMA, puede ser sometido a procesos de transformación por arranque de viruta. Cuando se calienta por encima de su T_g , es un material flexible, tenaz, extensible y fácilmente deformable, por lo que puede adquirir geometrías complejas. Puede ser moldeado o extruido.

¹ Atáctico: poseen un orden constante en los sustituyentes, sin embargo, estos se encuentran enlazados de forma alternante en el carbono quiral de la cadena principal del polímero.

² Sindiotáctico: los sustituyentes se encuentran distribuidos de manera aleatoria a lo largo de la cadena de la macromolécula. Los polímeros formados por reacciones de radicales libres generan normalmente productos atácticos, son amorfos debido a que la formación de un cristal requiere orden.

³ Isotáctico: constituido por moléculas isotácticas, en las cuales los sustituyentes de la cadena principal están enlazados a un carbono quiral en la misma posición. Esta característica favorece la organización de las cadenas en hélices que es la condición principal para formar cristales.

Aunque en relación con otros plásticos puede considerarse duro, su susceptibilidad al rayado constituye la principal limitación de este material. Su resistencia a la fotodegradación es escasa, en particular frente a la luz ultravioleta, lo que se alivia en parte añadiendo estabilizadores. De esta forma, los grados comerciales llegan a tener una muy buena resistencia a la intemperie en comparación con otros plásticos.

El PMMA presenta gran resistencia al ataque de muchos compuestos, pero no resiste el ataque de otros como: Acetato de etilo, acetona, ácido acético glacial, ácido sulfúrico bicromático, alcohol amílico, benzol, butanol, diclorometano, triclorometano (cloroformo) y tolueno.

Es de fácil combustión, no se apaga al ser retirado del fuego. No produce ningún gas tóxico al arder por lo que lo podemos considerar un producto muy seguro para elementos próximos a las personas al igual que la madera.

Por lo general, láminas, barras, tubos y granulado para moldeo de PMMA son fabricados mediante procesos de polimerización en masa. En términos de volumen, el moldeo de láminas es el proceso más importante. Las láminas de PMMA son producidas en un rango de espesores de 1.6mm a 150mm, un metro de anchura mínima y longitudes de hasta cientos de metros.

Se producen principalmente por tres métodos:

- Colada: es el método más común porque es simple y fácilmente adaptable para fabricar una amplia variedad de grados, colores y tamaños
- Colada continua: este es método más económico y se utiliza para fabricar láminas más delgadas de lo normal.
- Extrusión: es el método preferido para fabricar espesores menores de 3mm y para ciertas aplicaciones especiales.

Una de las propiedades más usadas en las láminas de PMMA es su formabilidad. Puesto que es termoplástico, llega a ser blando y flexible cuando se calienta, adquiriendo fácilmente la forma deseada. Cuando se enfría es rígido y mantiene la forma que se le dio.

Es utilizado en la industria del automóvil, iluminación, cosméticos, espectáculos, construcción y óptica, entre muchas otras; y en aplicaciones múltiples, como señalización, cartelería o expositores.

Características generales:

- Transparencia de alrededor del 92%. Es el más transparente de los plásticos.
- Alta resistencia al impacto, de unas 10 a 20 veces la del vidrio.
- Elevada rigidez.
- Alta resistencia a las condiciones medioambientales y a los rayos ultravioleta. No hay un envejecimiento apreciable en 10 años de exposición exterior.
- Dureza similar a la del aluminio.
- Gran facilidad de mecanización y moldeo. Superficie apta para pulir.
- Apto para estar en contacto con alimentos.
- Resistente a los disolventes polares.
- Excelente aislante térmico y acústico.

Características Generales			
Densidad	DIN 53479	1.20	g/cm ³
Esfuerzo en punto de fluencia	DIN 53455	65	MPa
Alargamiento a la rotura	DIN 53455	3-10	%
Módulo de elasticidad a la tensión	DIN 53457	3000	MPa
Módulo de elasticidad a la torsión	DIN 53457	--	MPa
Dureza penetración a la Bola 30s	DIN 53453	180	MPa
Resistencia al impacto	DIN 53453	18	KJ/m ²
Punto de fusión	DIN 57736	--	°C
Temperatura de transición vítrea	DIN 57736	105	°C

Temperatura máxima periodos breves		100	°C
Temperatura máxima periodos largos		100	°C
Conductividad térmica (23°C)		0.19	W(k.m)
Conductividad calórica específica (23°C)		1.47	S(g.K)
Coefficiente de dilatación lineal		7	10*5.1K
Coefficiente dieléctrico	DIN 53483	3.4	--
Factor Disipación	DIN 53483	0.004	--
Resistencia específica de paso	DIN 53483	>10*15	--
Resistencia dieléctrica – VDE 0303 T2	DIN 53481	>45	Ohm
Resistencia a las corrientes parásitas – VDE 0303 T1	DIN 53480	K/KC>600	---

Tabla 3.1 Características generales del PMMA

[Fuente: www.plasticos-mecanizables.com]

Propiedades Mecánicas			
Resistencia a la tracción (prueba tipo 1, velocidad B)	ISO 527	72	MPa
Resistencia a la rotura en compresión	DIN 695 68T	124	MPa
Resistencia al corte	DIN 732 46	62.1	MPa
Resistencia a la flexión	ISO 178	116	MPa
Resistencia al choque (método Charpy)	ISO 179/2D	14	KJ/m ²
Alargamiento a la rotura	ISO 527	4	%
Dureza Rockwell (escala M)	ISO 2039/2	100	--

Tabla 3.2 Propiedades mecánicas del PMMA

[Fuente: Plásticos Ferplast SL]

3.3 Análisis del proceso.

El proyectil que impacta sobre la probeta genera una onda de compresión de duración determinada por la longitud de éste:

$$(3.1) \quad t_p = 2 \frac{L_p}{c}$$

siendo L_p la longitud del proyectil y c la velocidad de propagación de las ondas a través de la probeta.

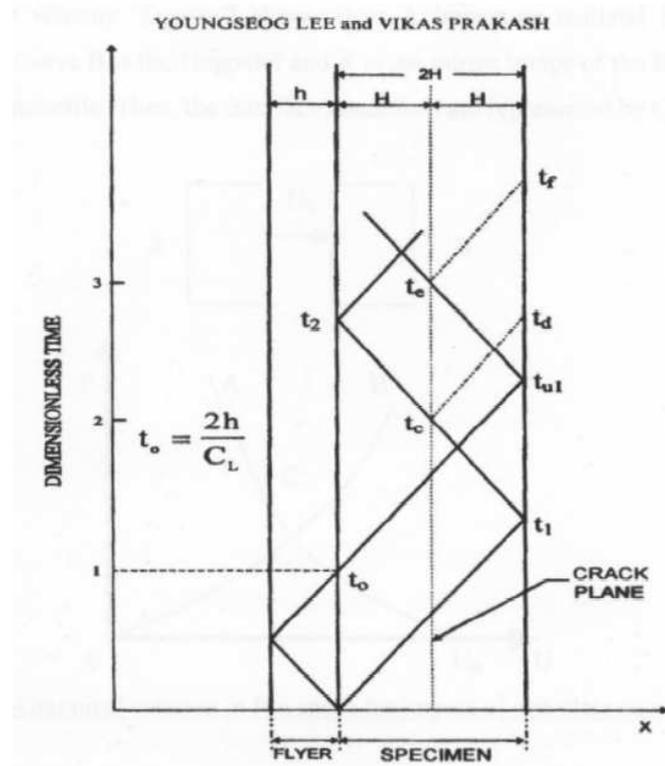


Figura 3.19 Propagación de la onda en el flyer y probeta

La tensión media generada por el impacto puede determinarse por las ecuaciones de las ondas elásticas, resultando ser:

$$(3.2) \quad \bar{\sigma} = \rho \cdot c \frac{V}{2}$$

siendo V la velocidad con la que impacta el proyectil.

En consecuencia, variando la velocidad del proyectil podemos controlar la tensión generada en las barras y variando la longitud del proyectil podemos controlar la duración del tiempo de aplicación de la carga.

La onda de compresión generada por el impacto del flyer sobre la probeta se desplaza a lo largo de ésta. Cuando la onda alcanza el extremo libre de la probeta se produce su reflexión y, con ello, un cambio de dirección y de signo, pasando de ser una onda de compresión a una de tracción.

El cambio de tracción a compresión no se produce instantáneamente, si no que cuando la onda de tracción se refleja y viaja en sentido opuesto al inicial, más ondas de compresión viajan en el sentido inicial hacia el extremo libre. El frente de ondas de tracción va aumentando su valor de tensión y se va cruzando con el frente de compresión, al ser de signos opuestos se restan entre sí. Por lo tanto, las tensiones de compresión van disminuyendo paulatinamente, y cuando todo el frente de ondas de compresión se ha visto reflejado, se produce un aumento de las tensiones de tracción hasta alcanzar el valor límite de la resistencia a tracción del material. En este instante es cuando la probeta rompe.

Este proceso de reflexión de ondas de tensión se ha descrito anteriormente en el apartado 2.1 y puede calcularse mediante la superposición de ondas que se desplazan en el espacio sin que se altere su perfil.

La primera es una onda de compresión que avanza a lo largo de la probeta y, cuando llega al extremo libre, supuestamente sigue avanzando en el espacio en la misma dirección y sentido. La otra onda, es igual pero de signo contrario, es decir, de tracción y avanza en sentido opuesto a la de compresión, desde el espacio hacia la probeta.

De este modo, ambas ondas se encuentran en el extremo libre de la probeta donde hay un estado tensional cero por ser extremo libre. A medida que avanzan y se van cruzando, la suma de ambas ondas nos da el estado tensional real de probeta. Podemos verlo en las siguientes figuras:

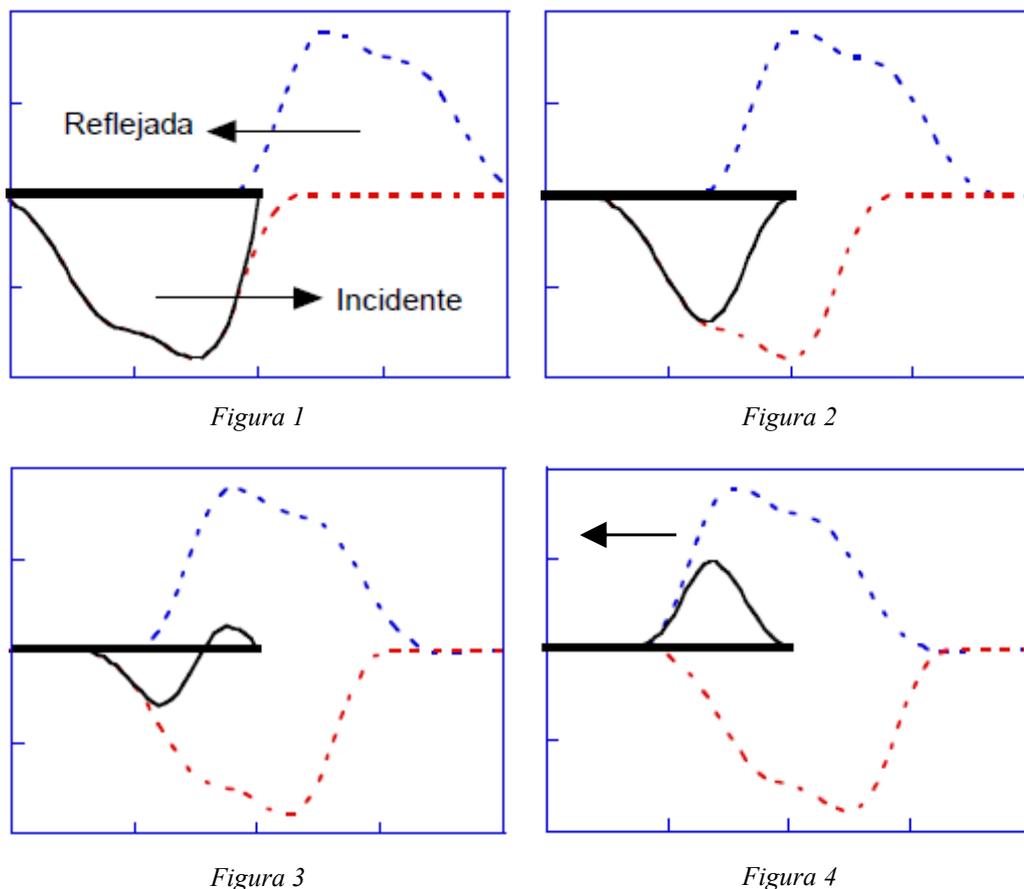


Figura 3.20 Reflexión de una onda de compresión y su cambio a tracción en el extremo libre de un ensayo de "Spalling".

En la Figura 1, podemos ver como justo en el extremo libre de la probeta (libre de tensiones) ambas ondas se encuentran. A medida que se van cruzando, la onda de compresión va disminuyendo. En la Figura 3 se aprecia como empieza a erigirse parte de la onda como tracción, para finalmente, en la Figura 4 convertirse totalmente en una onda de tracción.

Mediante la instrumentación de la probeta se registra el pulso de compresión que comunica el impacto del flyer. A continuación, se produce la reflexión de este pulso y su cambio a tracción, provocando así la rotura del material. No obstante, existe un tramo de pulso de tracción que sobrepasa el lugar donde se ha producido la rotura de la probeta y, por consiguiente, sigue viajando a lo largo de ésta. La magnitud de este pulso es también recogida por la instrumentación.

Por su parte, el tramo del pulso de tracción que no ha sobrepasado el lugar de rotura de la probeta, queda atrapado sin producir ningún efecto en los registros recogidos por la instrumentación.

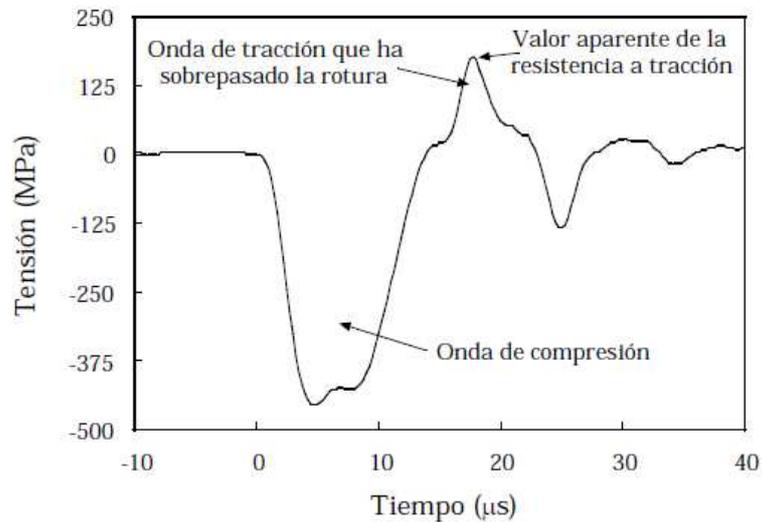


Figura 3.21 Información recogida por la instrumentación de la probeta (F. Gálvez. 1999)

En principio, el valor del máximo del pulso de tracción registrado proporcionaría el valor aparente de la resistencia a tracción de la probeta.

La realización de ensayos Spalling tiene claras ventajas respecto a otro tipo de ensayos para determinar la resistencia a tracción de un material. En este tipo de ensayos, el material está sometido a un estado de tensión uniaxial, por lo que la máxima tensión de tracción corresponde a la verdadera resistencia de tracción del material, lo que no sucede en otro tipo de ensayos.

Por otro lado, los ensayos Spalling tienen dos inconvenientes:

- Sólo es posible realizar este tipo de ensayo a altas velocidades.
- El material está previamente sometido a cargas de compresión que podrían producir algún daño en el material y rebajar así su resistencia antes de ser sometido a las cargas de tracción.

Una buena forma de reducir el riesgo de daños por compresión es introducir cargas que no superen un porcentaje de la resistencia a compresión del material,

por ejemplo el 25%. Así será razonable suponer que el material no ha sufrido ningún daño previo debido a la compresión.

En la realización de este tipo de ensayos, es necesario contar con el apoyo de fotografías ultrarrápidas¹, ya que al continuar el material cargado, el fallo del material se extiende a otros puntos. Esto provoca cierta confusión al determinar la posición de la rotura inicial. Las fotografías nos permiten determinar el tiempo en el que se produce el fallo y localizar con exactitud la primera fisura.

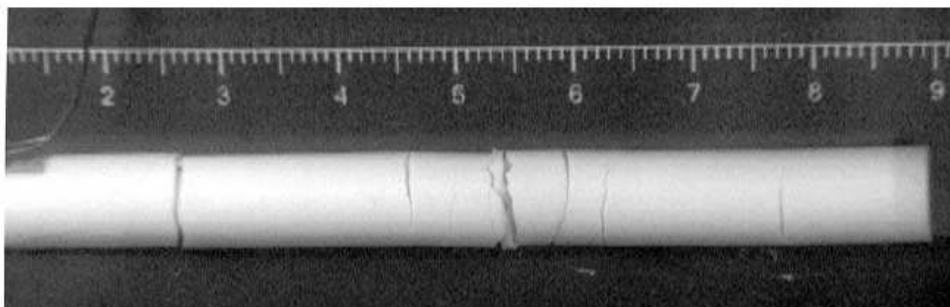


Figura 3.22 Fotografía de alta velocidad utilizada para obtener la posición de las roturas producidas durante un ensayo de Spalling (F. Gálvez. 1999)

Al examinar las fotografías, debemos tener en cuenta que pueden existir ciertas marcas en las probetas procedentes de la textura del material y del método de preparación de la misma. Estas marcas pueden llevarnos a cierta confusión ya que pueden parecer que son roturas, por eso es necesario tomar una fotografía más retardada en el tiempo o recoger los fragmentos resultantes del ensayo y examinarlos con minuciosidad para poder así localizar el lugar donde se produjo la rotura inicial.

3.4 Modelización numérica del ensayo

Se considera que la resistencia a tracción del material se puede determinar a través del valor máximo del pulso de tracción que ha sobrepasado el lugar de la rotura. No obstante, se ha comprobado que los valores que se obtienen son demasiado bajos al compararlos con otros ensayos de compresión diametral (F.

¹ En este trabajo sólo se hará una pequeña referencia y no se desarrollará el tema de las fotografías ultrarrápidas ya que sólo son necesarias en la práctica y no en la simulación numérica.

Gálvez, 1999). Esto hizo suponer que el procedimiento para determinar la resistencia a tracción no era el adecuado y era necesario introducir alguna modificación.

Para analizar el pulso de tracción que supera la rotura, se colocan bandas extensométricas en distintas posiciones. Las medidas registradas por las bandas evidencian que el pulso de tracción se atenúa de forma apreciable al recorrer la distancia que separa el lugar de la rotura de la posición de medida dada por la banda extensométrica. Es decir, el pulso de tracción se atenúa a medida que va recorriendo la probeta. Así pues, una banda más alejada del lugar de la rotura registrará una tensión menor que una que esté más cercana a este punto. Por ello, se puede afirmar que el procedimiento para determinar la resistencia a tracción a través de la máxima tensión registrada por la instrumentación no es muy apropiado.

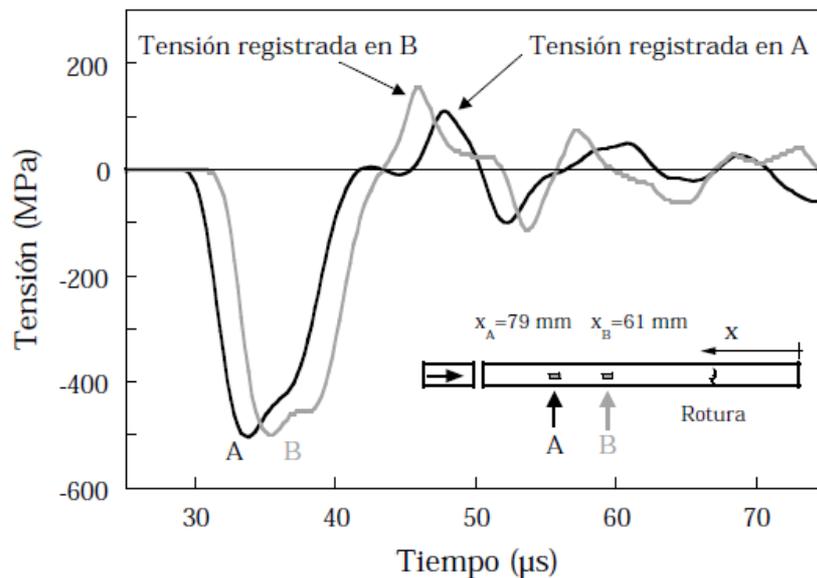


Figura 3.23 Registros obtenidos en un ensayo instrumentado en dos posiciones distintas (F. Gálvez, 1999)

Para comprobar que la aparición de este efecto no era resultado de un mal funcionamiento del equipo, se realizó una modelización numérica del ensayo. Las características de la simulación fueron:

- La geometría simulada fue exactamente la misma que la real.

- Material elástico, lineal y con rotura cuando la tensión principal alcanza un valor límite.

Se comprobó, gracias a la simulación, que las tensiones principales coincidían en todo instante con las del eje longitudinal de la probeta y su normal. Además, en las simulaciones también se puede obtener el instante donde se produce la rotura.

En la siguiente figura podemos ver que la parte del pulso de tracción va aumentando hasta llegar al valor límite, es decir, el valor de la resistencia a tracción del material, momento en el que éste falla. A partir de este momento, el pulso que queda después de la rotura, va decreciendo según se desplaza a lo largo de la probeta. Por eso, al registrar las tensiones con bandas extensométricas, y no estar la banda exactamente en el lugar de rotura, ésta registra un pulso menor que la resistencia a tracción del material. Y la lectura será menor cuanto más nos alejemos de la posición de rotura.

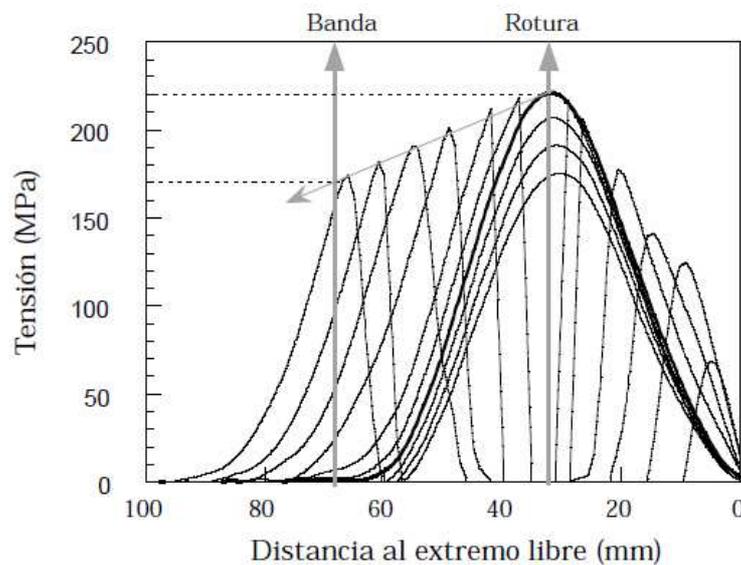


Figura 3.24 Modelización numérica del ensayo. Atenuación del pulso de tracción producido por la rotura de la probeta (F. Gálvez. 1999)

En la posición de la instrumentación de la probeta de la Figura 3.24 se registró un máximo de tensiones de tracción de 165MPa, mientras que la simulación proporciona en ese punto un valor de 170MPa.

El modelo numérico es capaz de simular con bastante precisión la posición y el instante del fallo del material, y reproducir las medidas obtenidas mediante la extensometría. Sin embargo, la resistencia a tracción no puede obtenerse del valor del pulso de tracción registrado por la banda extensométrica, pues ésta registra un valor inferior debido a la atenuación del pulso por la distancia que debe recorrer. Por tanto, es necesaria una modificación del método de cálculo.

Las tensiones registradas en las bandas extensométricas son menores que las obtenidas en la simulación debido a que al producirse la rotura, se crea una superficie libre irregular de manera muy rápida, haciendo que los efectos tridimensionales cobren importancia. Si bien antes podíamos simplificar mediante simetría el modelo debido que las tensiones principales coincidan con el eje longitudinal de la probeta y sus normales, siendo éstas muy pequeñas, al producirse la rotura estas tensiones aumentan debido a que el material se comporta de forma elástica. Esto significa que, como la energía elástica ha de conservarse, las tensiones en direcciones normales al eje de la probeta deben aumentar ya que, como se ha demostrado, la tensión en la dirección del eje va disminuyendo.

3.4.1 Efecto adicional: La multifisuración

En algunos ensayos realizados con otros materiales más frágiles (carburos) se ha apreciado un efecto nuevo, la multifisuración, que consiste en la aparición simultánea de varias fisuras.

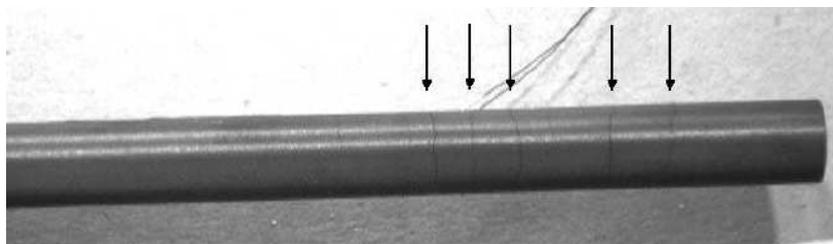


Figura 3.25 Fotografía de un ensayo realizado en carburo de boro. Se aprecia la multifisuración

(F. Gálvez. 1999)

No se puede comprender el motivo de la multifisuración sin entrar en detalle de cómo se produce la reflexión de una onda elástica en un extremo libre. Como se

ha explicado anteriormente, la reflexión de una onda elástica que viaja por una barra puede reproducirse superponiendo esta onda con una igual de tracción y de signo contrario que viaja en sentido opuesto.

Como se explicará a continuación, dependiendo de la forma de forma que tenga la onda de compresión que llega al extremo libre, se obtendrá un perfil u otro del pulso de tracción reflejado.

El pulso de compresión es conocido gracias a que es registrado por las bandas extensométricas. Si suponemos que no se producirán roturas, podemos determinar cómo evoluciona el valor de las tensiones de tracción en la probeta y en qué lugar se estará el máximo de ellas en cada instante. La evolución de las ondas de tracción presenta un aumento con un máximo determinado desplazándose por la probeta, cuando este máximo alcanza el valor de la resistencia a tracción del material, la probeta rompe. Así pues, es posible llegar a una relación entre la posición y el máximo de las tracciones, conociendo además el tiempo en el que esto ocurre.

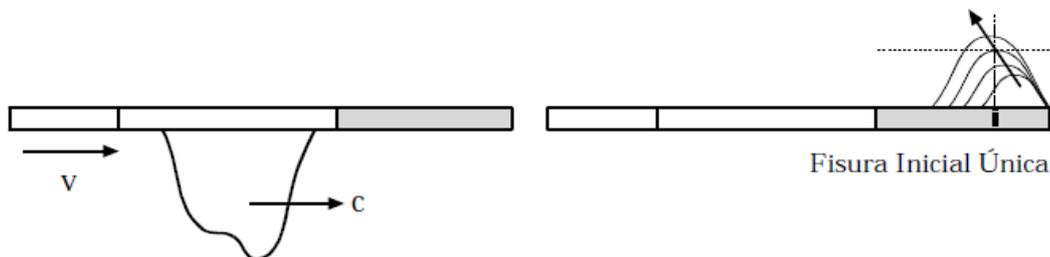


Figura 3.26 Reflexión de una onda en un extremo libre. La onda incidente produce una fisura única

(F. Gálvez. 1999).

Al ensayar los carburos, puesto que en este tipo de materiales la velocidad de propagación de las ondas es mayor, se recortó la longitud del proyectil para conseguir ondas de compresión de menor duración, y así evitar que se produjese la superposición de ondas. Al reducir la longitud del proyectil, el pulso generado cambia, aproximándose su forma a una onda triangular, produciéndose así la multifisuración.

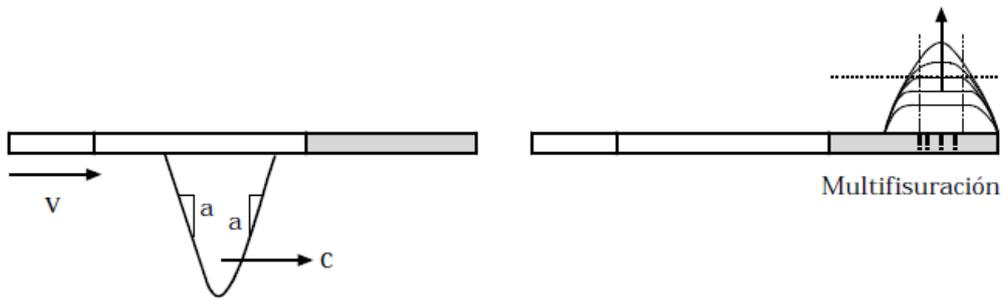


Figura 3.27 Reflexión de una onda en un extremo libre. La onda incidente produce la multifisuración

(F. Gálvez. 1999).

Ahora, la reflexión de este pulso produce un efecto meseta, es decir, el pulso crece sin presentar un único máximo, sino una zona plana. Esto produce la multifisuración, impidiendo asignar un valor de tensión a cada rotura y evitando así obtener una relación entre el máximo del pulso de tracción y la posición.

Analizamos ahora un caso similar al anterior, pero con una cierta modificación, la onda es triangular pero con diferentes pendientes de subida y bajada.

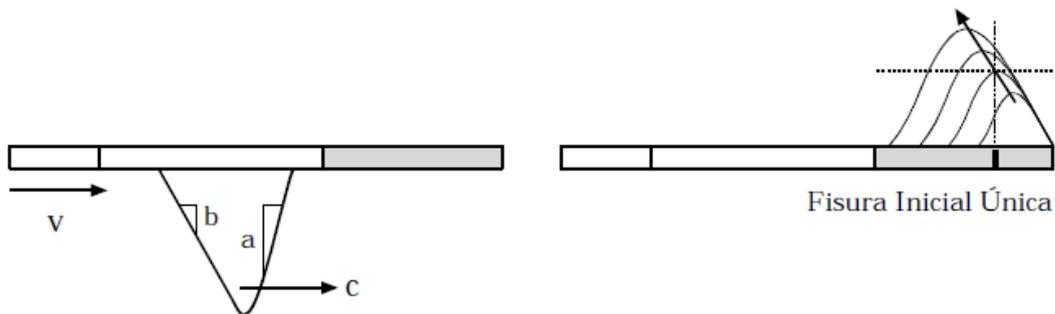


Figura 3.28 Reflexión de una onda en un extremo libre. La onda incidente produce una fisura única

(F. Gálvez. 1999)

En este caso observamos que la onda reflejada es muy distinta ya que no aparece el efecto meseta, sino que existe un máximo de tracción único produciéndose así una única fisura inicial y no la multifisuración. Por lo tanto, existiría una relación entre la posición de la primera rotura y el máximo de tracción que la produce.

Para obtener un pulso triangular de diferentes pendientes es importante conocer porque se producen estas pendientes. En un caso ideal el impacto del

proyectil contra una barra seminfinita produciría un pulso rectangular. La pendiente de subida se produce por el impacto inicial, que en un caso ideal es instantáneo. En un caso real, el material presenta cierta rugosidad y existirá un ligero desalineamiento entre proyectil y barra que implica que el tiempo de subida del pulso tenga cierta pendiente.

Ésta pendiente no puede controlarse con facilidad ya que varía según el contacto producido en el impacto. En cambio, la pendiente de bajada es el producto de la reflexión de la pendiente de subida en el extremo posterior del proyectil. Mientras esta reflexión se produzca en una superficie plana, la pendiente de bajada será igual que la pendiente de subida. Entonces, si modificamos esta superficie, las pendientes serán diferentes. Para conseguir este efecto se pueden fabricar proyectiles con un chaflán en su cara posterior.

3.5 Procedimiento de cálculo de la resistencia a tracción

Como se ha explicado anteriormente, es posible llegar a una relación entre la posición de la primera fisura y el valor de la tensión que la provoca. Por lo tanto, si conocemos la posición de la primera fisura, es lógico pensar que podremos hallar el valor de la tensión máxima que la produce, que coincidirá con la resistencia a tracción del material, y el instante en el que ésta ocurre.

Mediante el cálculo elástico de superposición de ondas, suponiendo que no existe rotura, se puede obtener la evolución del perfil de tensiones de tracción durante la reflexión, siguiendo el crecimiento del máximo y relacionándolo con la posición para determinar la resistencia a tracción del material. En la Figura 3.29 se muestra la evolución de un perfil de tensiones de tracción con el tiempo. Se muestran los perfiles de tensión determinados a través de un cálculo analítico de la reflexión de la onda de compresión de un ensayo, desde el momento en el que aparecen tensiones de tracción y posteriormente en intervalos de $0.25 \mu\text{s}$.

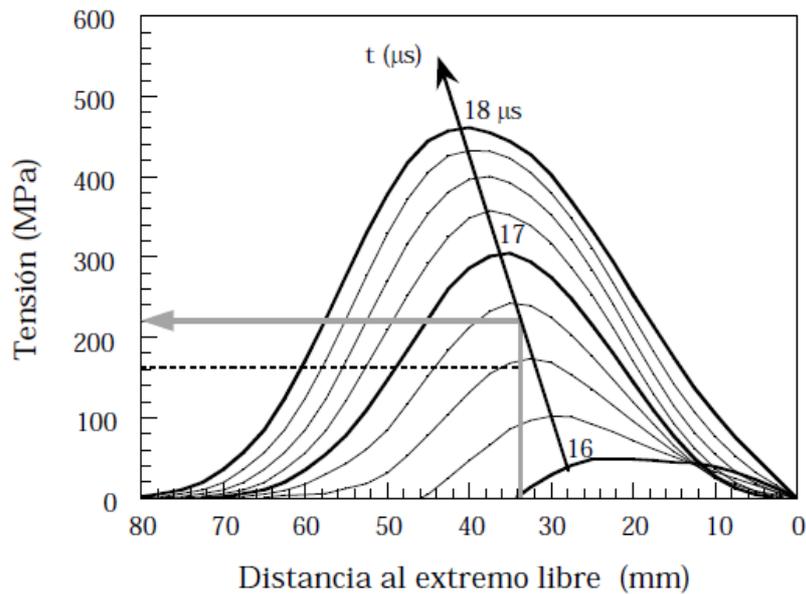


Figura 3.29 Crecimiento teórico del pulso de tracción sin rotura para determinar la resistencia a tracción de la probeta (F. Gálvez. 1999)

La posición en la que se produce la rotura se obtiene con las fotografías de alta velocidad y se corresponde con un perfil de tensiones que presenta un máximo en ese punto. La curva que presente un máximo en la posición de la rotura, es el estado tensional en ese instante, y se corresponde con la resistencia a tracción del material. Este valor es efectivamente mayor que el que registre la banda (marcado con línea discontinua) debido a que, como se ha explicado anteriormente, hay una distancia entre la zona de rotura y la banda que la onda ha de recorrer y hace que ésta se atenúe. Gracias a esta relación entre la posición y el máximo de las tensiones de tracción, la determinación del lugar de la primera fisura proporciona la resistencia a tracción del material.

Este procedimiento de cálculo es muy sencillo, el dato de partida necesario es el perfil de la onda de compresión introducida en la probeta, la posición de la rotura se mide en la fotografía y como resultado obtenemos la resistencia a tracción del material y el instante en el que rompe.

En definitiva, es importante que el pulso de compresión generado en el impacto tenga unas ciertas características para que se produzca una variación de la posición del máximo a lo largo del tiempo durante la reflexión. Esto evitará la

multifisuración y producirá una fisura inicial única, que es una de las hipótesis necesarias que debe cumplir el ensayo.

Existen varios métodos de realizar el ensayo Spalling, en el caso que ocupa este trabajo, el ensayo es directo, es decir, el proyectil impacta directamente contra la probeta, pero existe otro método en el que el proyectil impacta sobre una barra de acero considerada seminfinita que está en contacto con la probeta. La onda se transmite a través de la barra y pasa a la probeta.

En este último método, se puede conocer el pulso de compresión que produce el proyectil antes de realizar el ensayo, sólo es necesario impactar con el proyectil sobre la barra de acero sin probeta. Mediante la instrumentación de la barra somos capaces de predecir la evolución de las tensiones en la probeta. Por consiguiente, sabremos con antelación la zona dónde se va a producir la rotura y en qué tiempo va a ocurrir, con un pequeño margen de error, lo que permite ajustar con precisión los puntos y tiempos en los que se toman las fotografías. Una vez realizado el ensayo, midiendo con precisión la posición exacta de la rotura se determina el instante en que ha roto y se obtiene la resistencia a tracción del material

En la simulación Spalling ensayada en este trabajo (choque directo del flyer contra la probeta) la onda de compresión se recoge mediante la instrumentación de la probeta.

Dependiendo de los materiales a ensayar y de las condiciones del pulso inicial, es posible evitar que en el ensayo se produzcan fisuras secundarias posteriores a la fisura inicial, obteniendo así una fractura única. Esto implica que se puede prescindir de la técnica de la fotografía ultrarrápida, simplificando y abaratando el ensayo.

3.6 Simulación numérica del ensayo

La simulación numérica del ensayo se ha realizado con el programa de elementos finitos ABAQUS. El modelo, que se ha simulado mediante el método de los elementos finitos, es el que se ha mostrado anteriormente en la Figura

3.18, ya que es conveniente reducir al máximo el número de cálculos realizados por el ordenador. No obstante, esta simplificación del modelo no influye en los resultados, ya que según las hipótesis aceptadas ni el holder ofrece resistencia al movimiento de la probeta, ni el sabot influye en la longitud, ni magnitud de la onda producida en el impacto debido a la configuración flyer+sabot.

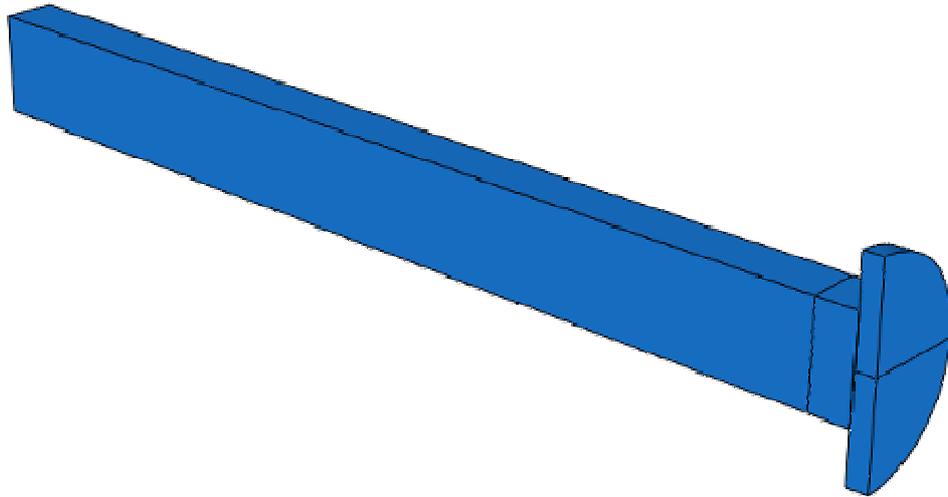


Figura 3.30 Modelo hecho en ABAQUS de la simulación numérica.

La simulación inicial se ha realizado con un flyer de aluminio de 20mm de diámetro y espesor de 5mm. Sin embargo, como se mostrará en el capítulo 0, se han realizado las simulaciones modificando el espesor del flyer con el fin de analizar las diferencias en la onda resultante del impacto y obtener mejores resultados.

Por su parte, la probeta también se ha diseñado con las dimensiones mencionadas, que son 100x10x10mm, aunque también se han realizado varias simulaciones modificando las dimensiones con el fin de encontrar la geometría idónea para realizar el ensayo. La probeta se ha simplificado, diseñándose como un monobloque de PMMA, eliminando la capa de EPOXI. Se ha estudiado la influencia de colocar una banda extensométrica en el centro de la probeta o en las caras exteriores, para saber en qué orden varían los registros obtenidos, ya que si son similares, se eliminaría el largo y complejo proceso de preparación de

la probeta para colocar la banda extensométrica en el centro de ésta; los resultados se presentarán en el capítulo 0.

Se ha utilizado una simulación del tipo *Dynamic, Implicit*, es decir, se ha seleccionado un modelo dinámico de integración implícita. El seleccionar un modelo dinámico es, como ya se ha explicado, porque se producen altas velocidades de deformación y los resultados obtenidos cambian significativamente con respecto a los modelos estáticos. Y se ha integrado implícita porque, a pesar de realizar más cálculos alargando el tiempo de simulación, los resultados obtenidos son más precisos.

Existen dos posibilidades a la hora de elegir paso de integración, automática o fija. Seleccionando la automática se le deja al programa la libertad de seleccionar el paso que más conviene en relación al tiempo de simulación y el número máximo de pasos introducidos. Esto puede provocar muchos problemas de convergencia difíciles de controlar para el diseñador. La fija es más estable, ya que si la solución no converge el programa ajusta parámetros y fuerza la convergencia, por lo que se ha seleccionado en principio un paso de fijo de 10^{-6} s. En este caso, el programa simula el modelo hasta el parámetro crítico, es decir, si el número de pasos introducido no es suficiente para simular el tiempo de simulación seleccionado, el programa simulará el número de pasos introducidos. Y, por el contrario, si el tiempo de simulación se cumple con menor número de pasos que el introducido, el programa simulará hasta cumplir el tiempo de simulación.

En la simulación se utiliza un modelo de discretización Lagrangiana, es decir, un modelo en el que la malla se mueve con el material. Las mallas del proyectil y de la probeta interactúan entre ellas, pero ningún nodo de una superficie atraviesa a la otra. Para la interacción entre las partes se ha seleccionado un contacto sólido (*Hard Contact*) entre las superficies implicadas en el impacto, dentro del apartado de comportamiento normal (*Normal Behaviour*).

Para la correcta simulación de la interacción entre las partes, se utiliza el método de penalización con superficie maestra, catalogando las superficies

implicadas en el impacto entre maestras y esclavas. Se ha seleccionado como superficie maestra (*Master Surface*) la superficie del flyer que impacta contra la probeta, y como superficie esclava (*Slave Surface*) la superficie de la probeta donde impacta el flyer. La superficie esclava es la que depende de la principal, por ello es la de la probeta, ya que dependiendo de cómo impacte la superficie principal, la superficie esclava sufrirá unas consecuencias u otras.

Para reducir el número de cálculos y el tiempo de simulación, se ha diseñado un modelo simétrico del modelo real. Aplicando las condiciones de simetría los resultados obtenidos son equivalentes a haber simulado un modelo completo. Las condiciones de contorno que se aplican son:

- Se restringen los movimientos en la dirección perpendicular al plano de simetría. $U_3=0$
- Se restringen los giros. $U_{R1}=U_{R2}=0$

La única carga que se aplica en el modelo es una velocidad inicial a todo el volumen del flyer (Figura 3.31). Es necesario aclarar que en el momento inicial, la probeta y el flyer deben de estar separados. Se ha introducido una velocidad inicial de 20m/s en todas las simulaciones realizadas con el fin de poder comparar el comportamiento de la probeta bajo las mismas sollicitaciones de carga.

En el modelo se han definido los materiales como elásticos e isótropos, por lo que no existe la posibilidad de pasar a la zona plástica del material. No obstante la velocidad introducida, según la teoría, no debería generar ondas que alcanzasen la región plástica de la probeta. La tensión media generada por el impacto de un flyer de aluminio contra una probeta de PMMA se ha definido en la ecuación (3.2, y es:

$$\sigma_I = \pm \rho_{Al} \cdot C_{Al} \cdot \frac{V_{IMPACTO}}{2} = 2800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5080 \frac{m}{s} \cdot \frac{20}{2} \frac{m}{s} = 142.24MPa$$

La transmisión de la onda de impacto debe ser multiplicada por un coeficiente de transmisión que ha sido definido en la ecuación (2.14. Este coeficiente tiene

en cuenta el área de impacto, la densidad y la velocidad de transmisión de ondas de cada medio.

$$C_T = \frac{2A_1\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} = \frac{2 \cdot 190 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{190 \times 10^{-6} \cdot 2800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 5080 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 39.3 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.257$$

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.257 \cdot 142.24 \text{MPa} = \boxed{36.5 \text{MPa}}$$

El límite elástico a tracción del material es de 72MPa, según se muestra en la Tabla 3.2, con lo que se estaría dentro de la región elástica.

Se debe aclarar que no es necesario generar una onda que supere los 72MPa, ya que en el modelo simulado se han introducido como características de los materiales elásticos e isótropos. No se han modelizado las zonas plásticas de los materiales ni se han introducido criterios de daño, con lo que la probeta en la simulación nunca romperá. La simulación es un estudio que tiene como fin conocer las reacciones que se producen en el modelo partiendo de unos materiales y condiciones determinadas.

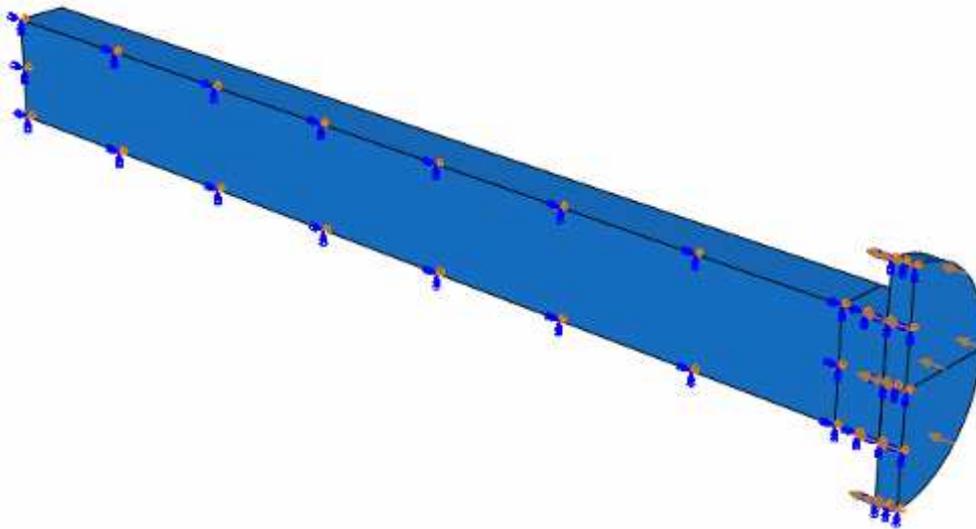


Figura 3.31 Condiciones de contorno aplicadas al modelo

El mallado del modelo es un paso muy importante en la simulación, ya que de él depende la calidad de los resultados obtenidos. A menor tamaño de malla, más nodos son analizados, se obtiene más información y el resultado es más preciso. No obstante, mayor número de nodos implica que la cantidad de cálculos aumenta de forma exponencial, con lo que el tiempo de simulación aumenta. Es necesario entonces llegar a un equilibrio entre el tamaño de la malla y la calidad de los resultados obtenidos.

En el modelo se ha dividido la probeta en dos zonas diferenciadas, la zona de impacto y el resto de la probeta. La zona de choque tiene un tamaño de malla muy fino ya que es necesario recoger la máxima información posible para analizar el comportamiento de la probeta durante el impacto. En el resto de la probeta, se deben registrar los valores de tensión y deformación de una onda ya estabilizada que se transmite longitudinalmente en condiciones de tensión plana, con lo que no es necesario un mallado excesivamente fino. El mallado que se muestra en la figura es el utilizado para realizar los cálculos ya que con él se obtienen buenos resultados sin ser excesivo el tiempo de simulación

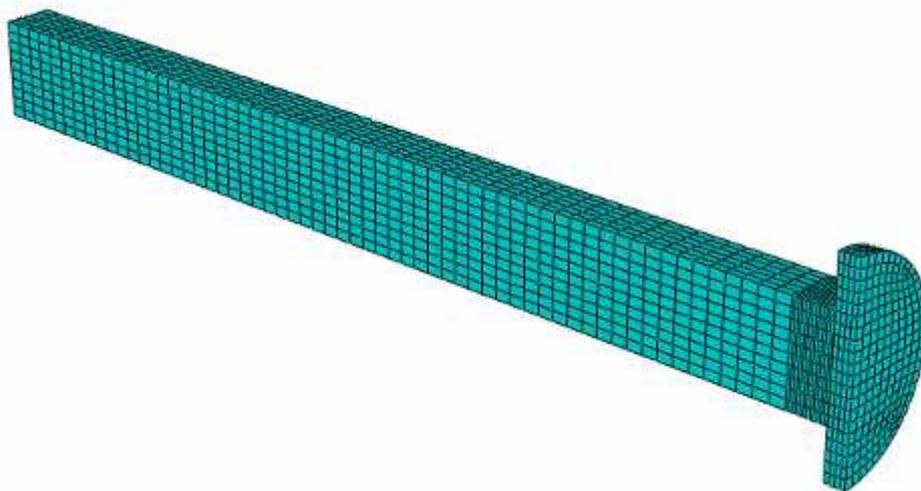


Figura 3.32 Mallado del modelo

La recogida de datos se va a realizar en elementos de:

- La cara de impacto.
- Un plano situado a $\frac{1}{4}$ de la distancia total de la probeta.
- En el plano medio.
- En el plano situado a $\frac{3}{4}$ de la distancia total de la probeta.
- En el plano límite, que es plano donde se encuentran la onda de tracción y de compresión.

Para determinar la zona donde se produce la rotura se deben analizar las gráficas de tensión-tiempo y deformación-tiempo. A partir de las gráficas se determina qué magnitud y longitud tiene el pulso provocado por el impacto. Estas medidas deben mantenerse hasta que el pulso de compresión se cruce con el pulso reflejado. En las gráficas se puede identificar este momento porque al cruzarse ambos pulsos, uno de tracción y uno de compresión, se anulan entre sí y la longitud del pulso se ve reducida, como podemos ver en el esquema de la Figura 3.33.

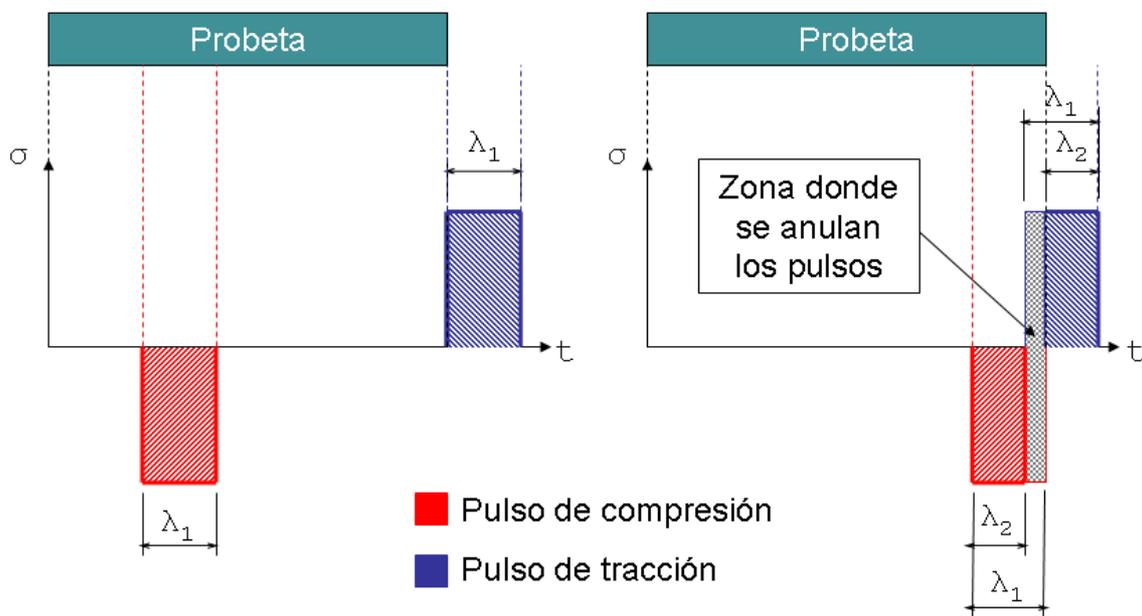


Figura 3.33 Cruce de pulso de compresión con el reflejado de tracción

El impacto provoca una onda de compresión de magnitud σ y de longitud λ_1 , la onda se refleja en el extremo libre de la probeta y se transforma de en una onda de tracción. Al cruzarse ambos frentes se anulan entre sí, ya que tienen la misma magnitud. El frente de ondas de tracción continúa avanzando hasta que la onda se refleja por completo, adquiriendo la misma longitud y magnitud que el pulso de compresión incidente. Si la tensión reflejada es mayor que el límite de tracción del material la probeta romperá.

El proceso completo de reflexión de ondas en el extremo libre de la probeta se muestra en la Figura 3.34, dónde se suceden los siguientes pasos:

- a)** La onda se aproxima al extremo libre.
- b)** Parte del pulso es reflejado, pero la tensión sigue siendo completamente de compresión.
- c)** Instantes después, parte de la tensión incidente se anula con la tensión reflejada. Comienza a haber tensión de tracción.
- d)** La tensión sigue reflejándose, aumenta la tensión de tracción.
- e)** La mitad del pulso se ha reflejado y toda la tensión es de tracción.
- f)** La forma final del pulso de tracción que se ha reflejado es exactamente igual que la forma de la onda incidente de compresión.

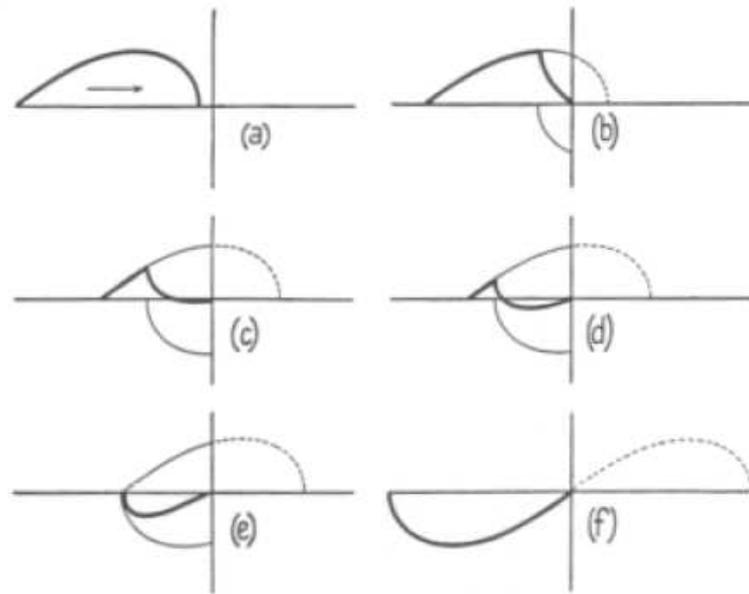


Figura 3.34 Proceso de reflexión de una onda en un extremo libre.

Por lo tanto, se debe encontrar el plano cuyos elementos estén sometidos a una onda de tensión cuya longitud sea igual a la del pulso de compresión. Ese plano se mantendrá constante debido a que la velocidad de la onda depende únicamente de las características del material por el que se transmite, en este caso, PMMA. Si se desea obtener una magnitud de pulso mayor bastará con aumentar la velocidad de impacto del flyer sobre la probeta, esto generará un pulso mayor pero el cruce de ondas de tracción y compresión se dará en el mismo plano.

Con los resultados obtenidos se determinará en qué posición habrá que colocar las bandas extensométricas para que los registros obtenidos con el ensayo sean los correctos y no salgan falseados, ya que, como se ha explicado en el capítulo 3.4, si la recogida de datos realizada por las bandas extensométricas está alejada de la zona de rotura, la magnitud que se registra de la tensión de rotura por tracción del material es inferior a la que realmente es. Este fenómeno aumenta cuanto más nos alejamos de la zona de rotura, por lo que es realmente necesario obtener la distancia correcta en dónde colocar las bandas extensométricas para sacar las propiedades reales del material.

La simulación numérica es una herramienta muy útil que nos permite ahorrar tiempo y dinero frente a los ensayos del laboratorio. Se utilizarán las simulaciones para obtener unos resultados que posteriormente se compararán con los ensayos del laboratorio. De no coincidir los resultados de la simulación con los del laboratorio, se analizarán los motivos y se propondrán soluciones. Se volverá a simular numéricamente el ensayo implementando mejoras propuestas y así sucesivamente hasta llegar a unos resultados aceptables.

4 RESULTADOS FINALES

Consideraciones previas

Idealmente, todas las galgas extensométricas deberían producir señales de ondas cuadradas. Sin embargo, esto no sucede ya que existen defectos del material, distorsiones de las ondas al atravesar la probeta reflejarse en el extremo libre y, sobre todo, porque el contacto que se produce en el impacto entre el flyer y la probeta no es perfecto. Esta última razón es, probablemente, la que más afecta a los resultados.

Zukas: para poder aplicar la teoría de propagación de ondas unidimensionales es recomendable que exista una relación entre sección y longitud de la probeta mayor de 50, es decir, $L/D > 50$. Si esto no sucede, la longitud del pulso se incrementa debido a los efectos del 2D y 3D. En las simulaciones realizadas, las secciones en contacto (flyer-probeta) son diferentes, tanto en forma como en dimensiones y materiales. Además la relación L/D es baja en comparación con la teoría de Zukas ($L/D \sim 15$), con lo que pueden aparecer efectos tridimensionales distorsionando las ondas. Por ello se debe comprobar que se produce una propagación unidimensional de las ondas en todas las simulaciones.

Los resultados dependen de la calidad y refinamiento de la malla, comportamiento del material y método de resolución. Por ello, se han tomado unos valores genéricos de estos parámetros para todas las simulaciones con el fin de que los resultados obtenidos no dependan de ellos. Si los resultados del laboratorio difieren con los de la simulación, habrá que tener en cuenta, entre otros, estos factores a la hora de analizar las causas de dicha disparidad.

Parámetros analizados en las simulaciones

En todas las simulaciones se han analizado los siguientes parámetros:

- **Propagación unidimensional**: se analiza la tensión y deformación en sus tres componentes principales tanto en elementos de la parte central como de las caras exteriores de la probeta. Si la tensión en el eje longitudinal de la probeta tiene cierto valor, mientras las otras dos

direcciones son nulas o despreciables frente a la otra, se aceptará que se trata de un caso de propagación unidimensional.

- **Tensión plana:** se analizan varios elementos de la parte central y de las caras exteriores de la probeta, si las ondas que se registran son iguales o muy similares en todos elementos analizados, se puede considerar que es indiferente realizar la toma de datos en el plano medio o en las caras exteriores. Este análisis es importante para poder determinar qué sección es la máxima para poder colocar las galgas extensométricas en las caras exteriores y evitar así el largo y complicado proceso de preparación de probetas que se ha comentado en el capítulo 3.1.

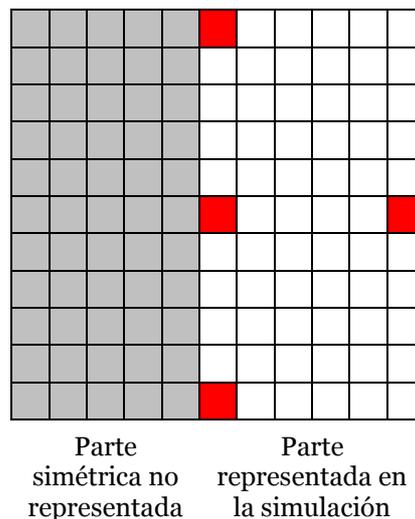


Figura 4.1 Elementos analizados de la probeta en las simulaciones para determinar si existe tensión plana.

- **Distancia de rotura:** se analiza la distancia a la cara de choque dónde se producirá la rotura (plano de cruce entre la onda de tracción y la de compresión) para saber si es posible colocar una galga extensométrica con el fin de tomar medidas en el laboratorio. Las galgas miden aproximadamente 15mm, por lo que la rotura debe producirse a una distancia mínima del plano de choque de 30mm para poder colocarse.

En los anejos podrán encontrarse todos los análisis en forma de gráficas que se han realizado en cada una de las simulaciones. En este apartado se mostrarán únicamente las gráficas de mayor interés para poder determinar si la probeta sería válida en los ensayos del laboratorio.

Además, debido a las discontinuidades que se producen en el impacto, el plano de choque es el único analizado mediante gráficas extraídas de ABAQUS ya que los datos que se pueden obtener de él no son determinantes en los análisis. En el resto, el proceso a seguir ha sido extraer los datos numéricos a una hoja de cálculo y analizarlos profundamente.

4.1 Influencia de la sección de la probeta

En este apartado se pretende determinar qué tipo de sección es la más adecuada para la realización de los ensayos Spalling. Se estudiarán probetas de sección cuadrada y cilíndrica, este parámetro influye directamente en la onda transmitida ya que el área de contacto es diferente. Además, las deformaciones sufridas tanto por probeta como por flyer variarán de una sección a otra.

Se compararán los resultados teóricos con los obtenidos en las simulaciones para comprobar si coinciden, de no ser así, se determinarán las razones y las posibles soluciones para mejorar el modelo.

4.1.1 Probetas de sección cuadrada

Según la teoría expuesta en el apartado 3.6, la tensión incidente (σ_I) sobre la probeta es la generada por un flyer de aluminio de 11mm de radio impactando a una velocidad de 20m/s, que es:

$$\sigma_I = \pm \rho_{Al} \cdot C_{Al} \cdot \frac{V_{IMPACTO}}{2} = 2800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5080 \frac{m}{s} \cdot \frac{20}{2} \frac{m}{s} = \boxed{142.24 MPa}$$

La tensión transmitida (σ_T) por el flyer de aluminio a la probeta de PMMA de sección cuadrada de 10mm de lado, es la tensión incidente multiplicada por el coeficiente de transmisión (C_T):

$$C_T = \frac{2A_1\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} = \frac{2 \cdot 190 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{190 \times 10^{-6} \cdot 2800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 5080 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 50 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.257$$

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.257 \cdot 142.24 \text{MPa} = \boxed{36.5 \text{MPa}}$$

$$t_p = 2 \frac{L}{c} = 2 \frac{2 \times 10^{-3} \text{m}}{5080 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \boxed{0.787 \mu\text{s}}$$

Por lo tanto, se debe transmitir un pulso de 36.5MPa de magnitud y 0.79μs de longitud.

Probeta 100x10x10mm. Flyer Ø20x2mm

1. Plano de choque

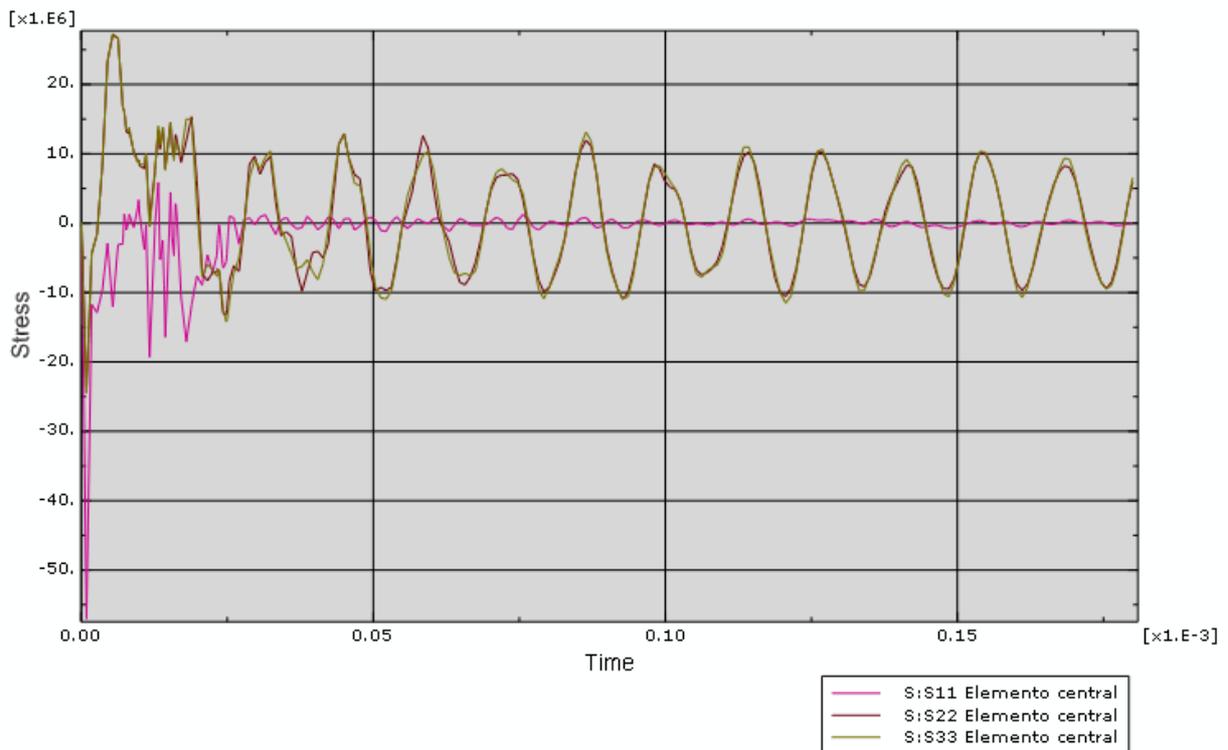


Figura 4.2 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Como se puede observar en la Figura 4.2, inicialmente existe un pico de compresión muy elevado debido al impacto del flyer. Este impacto provocará la

plastificación parcial o total de la zona de impacto, lo que disipará cierta cantidad de energía y la onda transmitida será inferior a la teórica. Para el análisis, se obviarán dicho pico inicial y sólo se tendrá en cuenta el pulso de compresión posterior.

La figura muestra como la magnitud de la tensión en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}) es muy inferior a la teórica. Además, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante con respecto a σ_{11} y no se disipan. Estos datos permiten afirmar que en este caso no se produce propagación unidimensional y, por lo tanto, este ensayo no es válido.

La causa de que las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieran un cierto valor se debe a la deformación que sufre el flyer durante el impacto. Debido a que la sección del flyer es mayor que la de la probeta, en el momento del impacto, éste se deforma “envolviéndola”, este efecto provoca la separación de la parte central del flyer con la probeta y, a su vez, aumenta la presión en las zonas periféricas (ver Figura 4.9). Esta deformación hace que las tensiones σ_{22} y σ_{33} cobren importancia y la tensión σ_{11} se vea reducida.

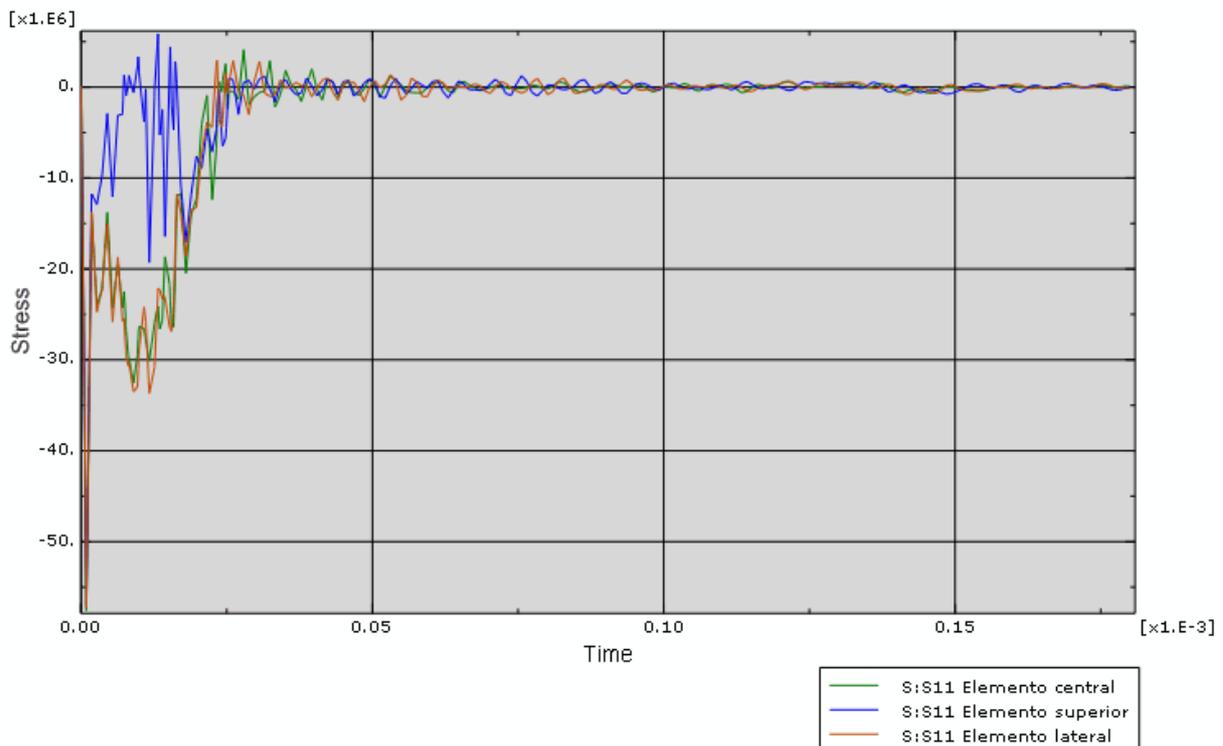


Figura 4.3 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

La Figura 4.3 muestra como la tensión σ_{11} del elemento central es mucho menor que la de los elementos superior y lateral. Esto corrobora lo expuesto anteriormente sobre la deformación del flyer.

Aunque no se produzca un impacto perfecto, se debe aclarar que la tensión total obtenida no es menor que la teórica, si no que la teoría sólo considera la tensión en la dirección longitudinal de la probeta, mientras que en las otras dos direcciones las tensiones son nulas. Como se explica en el apartado 3.4: “*como la energía elástica ha de conservarse, las tensiones en direcciones normales al eje de la probeta deben aumentar ya que la tensión en la dirección del eje va disminuyendo*”. En este caso, como las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un cierto valor, la tensión σ_{11} se ve reducida para conservar la energía elástica.

4.1.2 Probetas de sección cilíndrica

La tensión incidente (σ_I) sobre la probeta es la misma que en el caso de probetas de sección cuadrada, ya que el flyer utilizado es el mismo:

$$\sigma_I = \pm \rho_{Al} \cdot C_{Al} \cdot V_{IMPACTO} = 2800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5080 \frac{m}{s} \cdot 20 \frac{m}{s} = \boxed{142.24MPa}$$

El coeficiente de transmisión (C_T) en este caso, variará ligeramente ya que el área de la probeta es diferente y, por tanto, la tensión transmitida (σ_T) también lo será:

$$C_T = \frac{2A_1\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} = \frac{2 \cdot 190 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1580 \frac{m}{s}}{190 \times 10^{-6} \cdot 2800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5080 \frac{m}{s} + 39.3 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1580 \frac{m}{s}} = 0.259$$

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.259 \cdot 142.24MPa = \boxed{36.8MPa}$$

$$t_p = 2 \frac{L}{c} = 2 \frac{2 \times 10^{-3} m}{5080 \frac{m}{s}} = \boxed{0.787 \mu s}$$

Por lo tanto, se debe transmitir un pulso de 36.8MPa de magnitud y 0.79 μ s de longitud.

Probeta 100x \varnothing 10mm. Flyer \varnothing 20x2mm

1. Plano de choque

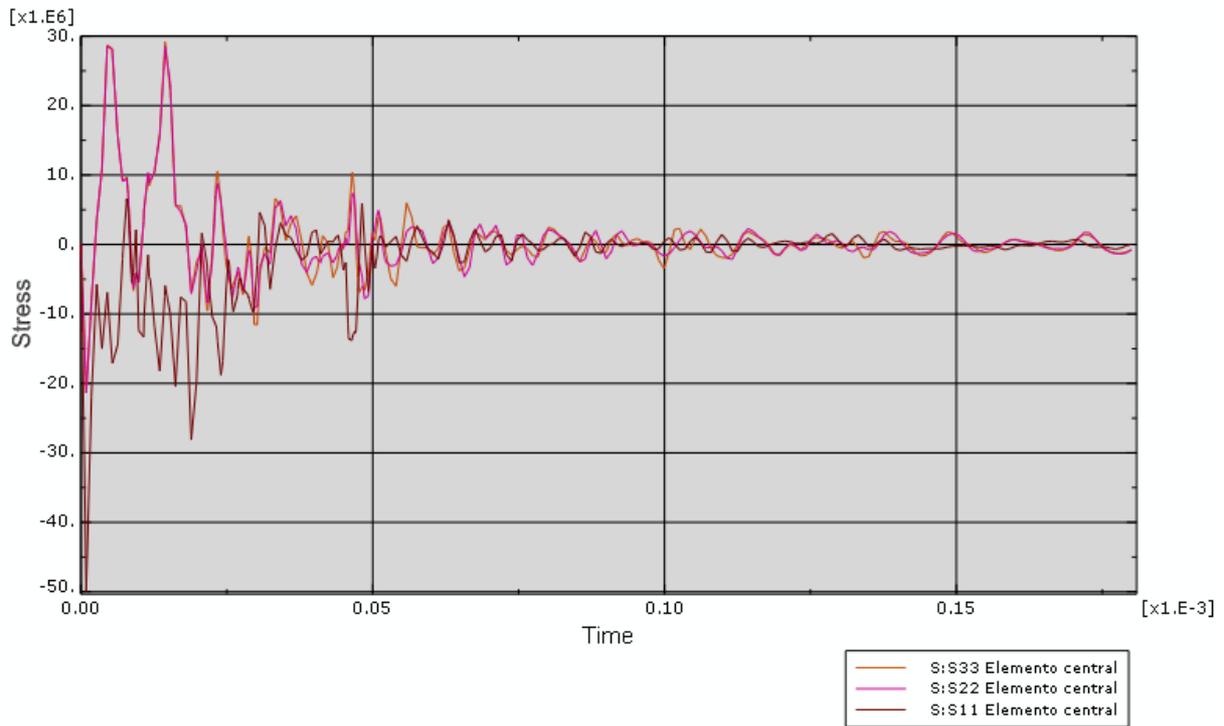


Figura 4.4 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

En la Figura 4.4 se observa la misma situación que en el caso de probetas de sección cuadrada, la magnitud de la tensión en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}) es muy inferior a la teórica y las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante.

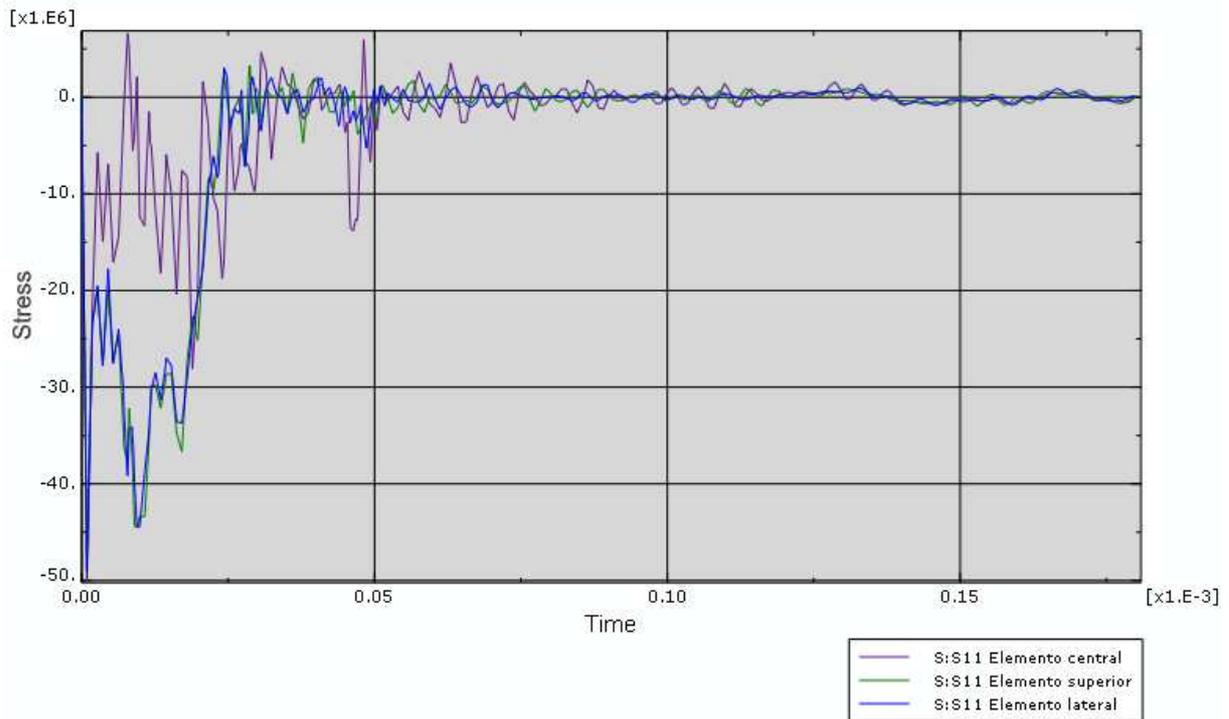


Figura 4.5 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Si se compara la Figura 4.5 con su homónima de probetas de sección cuadrada, se puede comprobar que el valor medio de σ_{11} del elemento central obtenido en ese caso es de 6MPa mientras que en éste es de 13MPa. Además los valores de σ_{11} de los elementos superior y lateral son de 31MPa en este caso y de 26MPa en el otro.

Estos datos permiten deducir que la sección circular provoca un menor efecto envolvente del flyer, ya que la tensión en la dirección longitudinal de la probeta es mayor en todos los elementos, reduciendo así el efecto de las tensiones σ_{22} y σ_{33} permitiendo que se disipen. Sin embargo, aunque este efecto se reduce, sigue siendo lo suficientemente significativo como para invalidar el ensayo.

4.1.3 Comparación de la sección

Aunque la información en los apartados anteriores revela que los ensayos realizados con los parámetros descritos resultan ser no válidos, se va a realizar la comparación de las ondas en ambos casos para poder visualizar las diferencias existentes entre ambas y poder extraer conclusiones de provecho

para futuros ensayos. La comparación se ha de realizar en el mismo plano y, al ser posible, en los mismos elementos. Además, dicho plano debe ser anterior al plano donde se produzca el cruce de la onda transmitida con la reflejada, ya que si no, los datos obtenidos estarían falseados. En este caso se va a realizar la comparación en el plano al 25% de la longitud de la probeta y, también, en su plano medio para visualizar la evolución de la onda a lo largo de cada tipo de probeta.

Es conveniente puntualizar el hecho de que, a medida que el frente de ondas avanza por la probeta, éste va estabilizándose y tomando los valores que realmente se deben comparar con los teóricos. Por ello, los datos de las simulaciones que se van a comparar con los valores teóricos son los registrados en el plano medio de la probeta. También se ha de aclarar que las gráficas tienen siempre un valor máximo que, por lo general, no representa el valor máximo del frente de ondas. Para determinar el máximo, se debe interpolar una recta entre los valores obtenidos del frente de ondas, como se muestra en la Figura 4.6.

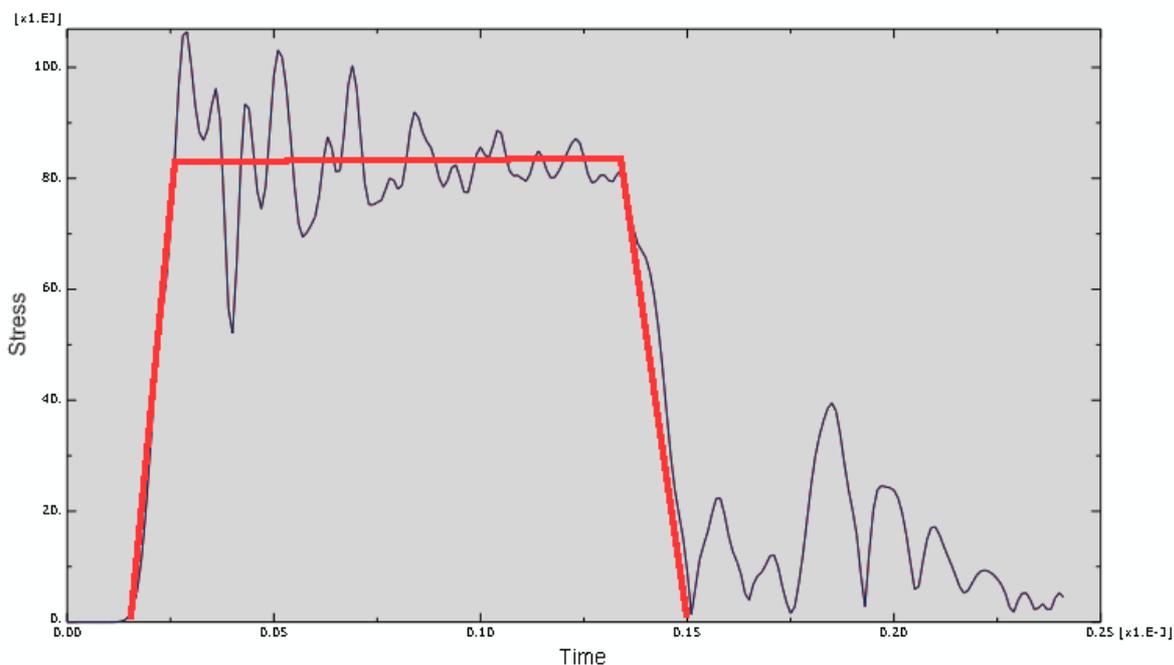


Figura 4.6 Interpolación valor máximo

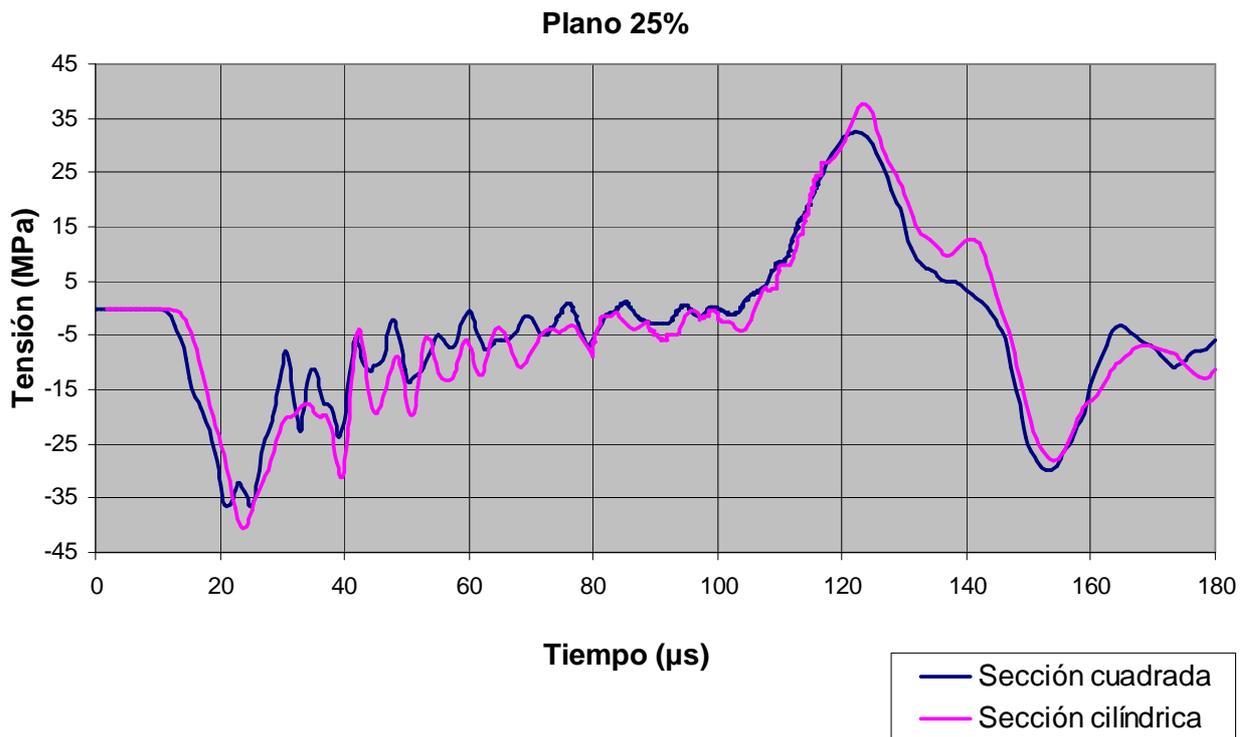


Figura 4.7 Comparación de la tensión σ_{11} en probetas de sección cuadrada y cilíndrica. Plano 25%

Como se puede observar en la Figura 4.7, el frente de ondas registrado en la probeta de sección cuadrada alcanza antes el plano de análisis y tiene una magnitud ligeramente inferior al registrado en la probeta de sección circular.

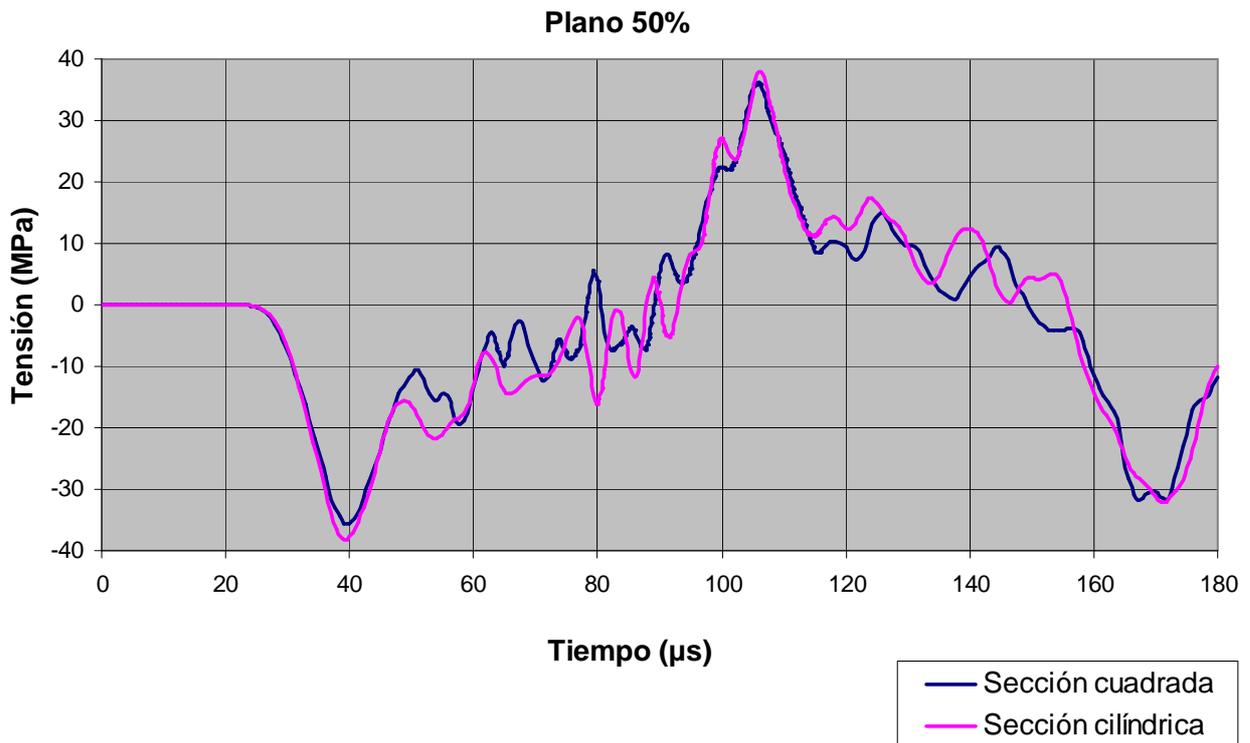


Figura 4.8 Comparación de la tensión σ_{11} en probetas de sección cuadrada y cilíndrica. Plano medio.

Posteriormente, en el plano medio de la probeta, dónde los frentes de ondas ya se han estabilizado, se observa cómo ambos pulsos coinciden en instante temporal pero el producido en la probeta de sección circular continúa siendo ligeramente superior, 38,1Mpa frente a 35,6MPa.

4.1.4 Conclusión

La fuerza generada en el impacto provoca una deformación en el flyer haciendo que éste “envuelva” a la probeta. Este efecto provoca que el centro del flyer deje de estar en contacto con el centro de la probeta, provocando un descenso de la tensión en este punto (elemento central). Del mismo modo, al combarse el flyer, las caras externas de la probeta se ven presionadas generando tensiones mayores en los elementos de las caras exteriores que en el elemento central. Además, esta deformación favorece a que las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieran valores importantes.

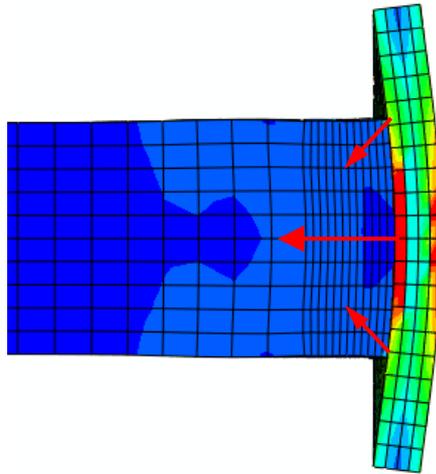


Figura 4.9 Deformación del flyer en el impacto

Por lo tanto, como las tensiones σ_{22} y σ_{33} tienen valores apreciables con respecto a los valores de σ_{11} , se incumple el criterio de propagación unidimensional de ondas. Y, como puede observarse en la Figura 4.3 y Figura 4.5, la tensión σ_{11} es mucho mayor en los elementos exteriores que en el elemento central, por lo que tampoco se cumple la condición de tensión plana.

Atendiendo a la comparación realizada entre ambos casos, se ha observado que la onda registrada en la probeta de sección circular es ligeramente superior y tiene cierto retraso temporal inicial con respecto a la registrada en la probeta cuadrada. Este hecho tiene su explicación en que el área de impacto ofrecida por la probeta cuadrada es mayor que la de la probeta cilíndrica, por lo que el efecto envolvente del flyer en este caso es mayor. Con la sección cuadrada el flyer sufre una deformación menor y, por tanto, una menor separación de su parte central con respecto a la parte central de la probeta mientras que en el caso de sección circular el flyer envuelve de manera más continua a la probeta sufriendo una mayor deformación y produciéndose una mayor separación de la parte central.

Debido a la deformación descrita, en el caso de sección cuadrada, los elementos de los cuatro vértices son los que mayor tensión reciben mientras que con sección cilíndrica son todos los elementos del perímetro los que mayor tensión reciben. Esto provoca que, en probetas de sección cilíndrica, la contribución de

la componente en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}) sea mayor haciendo mayor la resultante en dicha dirección y, por ello, el pulso registrado en este tipo de probetas es mayor.

En conclusión, la utilización de probetas de sección cuadrada provoca una deformación del flyer poco uniforme que transmite gran cantidad de energía sobre los vértices provocando una gran diferencia de tensiones entre estos elementos y los de la parte central. Además, estas probetas requieren flyers de mayor diámetro para asegurar el contacto total entre caras. Como consecuencia, un flyer de mayor diámetro tenderá más a combarse y aumentará el efecto envolvente, alejándose aún más de los resultados teóricos. Por todo ello, se puede determinar que las probetas cilíndricas mejoran la hipótesis de propagación unidimensional de ondas y, por tanto, son las más adecuadas para la realización de los ensayos Spalling.

4.2 Influencia del espesor del proyectil

Una vez seleccionada la sección cilíndrica de la probeta, se procede a estudiar la influencia del espesor del flyer en el ensayo. Este parámetro únicamente influye en la longitud del pulso, no en su magnitud.

4.2.1 Flyer 2mm

Con un flyer de 2mm se debe obtener un pulso de 0.8 μ s de longitud.

$$t_p = 2 \frac{L}{c} = 2 \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}}{5080 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \boxed{0.787 \mu\text{s}}$$

Probeta 100x \varnothing 10 mm. Flyer \varnothing 20x2mm

1. Plano de choque

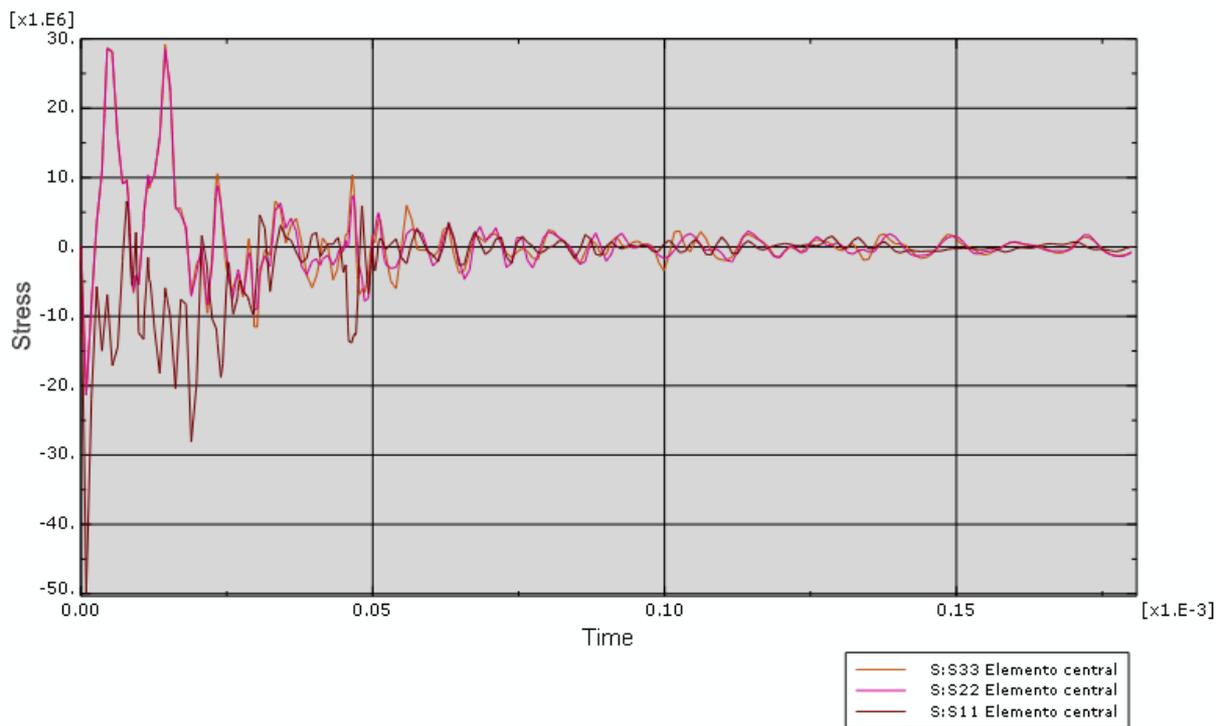


Figura 4.10 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

En la Figura 4.10 se observa que el impacto de un flyer de 2mm de espesor sobre una probeta de sección circular genera un pulso de magnitud y longitud diferentes a los teóricos. Esto se debe al efecto envolvente explicado

anteriormente que provoca que las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieran un valor importante haciendo que se reduzca el valor de la tensión en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}) y modificando la longitud del pulso.

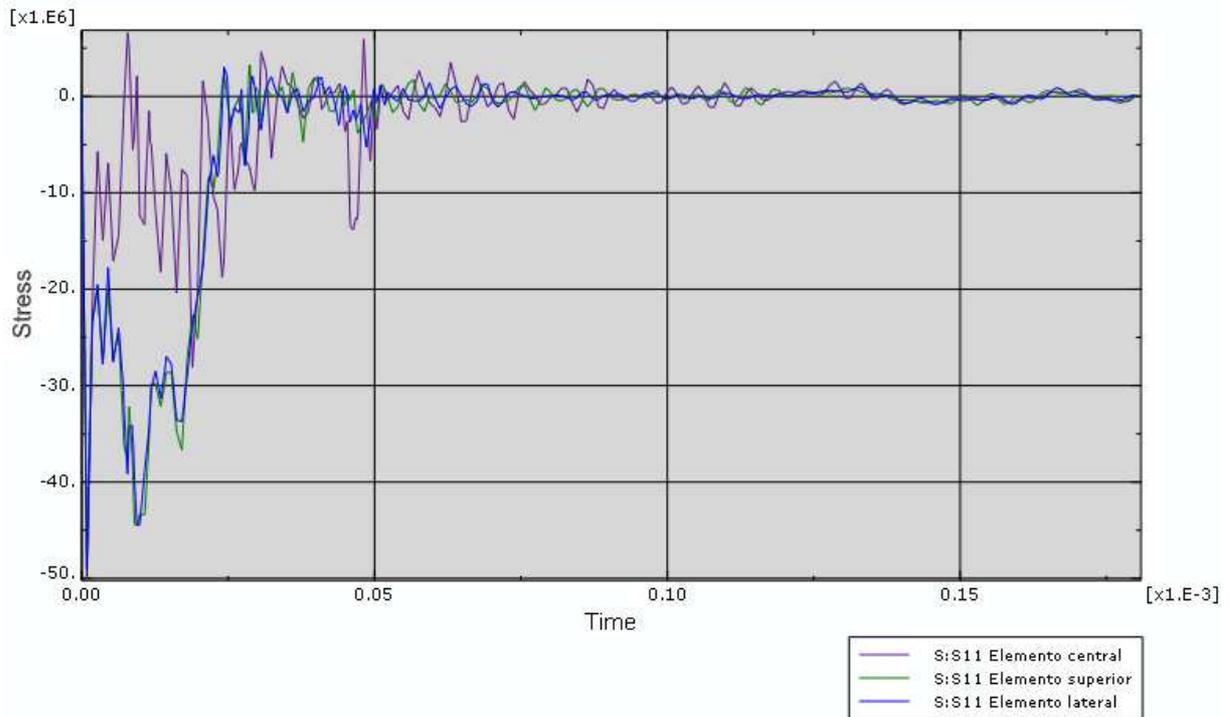


Figura 4.11 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Como puede observarse en la Figura 4.11, un flyer de 2mm produce un efecto envolvente importante, ya que la tensión a la que está sometido el elemento central es inferior a la de los elementos periféricos. Este hecho invalida el ensayo ya que una de las condiciones que se han de cumplir es la de “[tensión plana](#)”, que consiste en que todos los elementos del plano analizado estén sometidos a la misma tensión.

4.2.2 Flyer 5mm

Con un flyer de 5mm se debe obtener un pulso de 0,8 μ s de longitud.

$$t_p = 2 \frac{L}{c} = 2 \frac{5 \times 10^{-3} \text{ m}}{5080 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \boxed{1.96 \mu\text{s}}$$

Probeta 100xØ10 mm. Flyer Ø20x5mm

1. Plano de choque

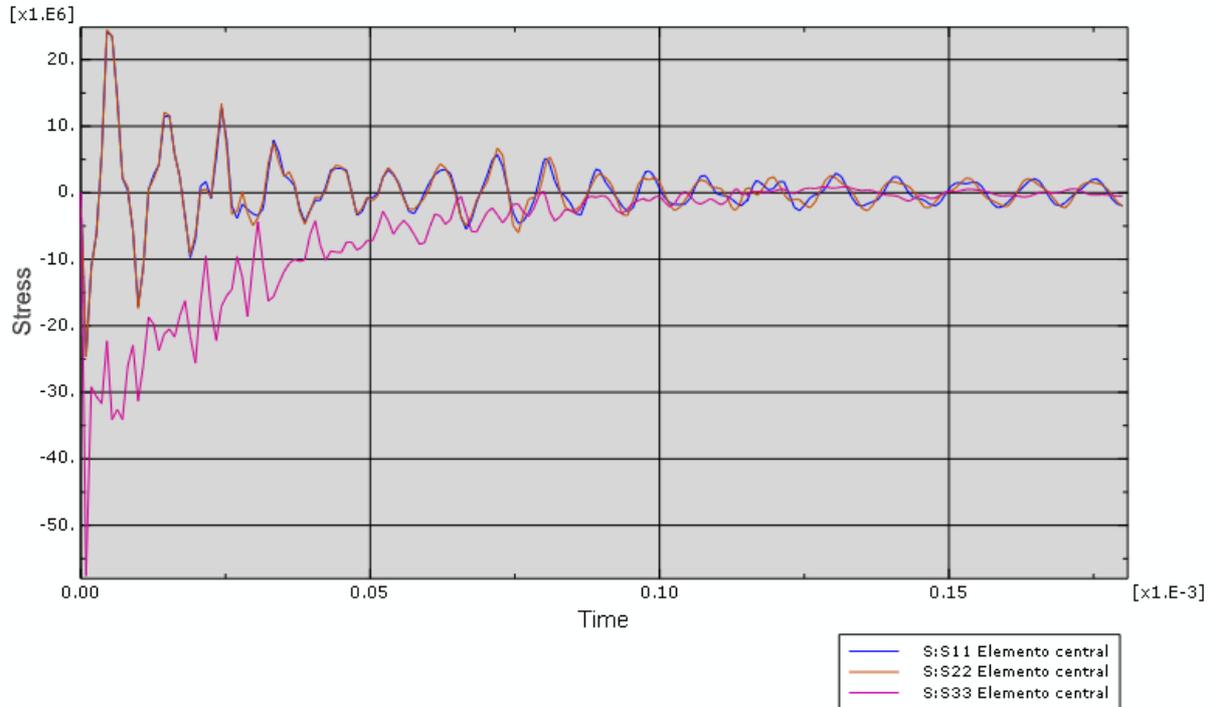


Figura 4.12 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

El impacto de un flyer de 5mm provoca una situación más similar a teórica. Como es de esperar, el flyer sufre cierta deformación por el impacto, por lo que en un instante inicial se producen tensiones todas las direcciones. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 4.12, la tensión en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}), tiene una mayor magnitud que en el caso anterior, mientras que las tensiones σ_{22} y σ_{33} se ven disminuidas, de lo que se deduce que el efecto envolvente que se produce es menor.

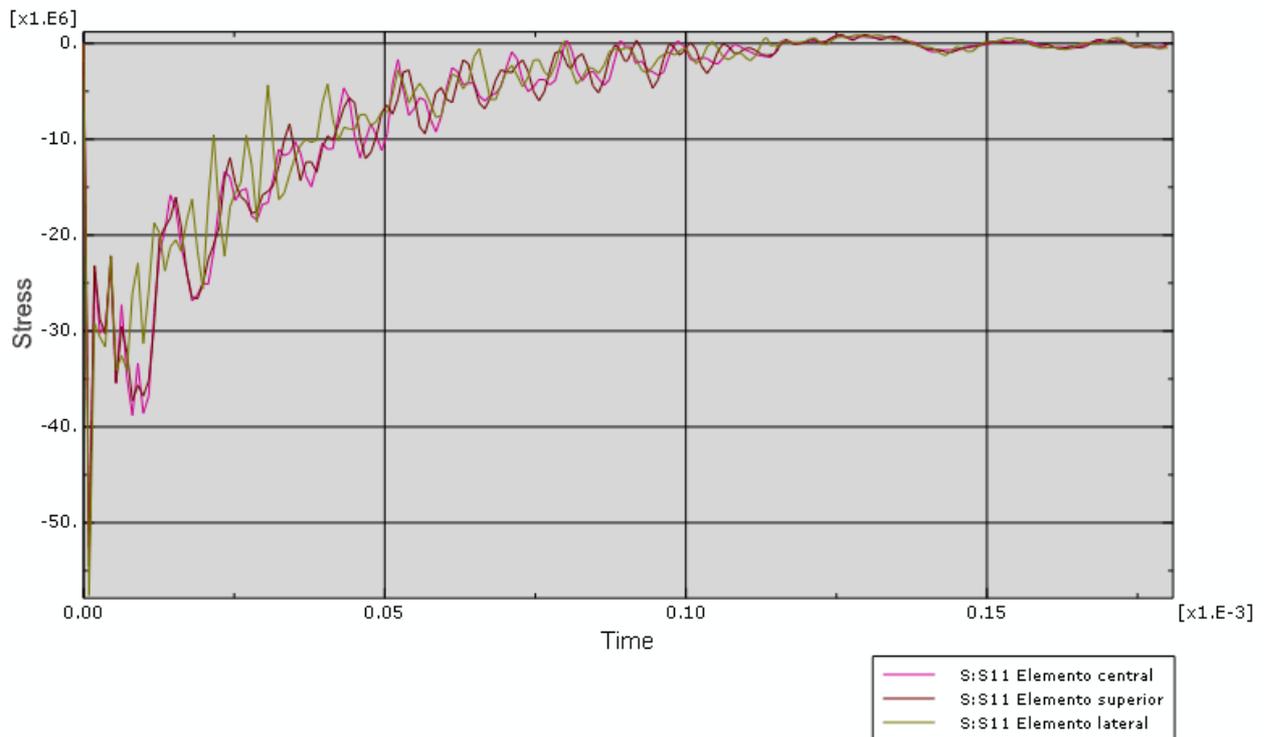


Figura 4.13 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Como se ha comentado en el caso anterior, una las condiciones que se deben de producir para que el ensayo resulte válido es que exista “[tensión plana](#)”, como puede observarse en la Figura 4.13 esta condición se cumple, por lo que se puede afirmar que el ensayo resulta válido con la utilización de un flyer de 5mm.

El valor medio de la tensión σ_{11} obtenido en este plano es de aproximadamente 31MPa mientras que el teórico es de 36,8MPa, esto se debe a que, aunque poco, existe una deformación del flyer que provoca tensiones σ_{22} y σ_{33} que hacen disminuir la tensión el valor de la tensión σ_{11} .

Ya que en este plano el ensayo cumple los [parámetros](#) necesarios para que el ensayo e considere válido, se va a realizar el análisis de los demás planos de la probeta para comprobar el comportamiento del pulso transmitido.

2. Plano al 25% de la longitud de la probeta

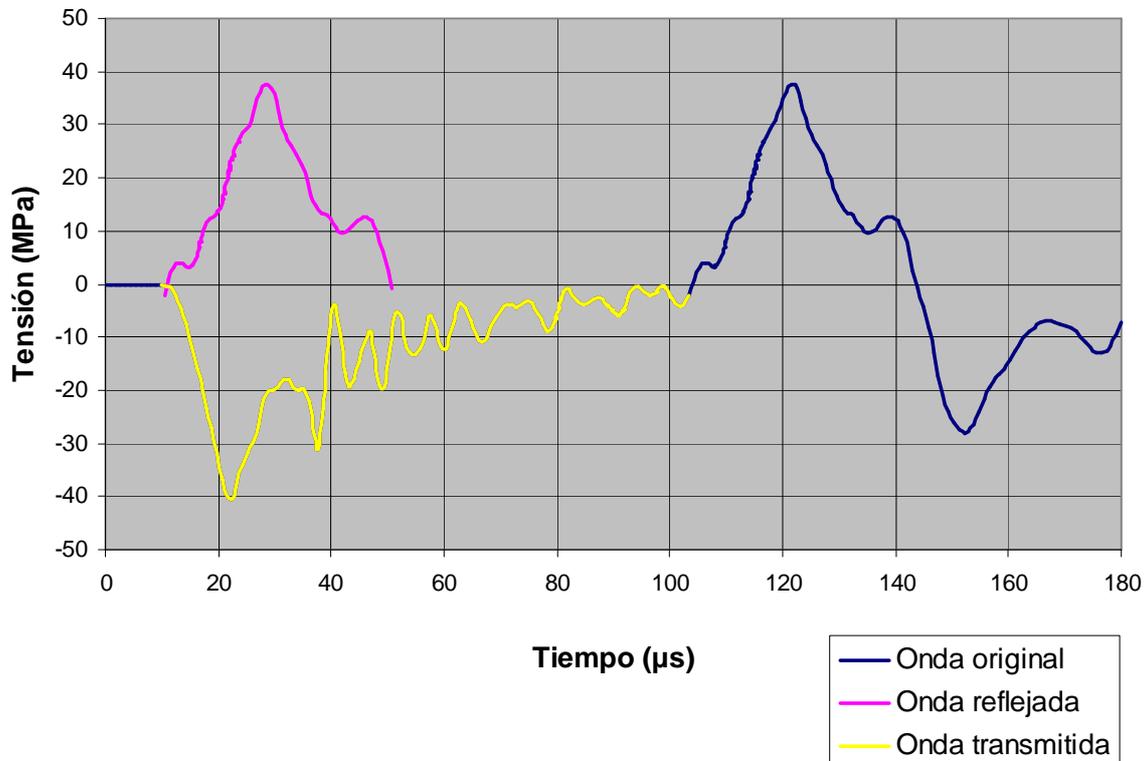


Figura 4.14 Tensión-Tiempo

La Figura 4.14 muestra en azul la **onda original**, que es la onda registrada en la probeta durante 180μs. Inicialmente tiene un tramo de tensión nula ya que aún no ha llegado a producirse el impacto entre el flyer y la probeta. Por otro lado, se ha resaltado en amarillo la parte de la onda original que va desde el instante en que se produce el impacto (11,7μ) hasta que llega al final de la probeta (donde la onda se reflejará), es decir, la **onda transmitida** por el impacto del flyer. Por último, la **onda reflejada**, es la parte positiva de la onda original ya que es el reflejo de la onda transmitida. Teóricamente la onda reflejada y transmitida deberían tener la misma magnitud y longitud, por ello, la onda reflejada se ha resaltado en rosa y se ha acoplado temporalmente con el inicio de la transmitida para poder comparar fácilmente tanto su magnitud como su longitud.

Como se puede observar, la onda transmitida tiene un pico máximo de compresión de 40MPa aproximadamente pero, como se ha mencionado

anteriormente, el valor máximo debe sacarse con una interpolación lineal, por lo que el valor máximo resulta ser de 36MPa, un valor muy próximo al teórico de 36,8MPa. Por su parte la onda reflejada tiene una magnitud muy similar a la transmitida, 36,3MPa, por lo que puede considerarse que se cumple la teoría.

En cuanto a la longitud de onda, la onda transmitida tiene una longitud muy superior a la teórica pero esta gráfica no es representativa ya que es un plano muy cercano al plano de impacto y la onda aún no se ha estabilizado.

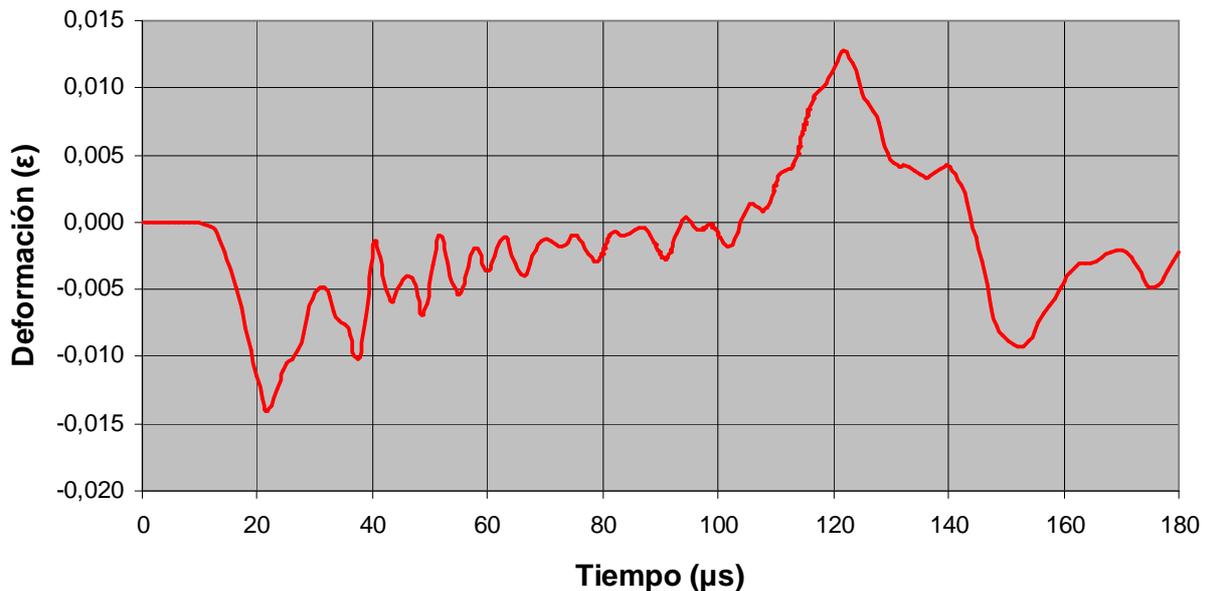


Figura 4.15 Deformación-Tiempo

La Figura 4.15 muestra las deformaciones que se producen en la probeta debido al impacto del flyer. Debe ser una gráfica análoga a la de tensiones ya en la simulación se ha definido el material como elástico lineal, por lo que el valor de las deformaciones resulta ser el resultado de dividir las tensiones entre el módulo elástico.

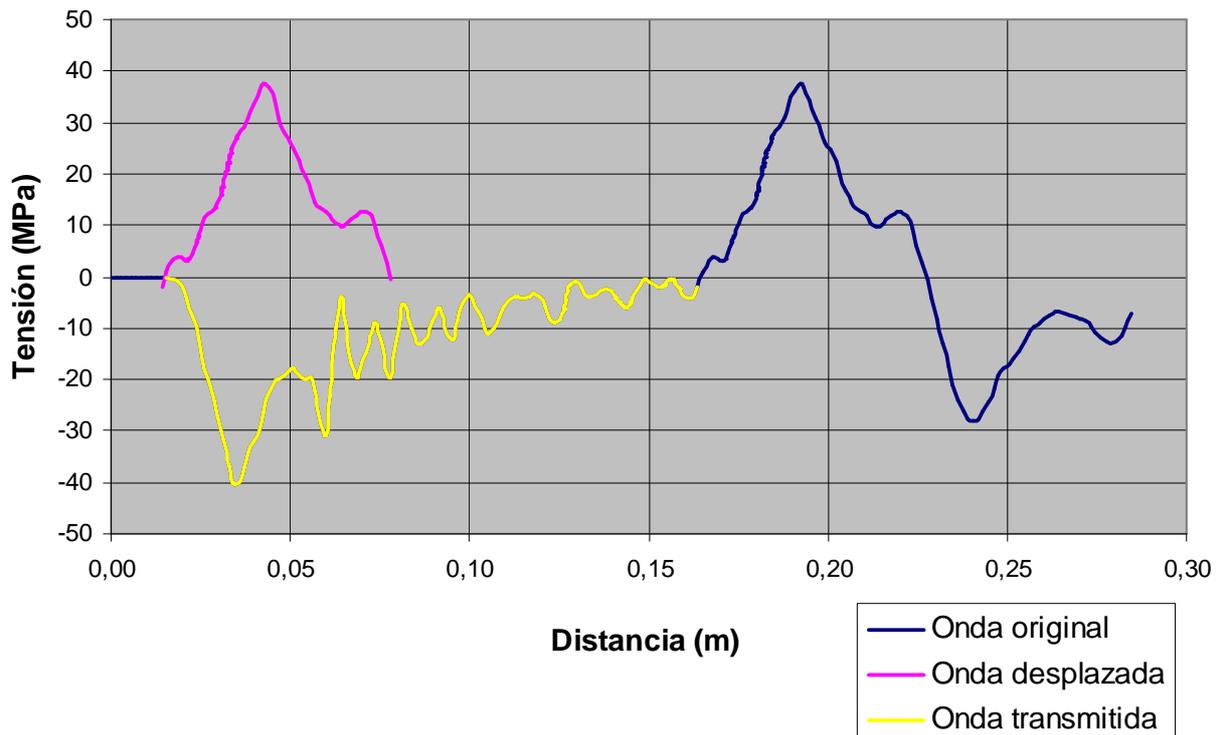


Figura 4.16 Tensión-Distancia

En la Figura 4.16, se compara la tensión producida en la probeta en función de la distancia al plano de choque. Igual que en la Figura 4.14 inicialmente la tensión es nula hasta que se produce el impacto a los 17 mm, por lo que la cara de impacto de la probeta se sitúa en este punto. Como puede observarse a los 117 mm comienza la onda reflejada, lo que resulta lógico ya que la probeta tiene una longitud de 100 mm.

Del mismo modo que en la gráfica Tensión-Tiempo, se ha acoplado la onda reflejada con la transmitida para poder compararlas mejor visualmente. Se observa una gran diferencia en cuanto a la longitud de la onda reflejada y transmitida debido a la inestabilidad ya mencionada.

Una comparación visual no es aceptable para determinar si las ondas pueden considerarse iguales, no se deben comparar la magnitud y longitud del pulso reflejado y transmitido, sino la cantidad de energía que posee cada uno. Existen diversos factores que pueden alterar la magnitud, longitud y forma del pulso, pero si la energía de ambas ondas es la misma, se cumple la teoría de propagación unidimensional de ondas.

Resultados finales

La energía que posee cada onda corresponde al área que forma la curva con el eje $Y=0$. Para calcular el área se ha utilizado el método de integración de mínimos cuadrados. La exactitud de este método depende del número de datos del que se disponga. En las simulaciones realizadas se tiene una cantidad de puntos adecuada como para que este método resulte válido, pero para absorber los posibles errores se ha determinado que si la diferencia entre áreas es menor del 10% de la mayor de ellas, se puede considerar que ambas curvas son iguales.

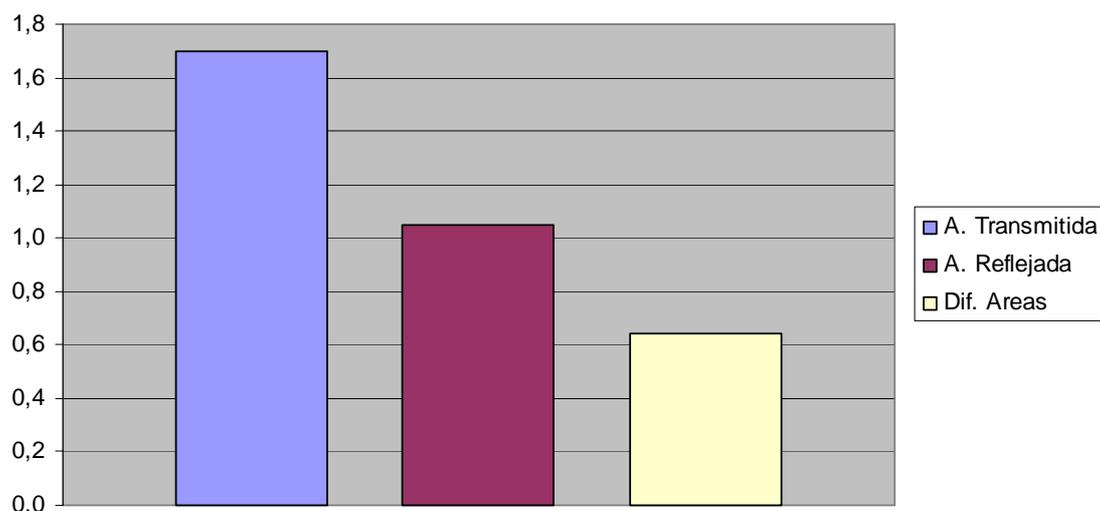


Figura 4.17 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
1,69 E+06	1,05 E+06	6,45 E+05	38

Aunque visualmente podía comprobarse que la diferencia de longitudes entre las ondas provocaba una gran diferencia entre sus áreas, era necesario hacer el cálculo matemático para determinar la diferencia. A la vista de los resultados obtenidos, no se puede considerar que las ondas sean iguales al ser su diferencia mayor del 10%. Sin embargo, en este plano, esta comprobación no es muy orientativa debido a que la onda aún no está estabilizada.

3. Plano medio (límite)

Se define como plano límite aquel a partir del cual se produce el cruce entre la onda transmitida y la reflejada y, por lo tanto, las medidas registradas estarían falseadas. En este caso, el plano medio resulta ser dicho plano.

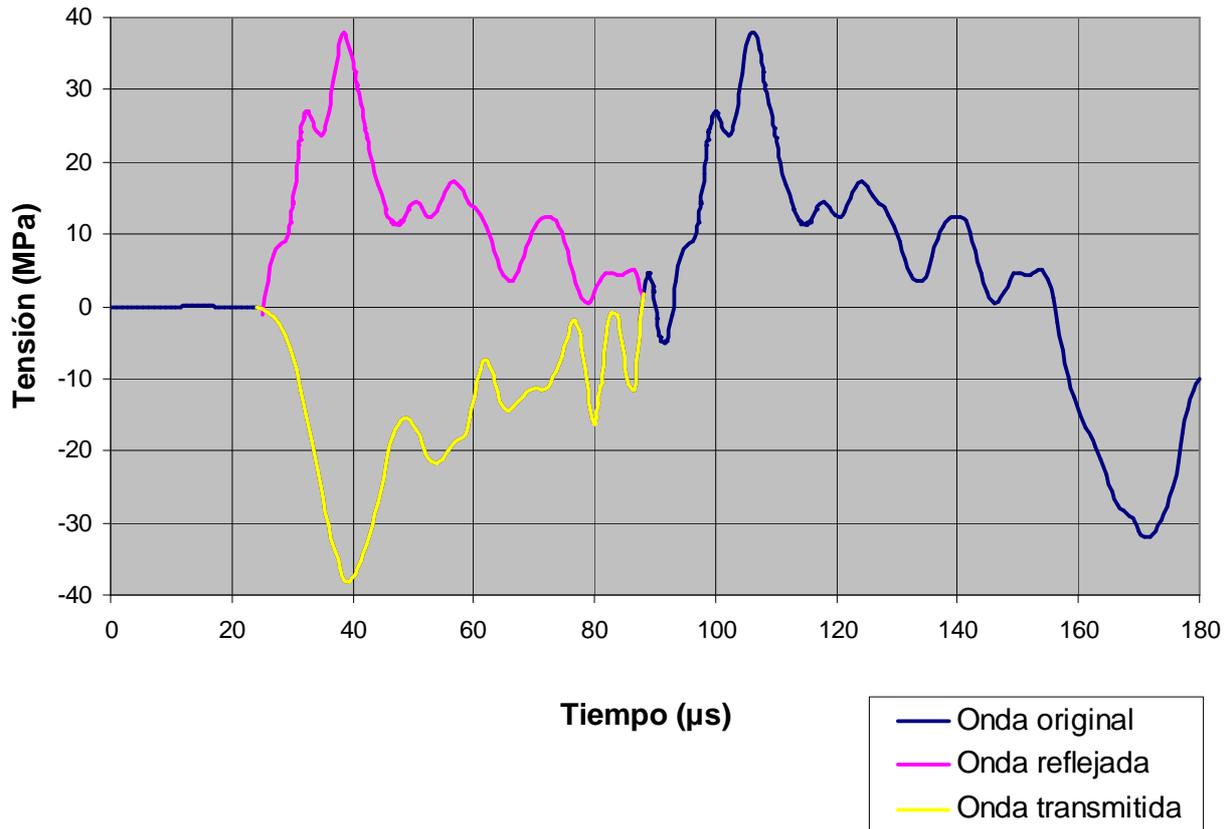


Figura 4.18 Tensión-Tiempo

La Figura 4.18 muestra una onda mucho más estable que la del plano anterior, manteniendo la misma magnitud de tensión. Sin embargo, aunque la longitud del pulso sigue siendo mucho mayor que la teórica (55µs aproximadamente), es muy inferior a la del plano anterior.

La diferencia existente entre la longitud empírica y la teórica se debe a que, mientras que en el caso teórico sólo existe tensión en la dirección longitudinal de la probeta, en la simulación aparece una importante presencia de tensiones σ_{22} y σ_{33} , cuya aportación en la dirección longitudinal de la probeta produce un aumento de la longitud del pulso.

Como puede observarse, el cruce de ondas está a punto de producirse ya que donde termina la onda transmitida prácticamente comienza la reflejada.

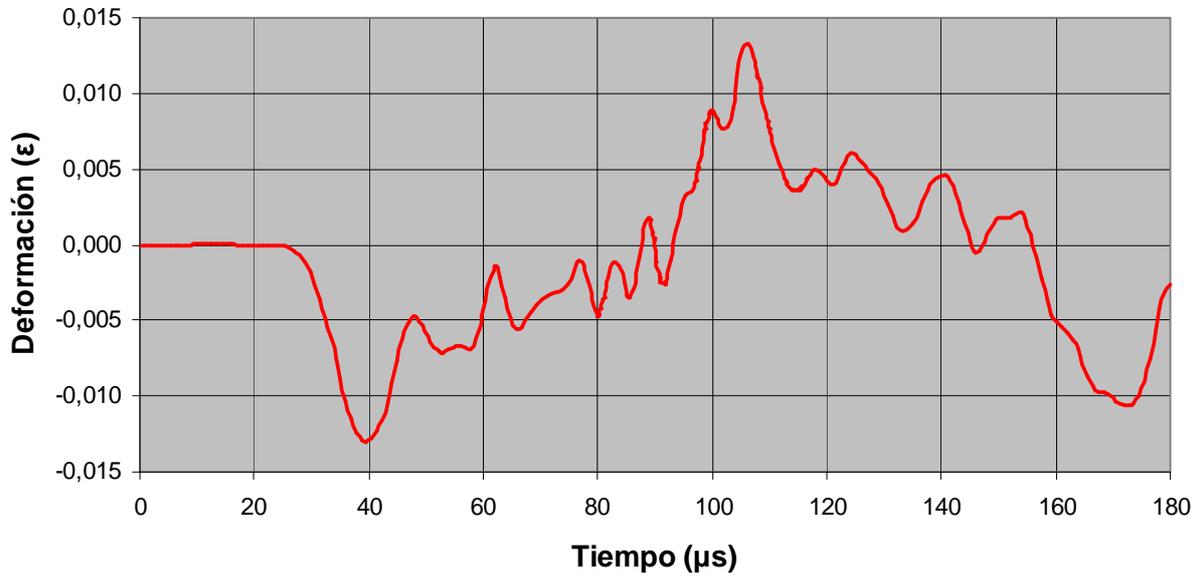


Figura 4.19 Deformación-Tiempo

Los mismos hechos de magnitud, longitud y cruce de ondas pueden comprobarse en la Figura 4.19 pero en términos de deformación.

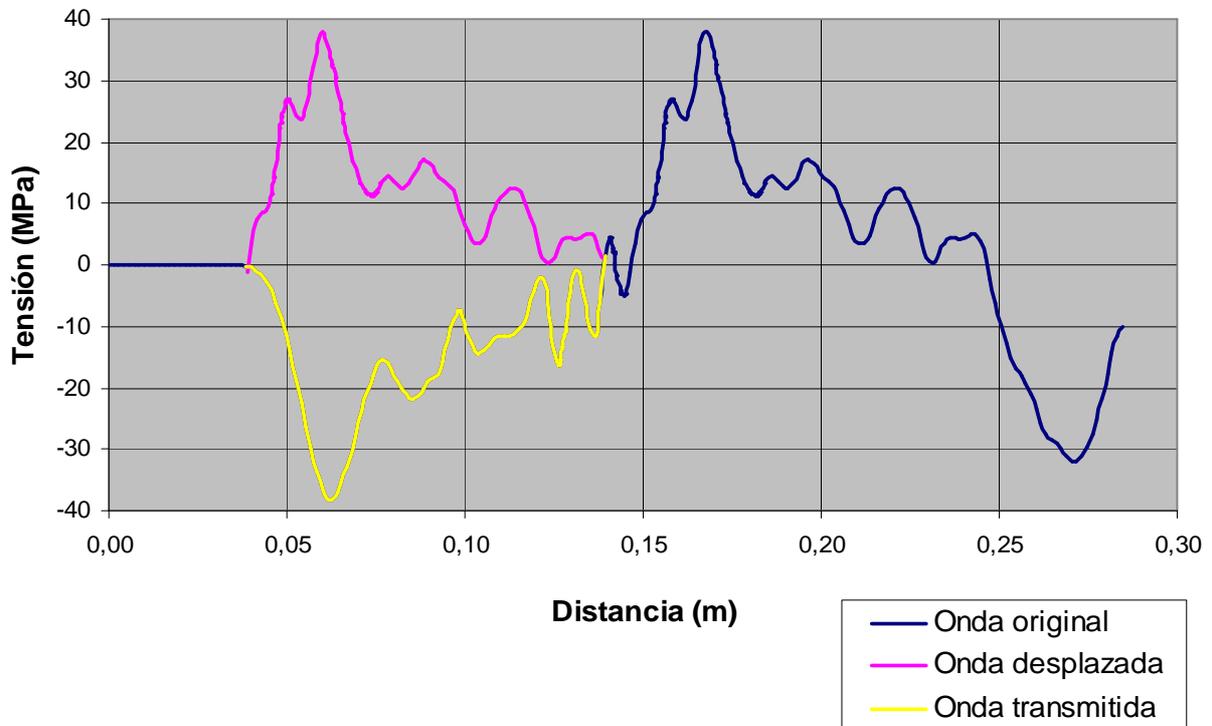


Figura 4.20 Tensión-Distancia

En la Figura 4.20, se muestran las ondas en relación a su distancia con el plano de impacto de la probeta. Además, se ha acoplado la onda transmitida con la reflejada para compararlas mejor visualmente y se observa que tanto la forma como la longitud de las ondas son muy similares. No obstante, para determinar si pueden considerarse iguales se ha de recurrir al cálculo de áreas.

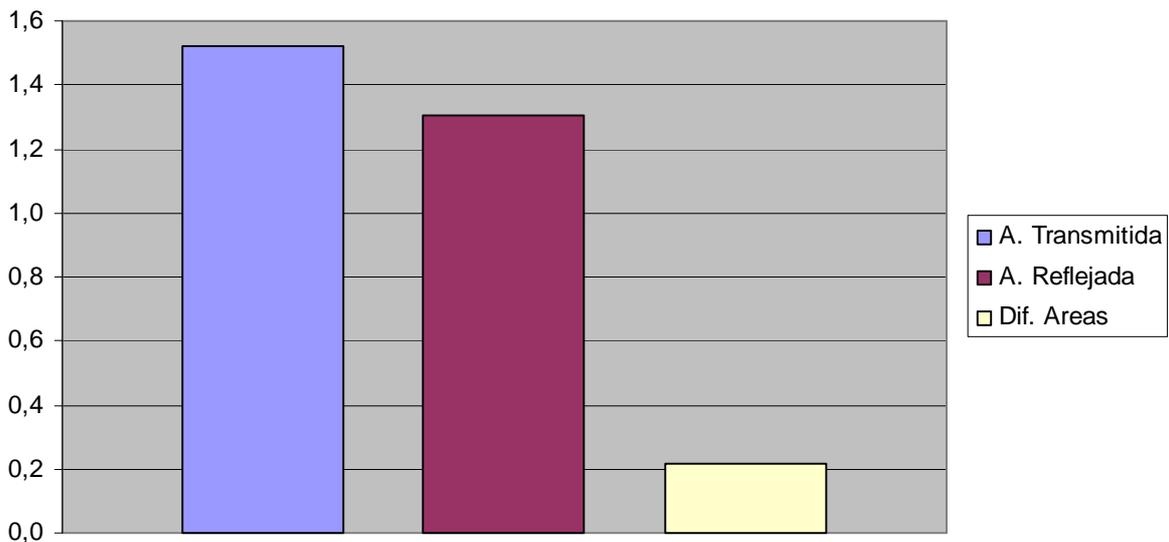


Figura 4.21 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
1,52 E+06	1,30 E+06	2,14 E+05	14,1

Aunque en la Figura 4.20 se comentaba que la forma y longitud de las ondas transmitida y reflejada eran muy similares, los resultados obtenidos del cálculo de áreas desvelan que no se pueden considerar iguales ya que su diferencia de áreas es mayor del 10%.

4. Plano al 75% de la longitud de la probeta

Debido a que el plano anterior se sabe que era el plano límite, los datos registrados en este plano estarán falseados debido al cruce de ondas. No

obstante, se va a realizar el análisis para visualizar el comportamiento de la onda.

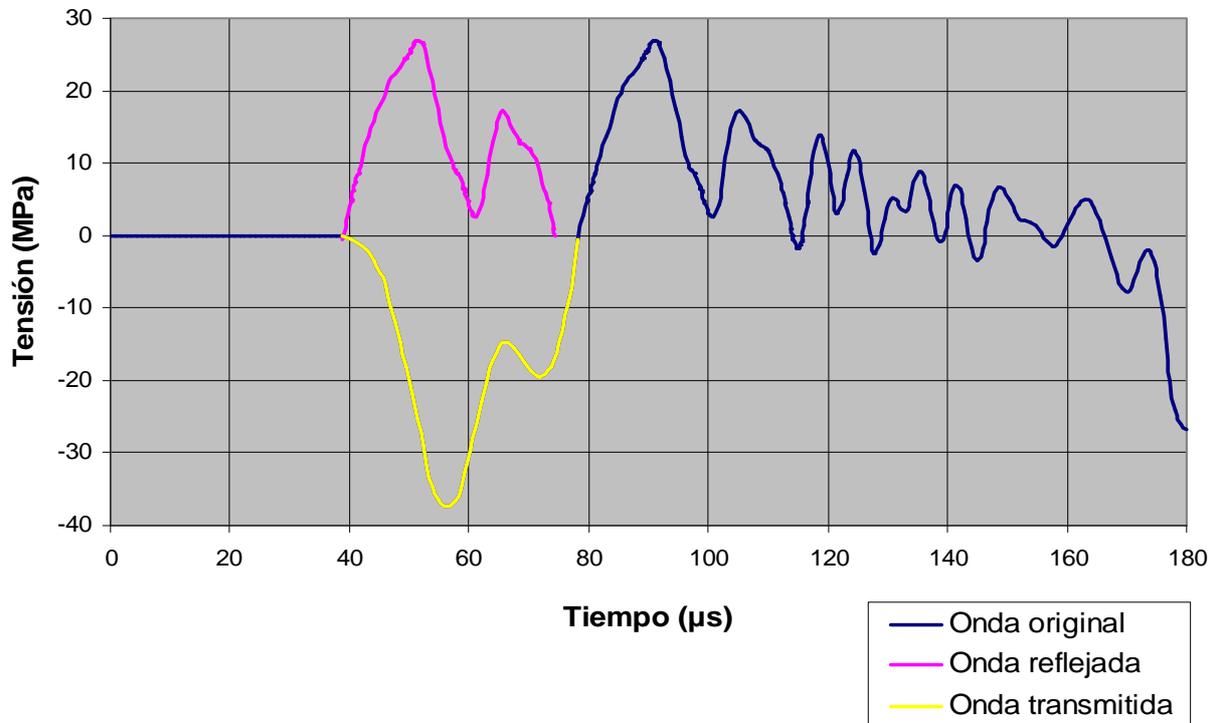


Figura 4.22 Tensión-Tiempo

La Figura 4.22 evidencia los efectos del cruce de ondas, se aprecia una disminución considerable en la magnitud de la tensión de la onda reflejada (de 35MPa a 26,5MPa) así como una reducción en las longitudes de ambas ondas (de 62µs a 39µs) debido a la anulación que se producen entre ellas al ser de signos opuestos.

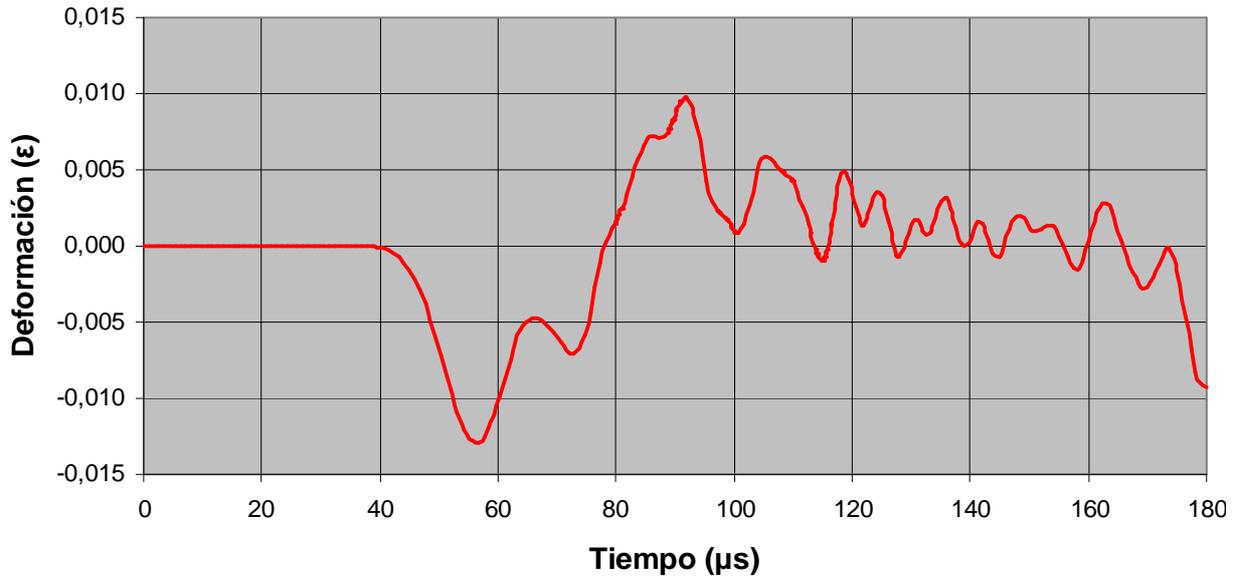


Figura 4.23 Deformación-Tiempo

También pueden comprobarse los efectos del cruce de ondas en la gráfica Deformación-Tiempo.

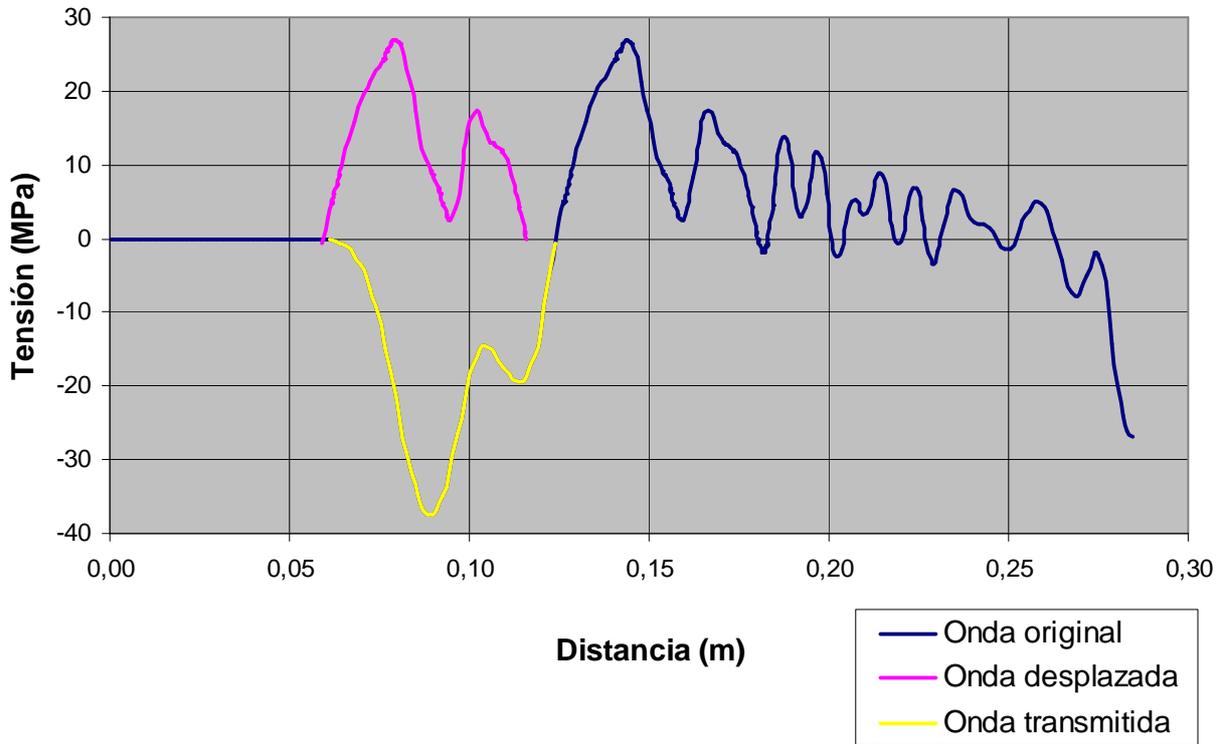


Figura 4.24 Tensión-Distancia

En la Figura 4.24 se han acoplado las ondas para poder realizar una mejor comparación visual entre ellas pero, como siempre, se ha de comprobar su igualdad con el cálculo de áreas.

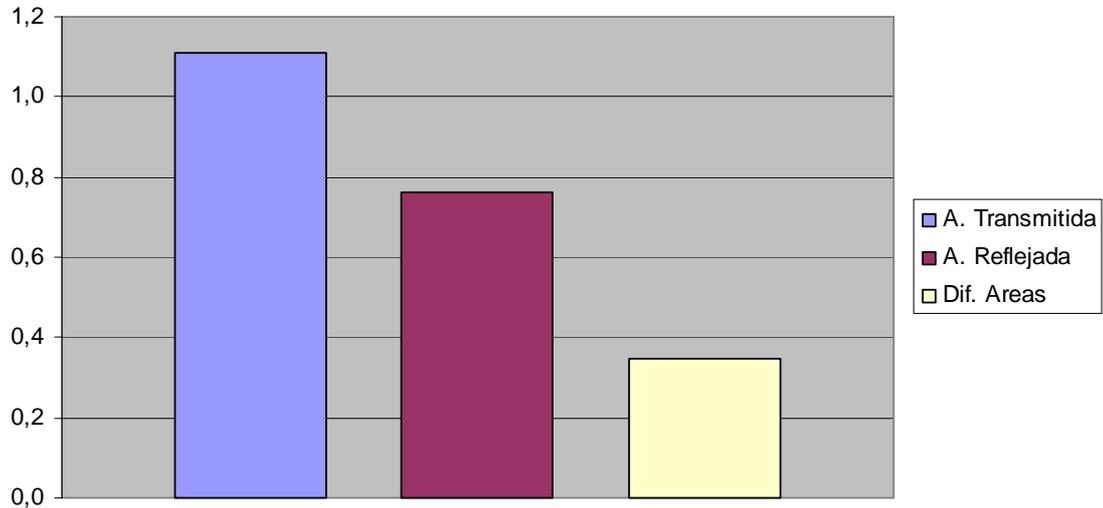


Figura 4.25 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
1,11 E+06	7,63 E+05	3,46 E+05	31,2

A la vista de los resultados, no se puede considerar que las ondas sean iguales al ser su diferencia mayor del 10%.

4.2.3 Comparación del espesor del proyectil

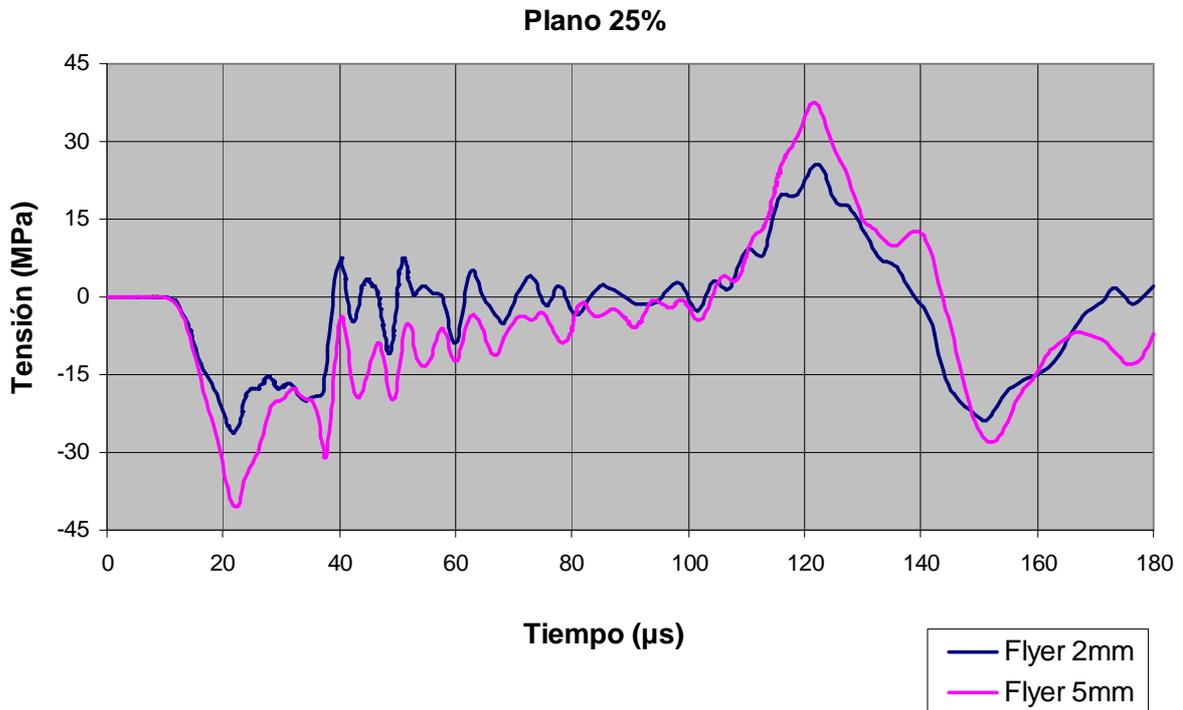


Figura 4.26 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de 2 y 5mm. Plano 25%

La Figura 4.26 representa la tensión en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}) que transmite el impacto de los flyers de 2 y 5mm de espesor. Aunque este plano no es el más adecuado para realizar una comparación ya que la onda aún no está estabilizada, se muestra esta gráfica comparativa para poder visualizar la evolución que sufre cada onda en relación al plano de la probeta que se analice.

Como se puede observar, un flyer de 5mm de espesor transmite una onda de mayor magnitud, esto se debe a que, al deformarse menos que un flyer de 2mm, el efecto envolvente ya comentado es menor y, por tanto, las tensiones σ_{22} y σ_{33} que se producen son menores aumentando el valor de σ_{11} .

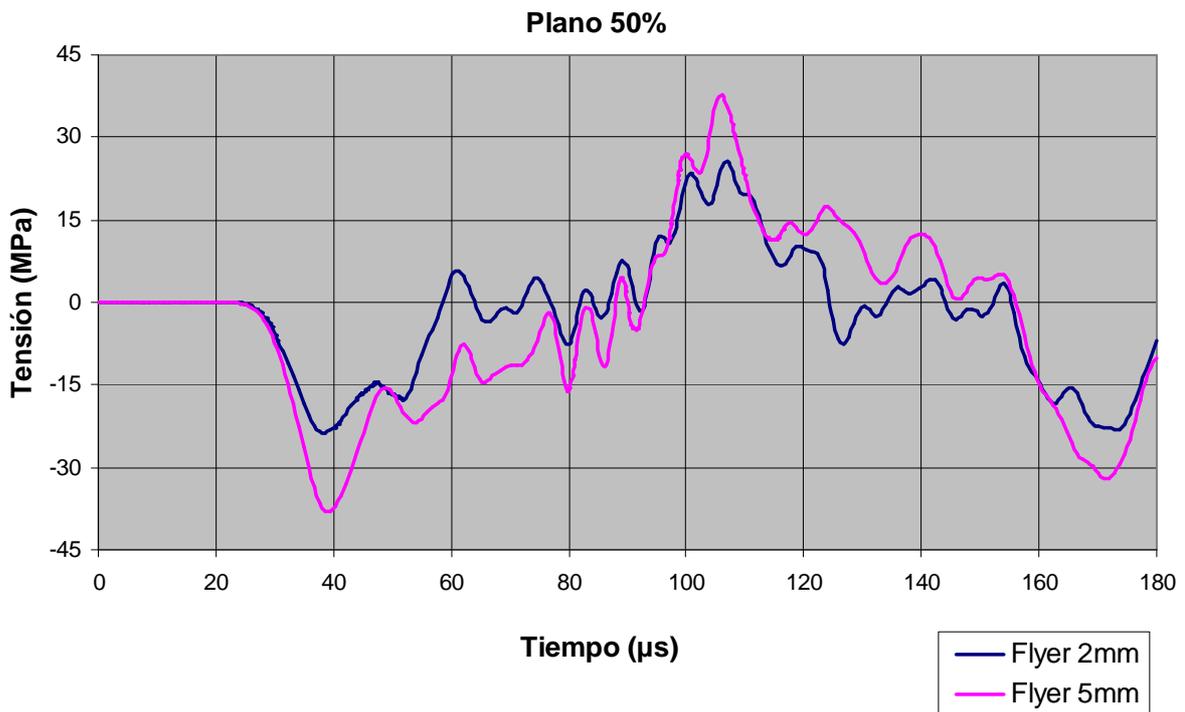


Figura 4.27 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de 2 y 5mm. Plano medio.

La Figura 4.27 muestra la tensión σ_{11} que transmite cada flyer pero en el plano medio de la probeta, un plano más avanzado dónde la onda ya es estable. Como se puede observar la magnitud de las ondas se mantiene constante con respecto al plano anterior mientras que las longitudes se ven reducidas debido a la estabilización de las ondas.

A la vista de los resultados obtenidos se puede determinar que un flyer de 5mm, al deformarse menos, reduce el efecto envolvente y produce una onda de magnitud muy similar a la teórica. Sin embargo, también produce una onda de mayor longitud que tarda más en estabilizarse y se aleja más de los datos teóricos.

4.2.4 Conclusión

Como se ha podido comprobar en las gráficas anteriores, un flyer de 5mm de espesor transmite una onda de magnitud casi idéntica a la teórica ya que se reduce el efecto envolvente durante el impacto, por el contrario, el aumentar el

espesor del flyer también aumenta la longitud de la onda transmitida (ver ecuación (2.9)).

Se ha de aclarar que nunca se alcanzarán los valores teóricos de longitud de onda debido a que en la realidad, por muy pequeña que sea, siempre existirá cierta deformación del flyer provocando que existan tensiones σ_{22} y σ_{33} , tensiones que no se tienen en cuenta en la teoría y que provocan un aumento de la longitud de onda.

En la comparación realizada entre las curvas transmitidas por flyers de 2 y 5mm, se ha podido observar como un flyer de menor espesor produce ondas más estables que tienen longitudes más próximas a las teóricas. Por lo tanto, la solución ideal pasaría por utilizar flyers de pequeño espesor que sufrieran deformaciones muy bajas durante el impacto, así se obtendrían ondas más estables al ser flyers delgados y de una magnitud muy similar a la teórica ya que se reduciría la influencia del efecto envolvente.

Las posibles soluciones que cumplen estos requisitos son:

- Utilizar **flyer de material más resistente**, como por ejemplo el acero. Al ser un material más resistente se reduciría la deformación de éste durante el impacto, disminuyendo así la importancia del efecto.
- Utilizar un **flyer de la misma sección que la probeta**. Si la sección del flyer no es más grande que la de la probeta, no se produciría el efecto envolvente. El inconveniente de esta solución es que no puede haber ningún tipo de desalineamiento durante el impacto ya que si no habría zonas de la probeta que no recibirían el impacto.

Por lo tanto, primero se analizará la solución de utilizar flyers de $\text{Ø}20 \times 2\text{mm}$ de acero para intentar llegar a una solución válida ya que la modificación de éste parámetro es menos problemática que la otra.

4.3 Influencia del material del proyectil

4.3.1 Flyer de aluminio Ø20x2mm

Esta caso coincide con el del apartado 4.2.1 donde se ha comprobado que un flyer de aluminio de 2mm de espesor inválida el ensayo.

1. Plano de choque

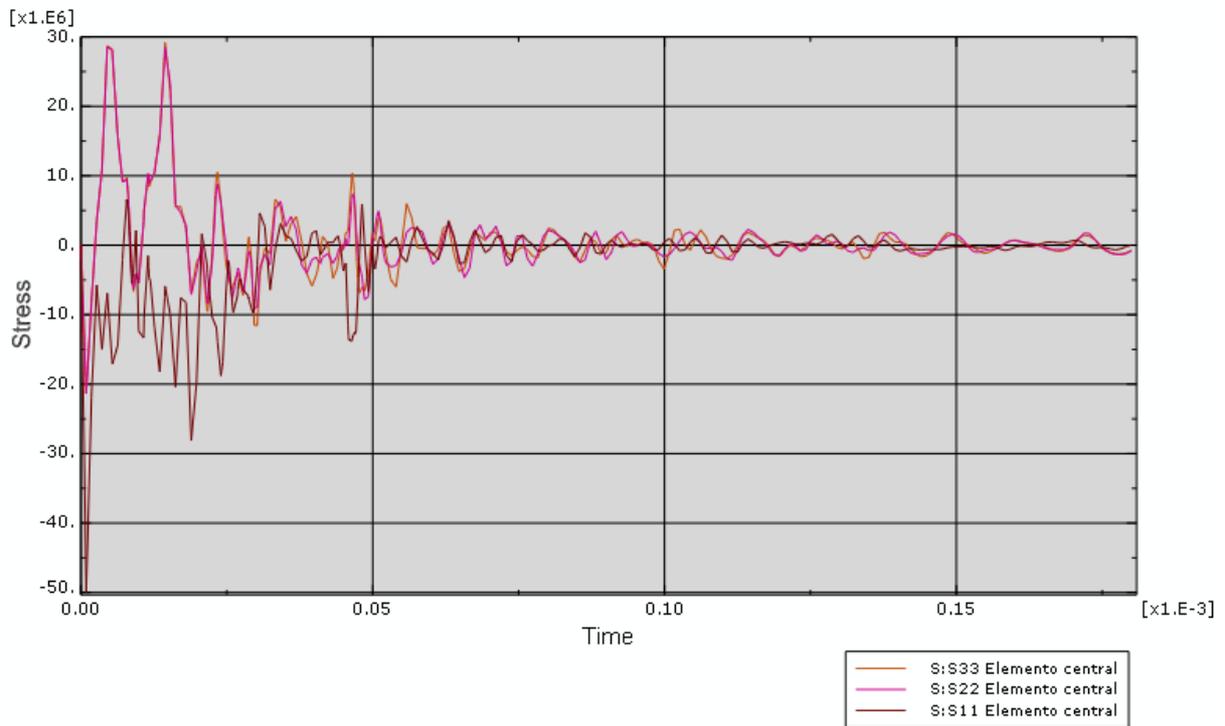


Figura 4.28 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Se observa que un flyer de aluminio de 2mm de espesor sufre una gran deformación en el impacto produciéndose el efecto envolvente ya descrito.

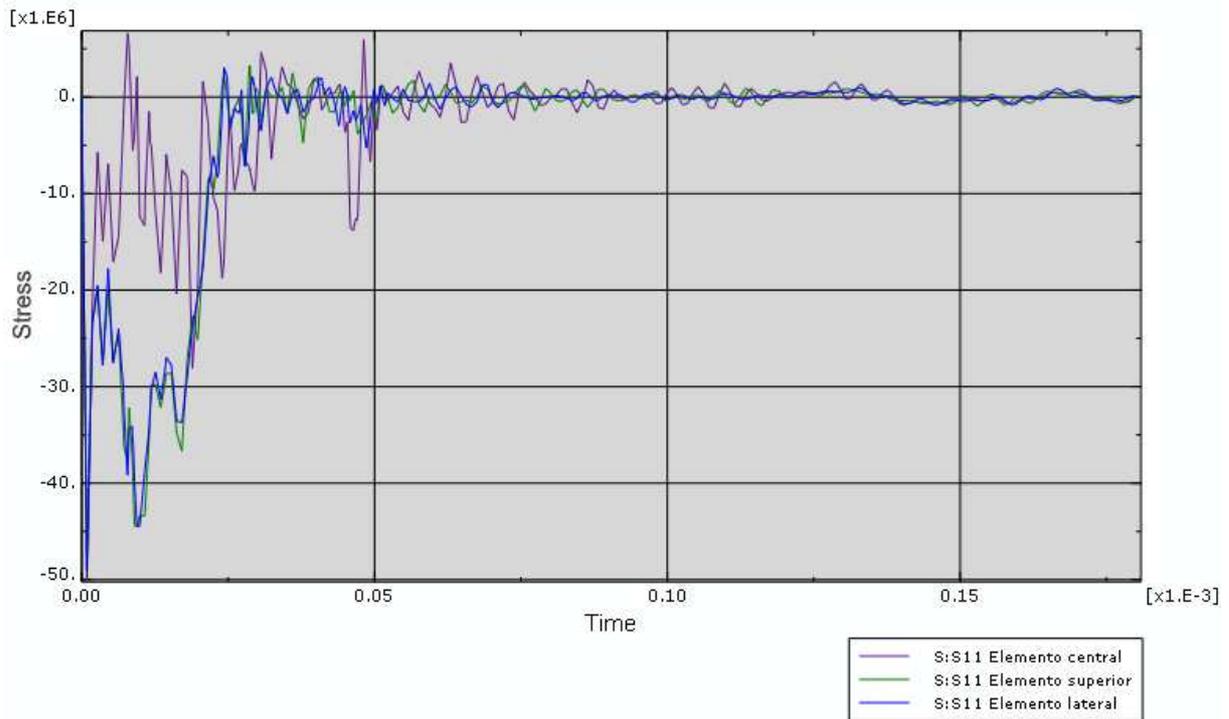


Figura 4.29 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Como ya se ha comentado, el efecto envolvente invalida el ensayo ya que una de las condiciones que se han de cumplir es la de “[tensión plana](#)” y, si se da este fenómeno, la condición no se cumple.

4.3.2 Flyer de acero Ø20x2mm

En este caso, al ser el flyer de acero, tanto la tensión incidente como el coeficiente de transmisión varían ya que la densidad y la velocidad de propagación de ondas del acero son diferentes que las del aluminio.

La tensión incidente (σ_I) será:

$$\sigma_I = \pm \rho_{Acero} \cdot C_{Acero} \cdot \frac{V_{IMPACTO}}{2} = 7800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5188 \frac{m}{s} \cdot \frac{20}{2} \frac{m}{s} = \boxed{404.66MPa}$$

Y la tensión transmitida (σ_T):

$$C_T = \frac{2A_1\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} = \frac{2 \cdot 190 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{190 \times 10^{-6} \cdot 7800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 5188 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 39.3 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.093$$

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.093 \cdot 404.66 \text{MPa} = \boxed{37.5 \text{MPa}}$$

$$t_p = 2 \frac{L}{c} = 2 \frac{2 \times 10^{-3} \text{m}}{5188 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \boxed{0.77 \mu\text{s}}$$

1. Plano de choque

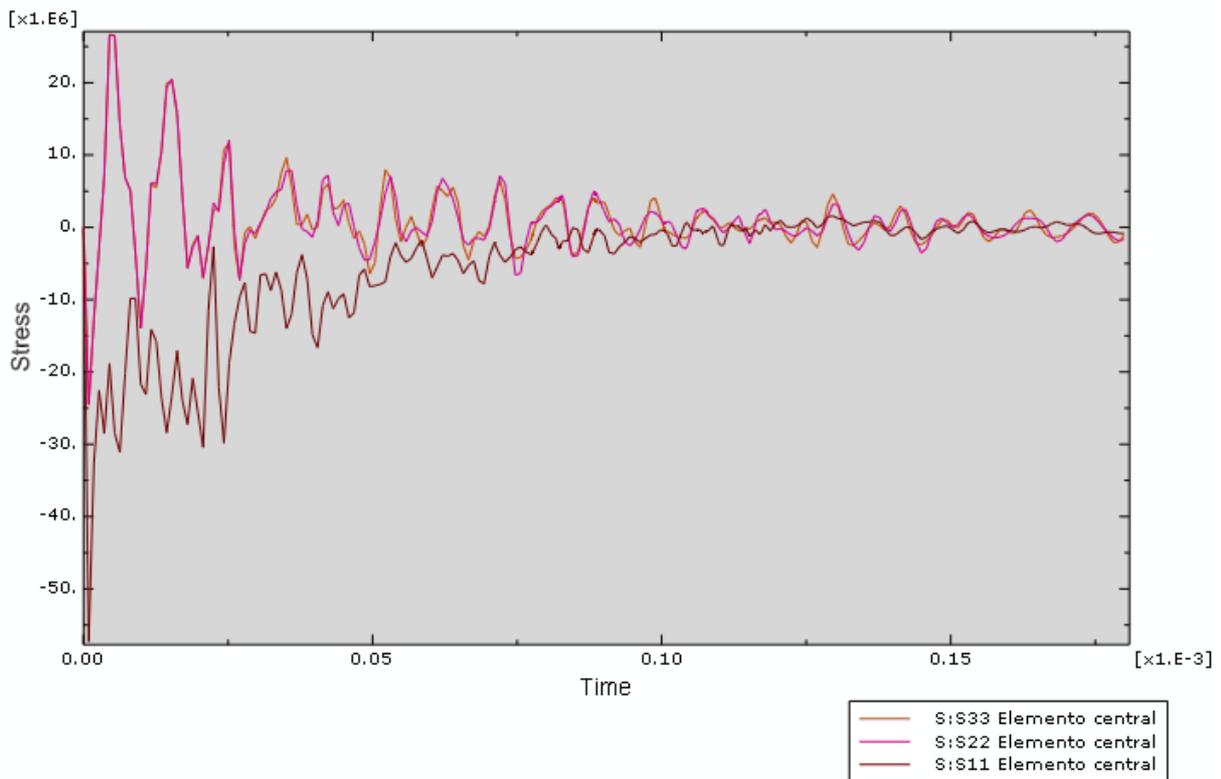


Figura 4.30 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Al utilizarse un flyer de material más resistente que el aluminio, se esperaba que la deformación sufrida por éste fuera lo suficientemente pequeña como para poder considerar que en el ensayo se daba propagación unidimensional. Sin embargo, como muestra la Figura 4.30, esto no sucede.

Aunque bien es cierto que la deformación sufrida por el flyer de acero es mucho menor que la del de aluminio, sigue produciéndose en una magnitud tal que hace que la tensión σ_{11} diste mucho de la teórica y las tensiones σ_{22} y σ_{33} tengan importancia, invalidando la hipótesis de propagación unidimensional. Esto puede comprobarse en la gráfica, donde la tensión media σ_{11} es de 26MPa mientras que la teórica es de 37,5MPa.

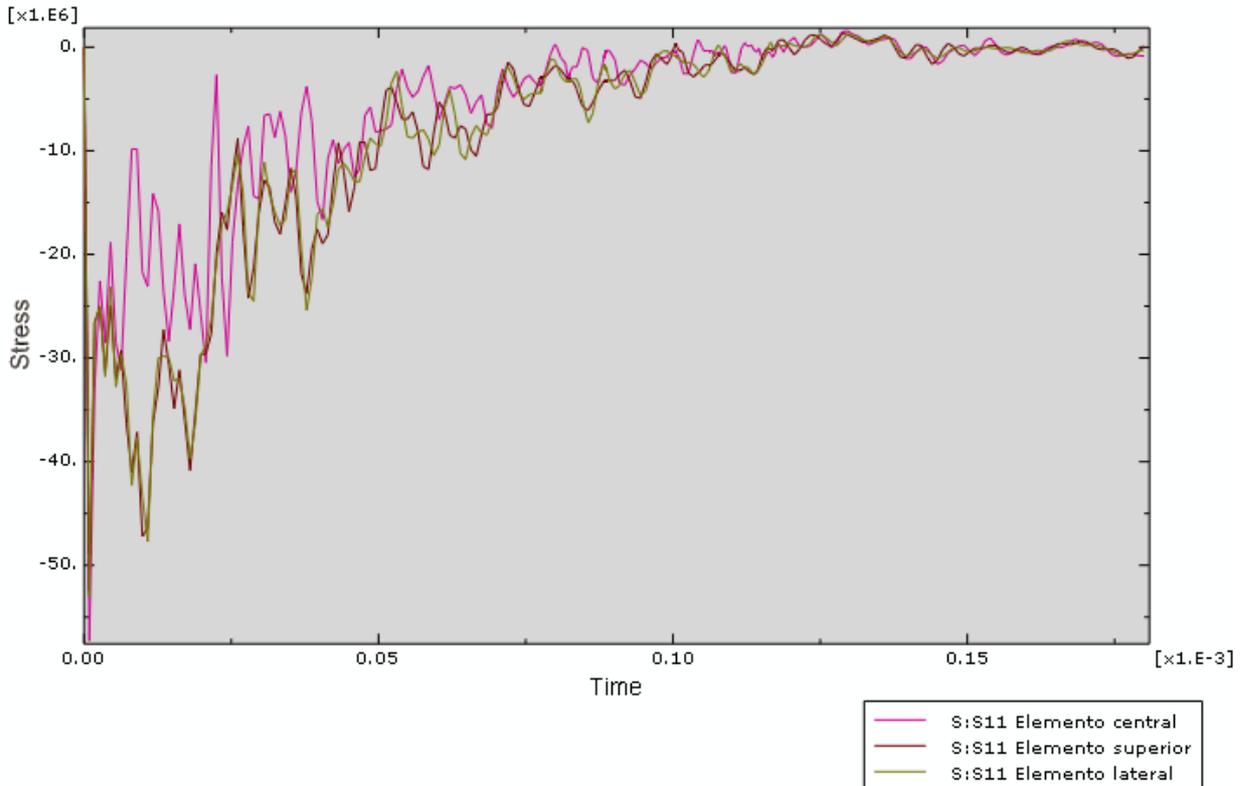


Figura 4.31 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Del mismo modo, en la Figura 4.31, se puede observar como la tensión σ_{11} en el elemento central es inferior a la de los otros elementos, lo que esto significa que se produce un importante efecto envolvente también en este caso.

4.3.3 Comparación material del proyectil

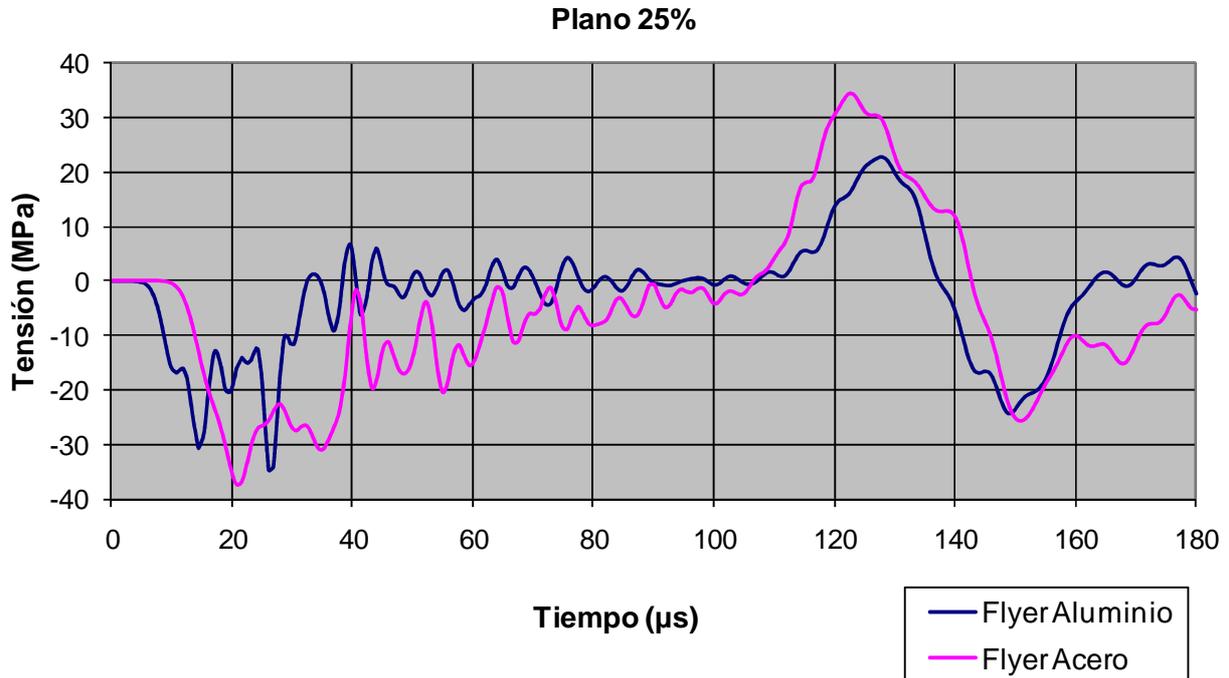


Figura 4.32 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de aluminio y acero de 2mm. Plano 25%

Como ya se ha mencionado anteriormente, este no es el mejor plano para realizar comparaciones ya que es un plano muy próximo al plano de choque y la onda no está estabilizada. Sin embargo, se muestra para ver la evolución que sufre cada onda.

Como se puede observar, ambas ondas tienen un perfil muy similar. Sin embargo, la onda generada por el flyer de acero tiene una magnitud mayor, lo que evidencia la reducción de la deformación sufrida por éste en el impacto y, por tanto, la reducción del efecto envolvente. La longitud de las ondas no se puede valorar en este plano por no estar aún estabilizadas.

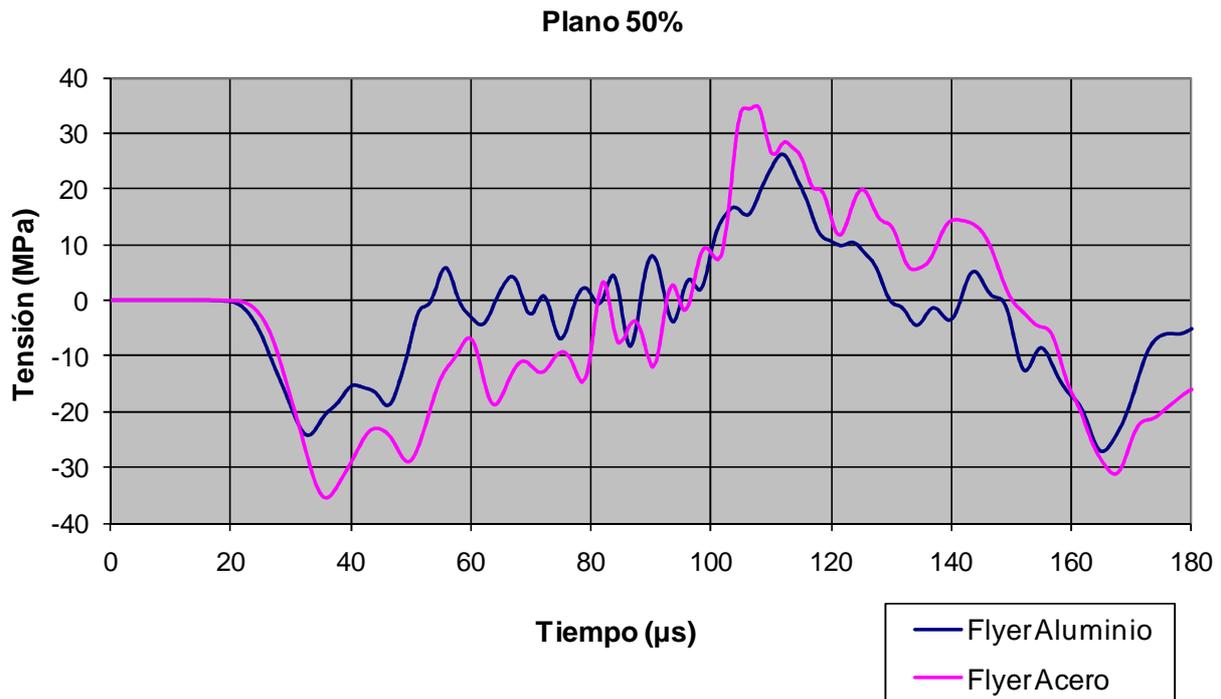


Figura 4.33 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de aluminio y acero de 2mm. Plano 50%

En este plano, donde la onda ya está más estabilizada, se puede observar como la longitud de la onda generada por el flyer de acero es mayor que la del de aluminio. Esto se debe a que, como puede observar en las gráficas de cada uno de los casos, el impacto del flyer de acero aumenta el valor de σ_{11} , pero también el de las tensiones σ_{22} y σ_{33} , lo que provoca un aumento de la longitud de onda.

4.3.4 Conclusión

La utilización del acero no ha mejorado el resultado del ensayo como se esperaba. Al igual que ocurría en el caso de probetas de aluminio, el flyer de acero también sufre una importante deformación y se produce un efecto envolvente que evita que se dé la condición de tensión plana invalidando así la hipótesis de propagación unidimensional.

Sin embargo, como era de esperar, el flyer de acero sufre una menor deformación mejorando así los resultados de tensión obtenidos:

	σ_{11} (MPa) Elemento Central	σ_{11} (MPa) Teórica	Desviación (%)
Flyer Aluminio	23	36,8	37,5
Flyer Acero	32,8	37,5	12,5

Tabla 4.1 Comparación de la tensión σ_{11} del elemento central de cada caso con su teórica

En la Tabla 4.1 se muestran los valores de tensión σ_{11} en el elemento central en ambos casos (flyer de aluminio y de acero) y cada uno se compara con su valor teórico. Como se puede observar la desviación sufrida en el ensayo con flyer de acero es muy inferior a la del de aluminio.

A la vista de los resultados obtenidos se puede afirmar que utilizar un flyer de acero ofrece una notable mejora, pero la utilización de un espesor tan pequeño hace imposible obtener ensayos válidos. Para poder conseguir ensayos válidos, las soluciones que se proponen son las siguientes:

- **Aumentar el espesor del flyer.** Bien aumentar ligeramente el espesor de un flyer de acero, ya que se ha comprobado la casi validez del ensayo con este material. O bien, aumentar el espesor de un flyer de aluminio que, como es de esperar, para conseguir un ensayo válido será necesario aumentar más el espesor que en el caso del acero.
- Utilizar un **flyer de la misma sección que la probeta.** Si la sección del flyer no es más grande que la de la probeta, no se produciría el efecto envolvente. El inconveniente de esta solución es que no puede haber ningún tipo de desalineamiento durante el impacto ya que si no habría zonas de la probeta que no recibirían el impacto.

Como ya se ha comprobado la influencia que tienen sobre el modelo el espesor y material del flyer, ahora se analizará la influencia del diámetro del mismo llevando el caso al extremo, igualando su diámetro con el de la probeta para evitar así el efecto envolvente.

4.4 Influencia del diámetro del proyectil

En este apartado se analizarán los resultados de simulaciones dónde se utilizan flyers del mismo diámetro que la probeta para eliminar el efecto envolvente. Además, para contemplar y combinar todas las soluciones propuestas en el apartado anterior, se han realizado simulaciones con flyers de acero y aluminio de 2 y 5mm de espesor, de este modo, se puede observar cómo influye el material y el espesor del flyer en la onda transmitida.

4.4.1 Flyer de Aluminio Ø10x5mm

En este caso, la tensión incidente (σ_I) sobre la probeta es la misma que en las simulaciones anteriores con flyer de aluminio ya que el diámetro de éste no influye:

$$\sigma_I = \pm \rho_{Al} \cdot C_{Al} \cdot \frac{V_{IMPACTO}}{2} = 2800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5080 \frac{m}{s} \cdot \frac{20}{2} \frac{m}{s} = \boxed{142.24MPa}$$

Como las secciones de probeta y flyer son iguales, la fórmula del coeficiente de transmisión se simplifica notablemente:

$$A_1 = A_2 ;$$

$$C_T = \frac{2A_1\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} = \frac{2\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} = \frac{2 \cdot 1200 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1580 \frac{m}{s}}{2800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5080 \frac{m}{s} + 1200 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1580 \frac{m}{s}} = 0.235$$

La tensión teórica transmitida (σ_T) en este caso es:

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.235 \cdot 142.24MPa = \boxed{33.4MPa}$$

Y la longitud del pulso será:

$$\lambda = \frac{2 \cdot t}{C} = \frac{2 \cdot 5 \times 10^{-3} m}{5080 m/s} = \boxed{1.97 \mu s}$$

1. Plano de choque

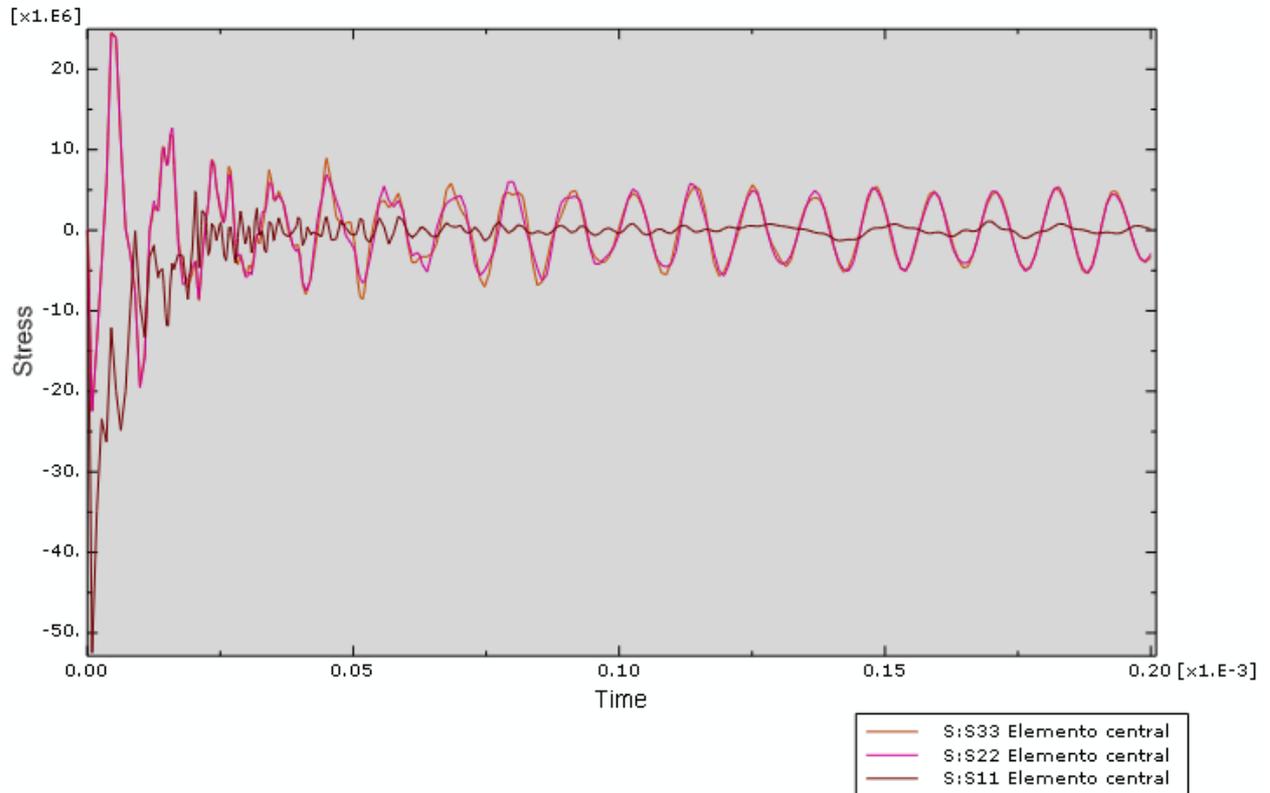


Figura 4.34 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

En Figura 4.34 se observa un valor de la tensión σ_{11} ligeramente inferior al teórico así como que las tensiones σ_{22} y σ_{33} no se disipan con el tiempo. Sin embargo, su valor (4MPa) es mucho menor que en los casos anteriores donde esto sucedía (11MPa), por lo que se continuará con el análisis para comprobar si este hecho puede despreciarse haciendo válido el ensayo.

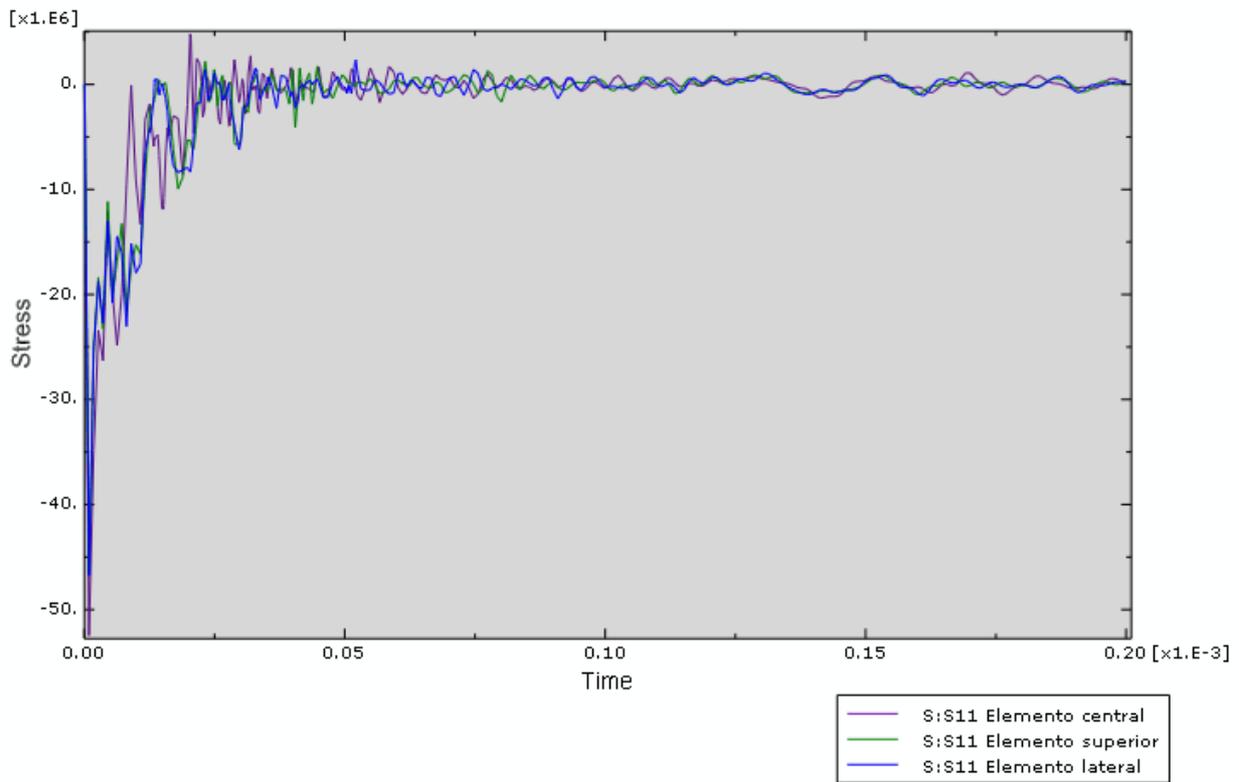


Figura 4.35 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

La Figura 4.35 muestra como la utilización de un flyer de la misma sección que la probeta hace que se produzca un contacto plano más uniforme entre probeta y flyer. A diferencia de las simulaciones anteriores donde existía un pico de tensión en los elementos periféricos debido al efecto envolvente, en este caso, dicho pico no existe y, por tanto, se produce la misma tensión σ_{11} en todos los elementos.

Si se compara esta gráfica con la de simulaciones anteriores, se puede comprobar que las ondas se estabilizan antes, es decir, tienden a cero (por ser cara libre de tensiones) más rápidamente. Este hecho se debe a la menor influencia de las tensiones σ_{22} y σ_{33} , ya que sus magnitudes con este flyer se ven reducidas.

2. Plano al 25% de la longitud de la probeta

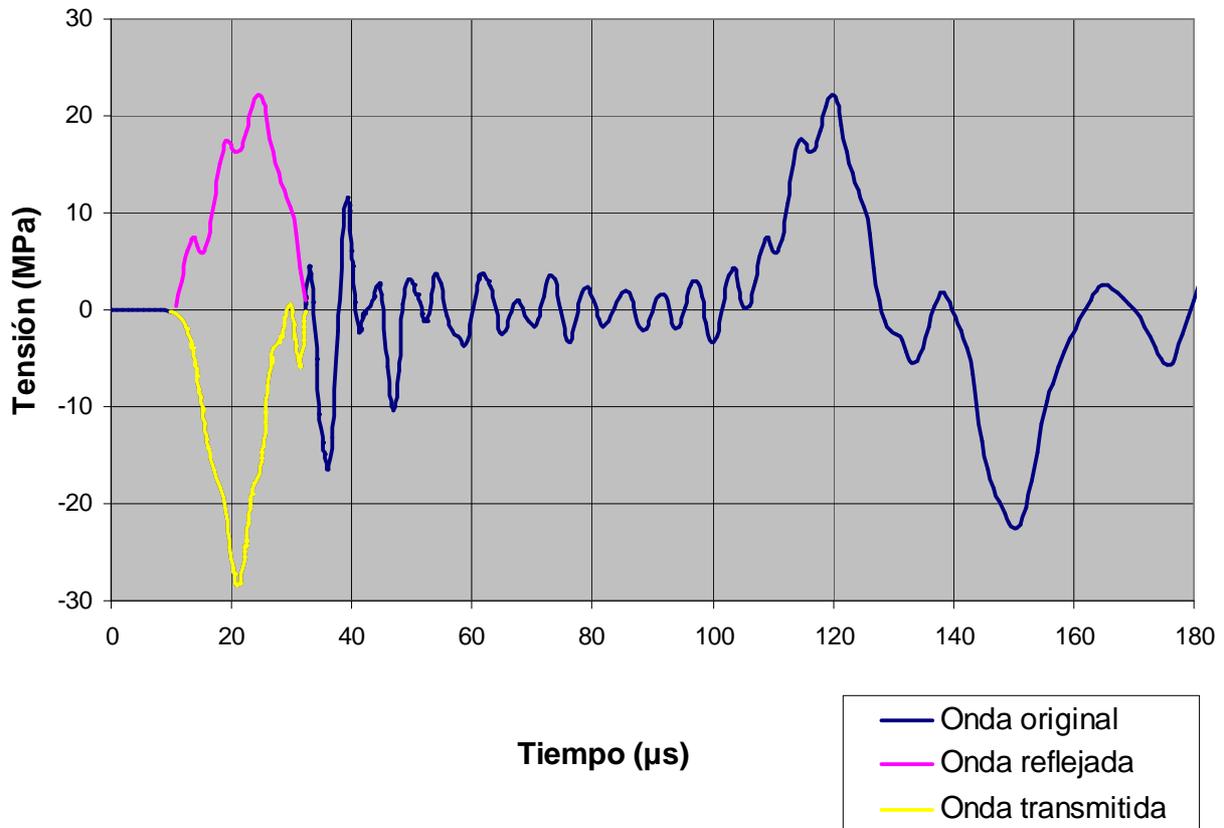


Figura 4.36 Tensión-Tiempo

Una de las mejoras más notables que pueden observarse a primera vista en la Figura 4.36 es que, aunque tampoco coincide con el valor teórico, la longitud de onda ha mejorado considerablemente con respecto a las simulaciones anteriores. Mientras que antes rondaba los 50µs, en este caso es de aproximadamente 20µs. Además, se ha de notar que es un plano muy próximo al de choque, con lo que la estabilización de las ondas con este tipo de flyers es muy superior a los anteriores.

Un aspecto negativo es que, mientras en las simulaciones anteriores la tensión obtenida era prácticamente la misma que la teórica, en este caso la tensión media registrada es de 23,4MPa, lo que resulta muy inferior a la teórica de 33,4MPa. Esto se debe a que, debido al impacto, la probeta adquiere cierta vibración y la onda transmitida no viaja en su totalidad en la dirección

longitudinal de la probeta si no que parte de la energía se disipa en las otras direcciones haciendo que la magnitud del frente de ondas disminuya.

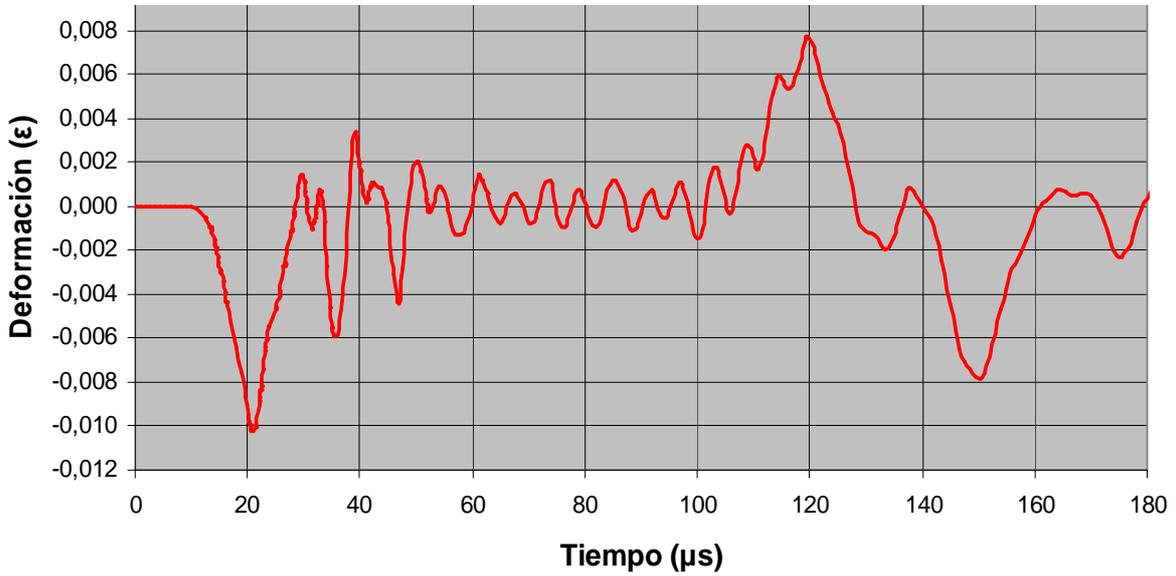


Figura 4.37 Deformación-Tiempo

En la Figura 4.37 también puede observarse la rápida estabilización de las ondas en esta simulación así como la reducción de la deformación obtenida (0,008ε) con la teórica (0,011ε).

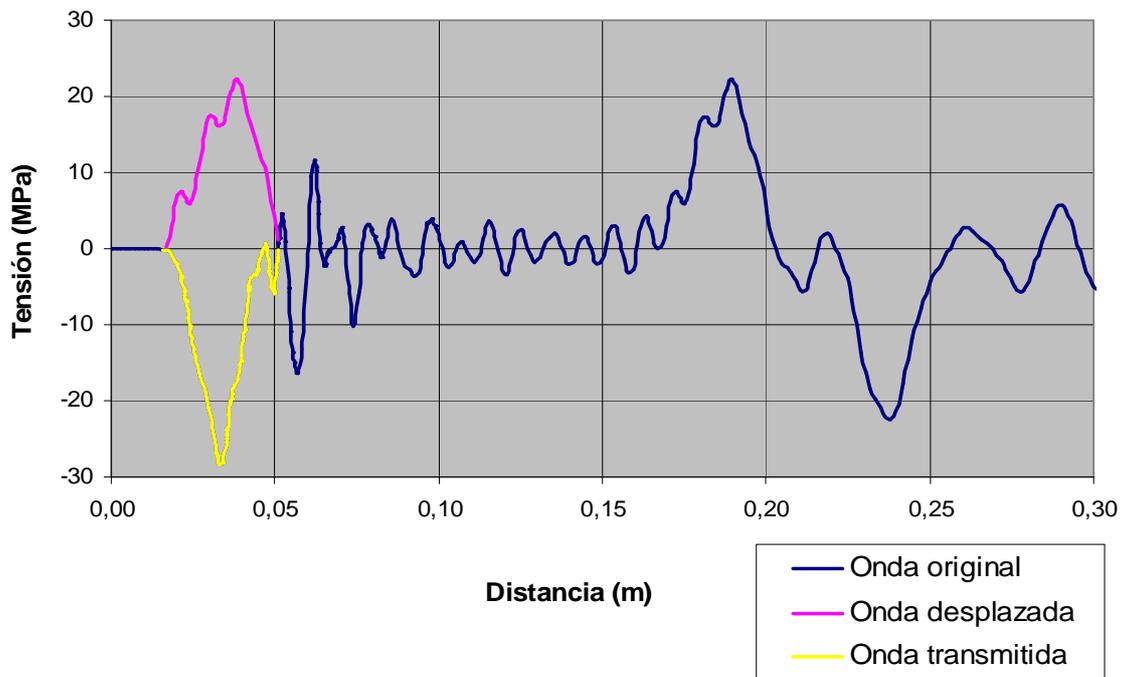


Figura 4.38 Tensión-Distancia

En la Figura 4.38 se ha acoplado la onda reflejada a la transmitida en el mismo instante para poder comprarlas mejor visualmente. Se observa una onda reflejada muy similar a la transmitida, pero no se pueden considerar iguales si no lo corrobora el cálculo de áreas.

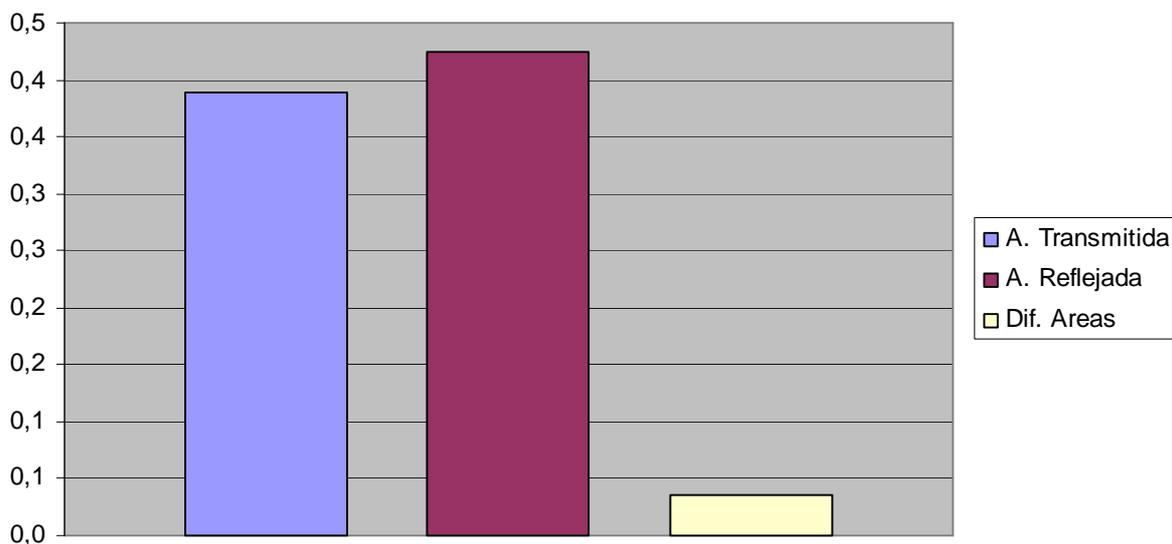


Figura 4.39 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
3,88 E+05	4,24 E+05	3,55 E+04	8,37

A la vista de los resultados, se puede afirmar que las ondas son iguales ya que su diferencia es menor del 10%. Esto evidencia la rápida estabilización de ondas que se produce con este tipo de flyers, señalando así al efecto envolvente como el principal causante de las perturbaciones en la onda transmitida.

3. Plano medio

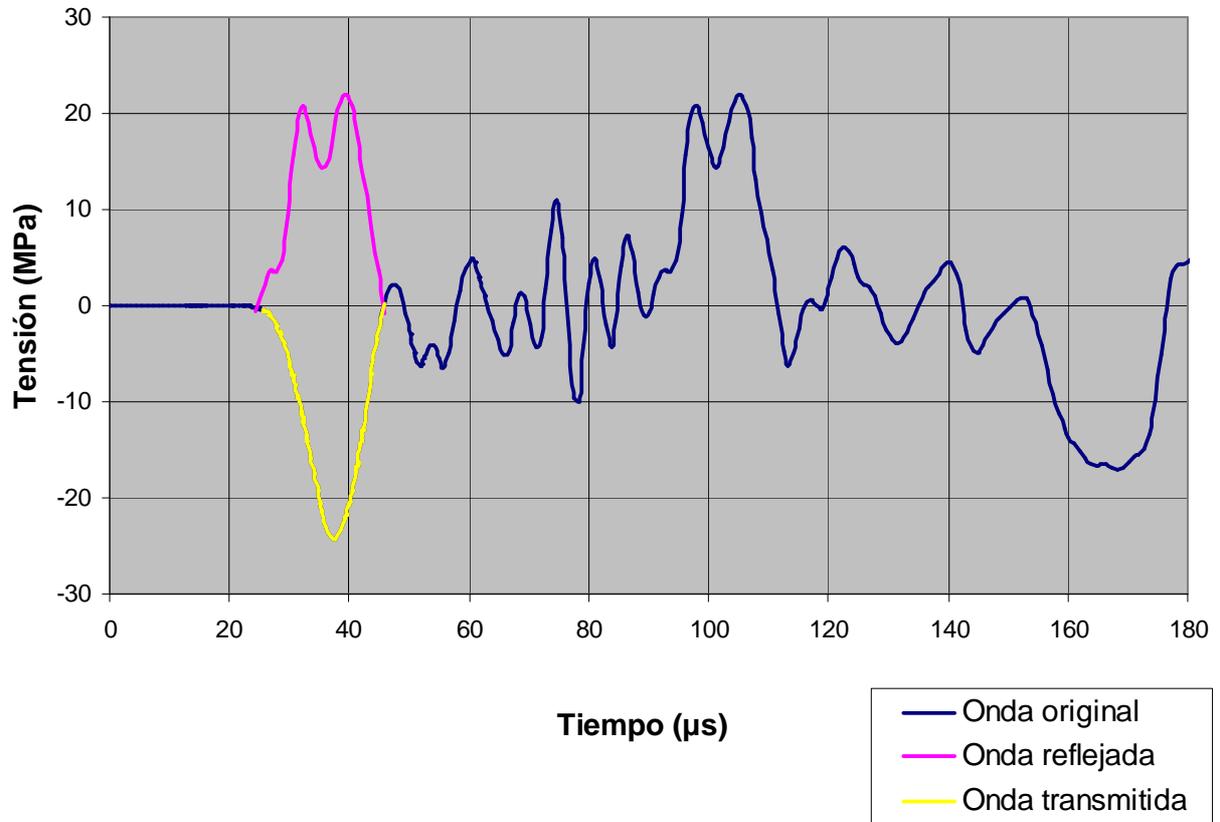


Figura 4.40 Tensión-Tiempo

En la Figura 4.40 se observa una onda igual en magnitud (23,4MPa) y longitud (20µs) que la del plano anterior. Por lo tanto, se puede afirmar que la onda obtenida en el plano anterior ya era una onda estable, lo cual corrobora la hipótesis de que, si las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante, perturban la onda, haciendo que la magnitud en la dirección longitudinal disminuya y se aleje del valor teórico.

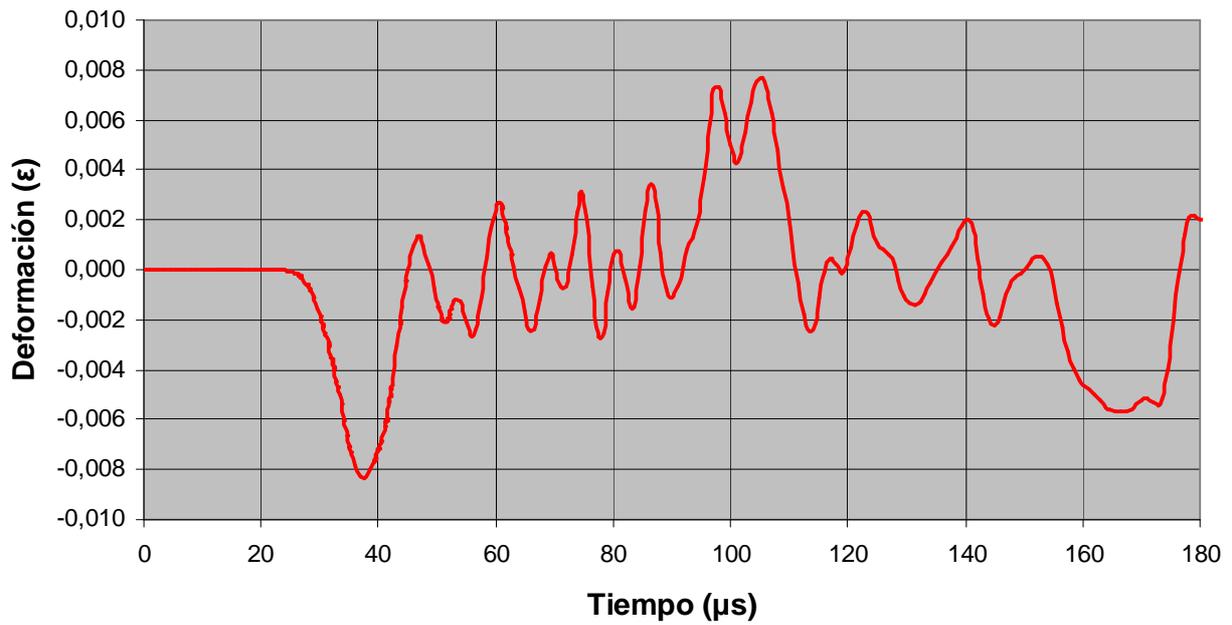


Figura 4.41 Deformación-Tiempo

También se observa esta gráfica que la onda obtenida en este plano es igual en cuanto a magnitud y longitud que la del plano anterior.

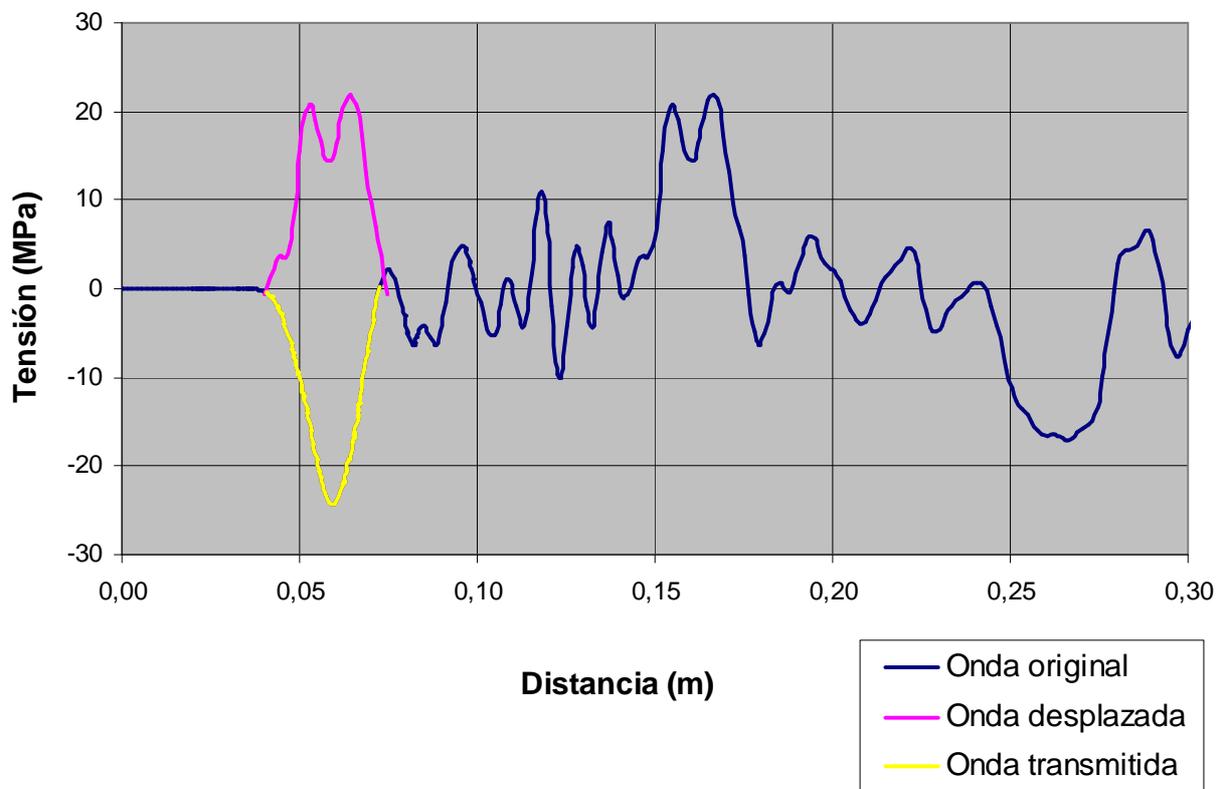


Figura 4.42 Tensión-Distancia

Del mismo modo que en el plano anterior, la Figura 4.42 muestra la superposición de la onda transmitida y reflejada en función de la distancia al plano de choque en la que se encuentran. Visualmente parecen prácticamente iguales, pero se ha de recurrir al cálculo de áreas para confirmarlo numéricamente.

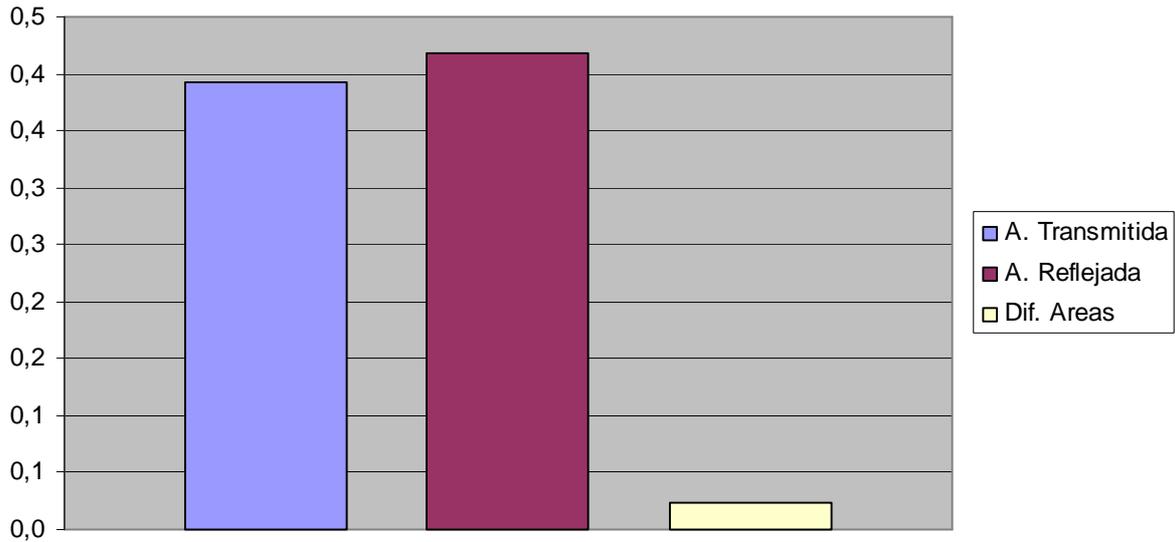


Figura 4.43 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
3,93 E+05	4,17 E+05	2,45 E+04	5,87

Tras el análisis realizado, se puede afirmar que las ondas transmitida y reflejada son iguales ya que su diferencia es menor del 10%. Este hecho era de esperar ya que en el plano anterior, donde se supone una onda menos estable, también se podían considerar iguales. Esta igualdad permanecerá constante hasta que se produzca el cruce de ondas ya que ambas ondas se anularán entre sí disminuyendo su longitud y magnitud.

4. Plano 75% (límite)

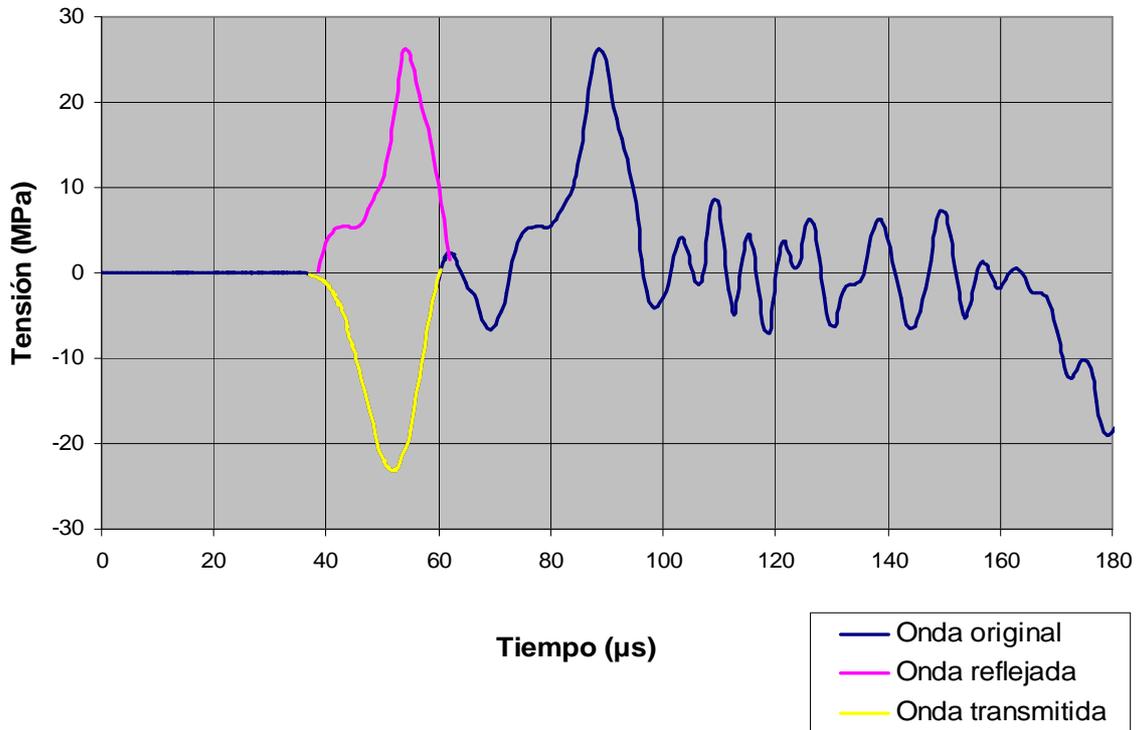


Figura 4.44 Tensión-Tiempo

En la Figura 4.44 se observa un inicio de cambio de forma en la onda reflejada, esto se debe a que está a punto de cruzarse con la transmitida y, al ser de signos opuestos, la magnitud y longitud de ambas ondas se verán anuladas entre sí.

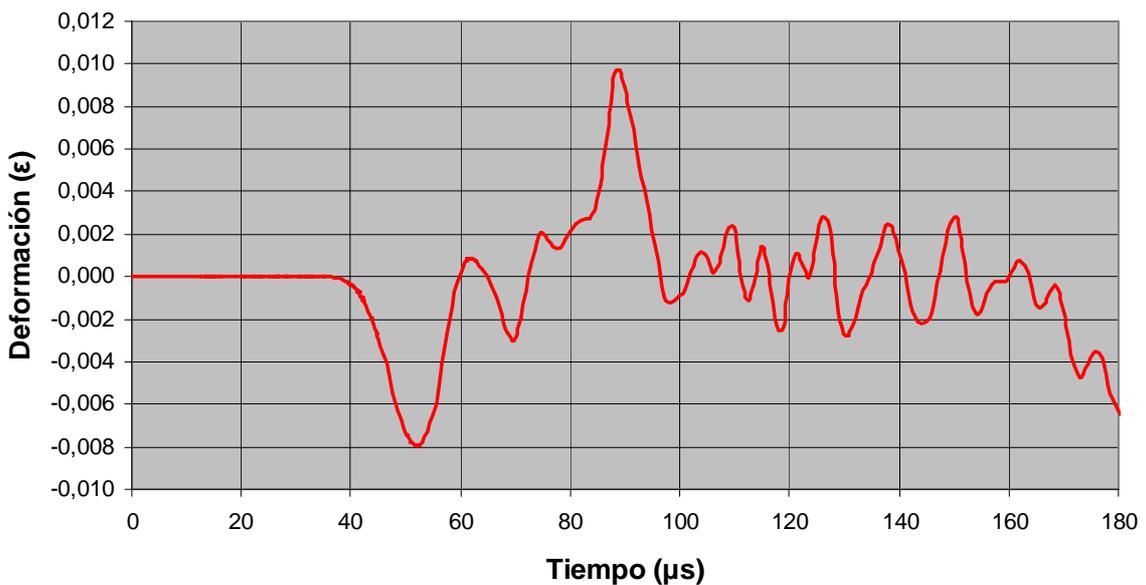


Figura 4.45 Deformación-Tiempo

En esta gráfica también puede comprobarse como el cruce de ondas está a punto de producirse y por eso la forma de la onda reflejada es diferente con respecto a la de los planos anteriores.

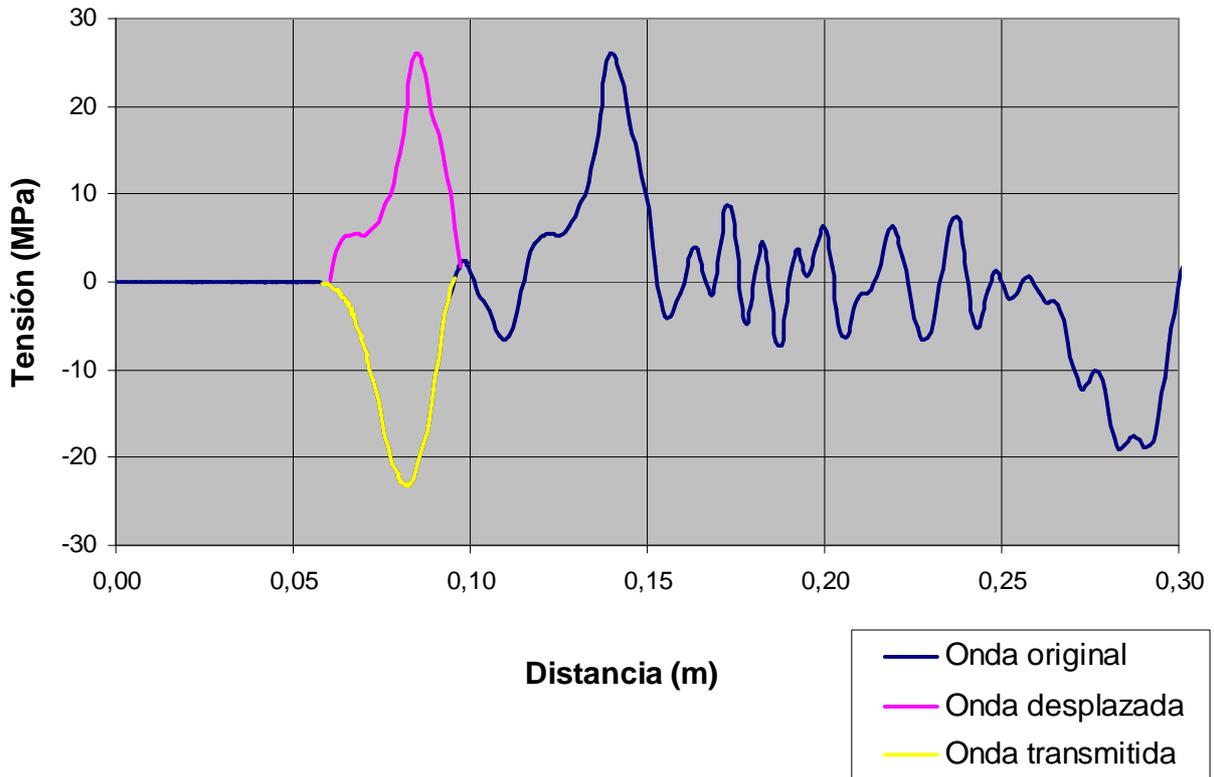


Figura 4.46 Tensión-Distancia

En la Figura 4.46 se ve perfectamente gracias a la superposición de ondas que, aunque las longitudes de ambas ondas siguen siendo muy similares, la forma de la onda reflejada empieza a verse modificada. Una vez más, se ha de recurrir al cálculo numérico para comprobar si las ondas pueden considerarse iguales.

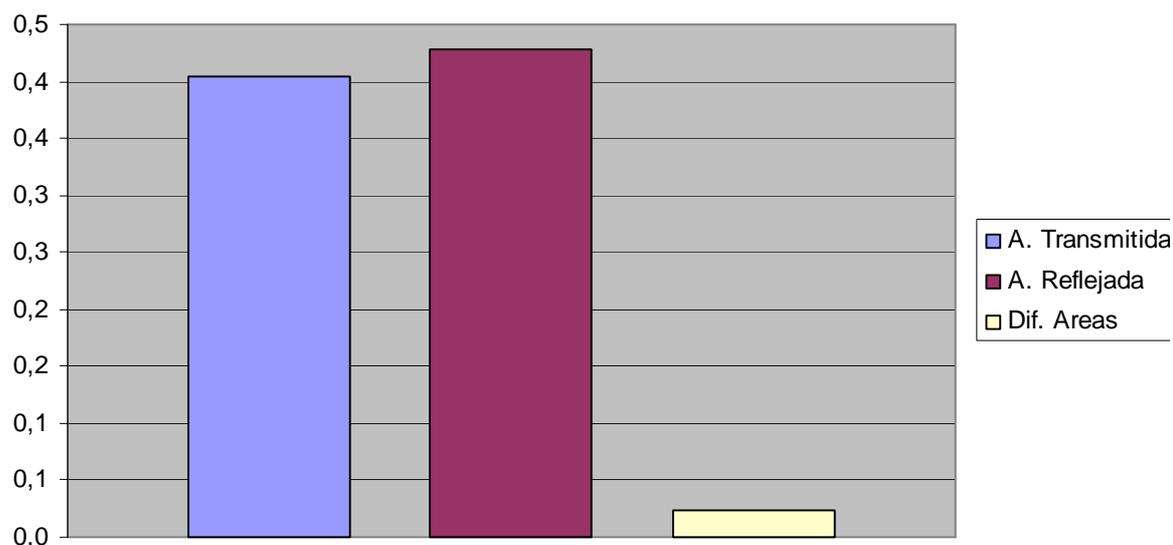


Figura 4.47 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
4,04 E+05	4,28 E+05	2,38 E+04	5,56

A la vista de los resultados, se puede afirmar que las ondas transmitida y reflejada son iguales ya que su diferencia es menor del 10%.

Se debe aclarar que, aunque se produjese el cruce de ondas, este hecho no se podría detectar únicamente con el cálculo de áreas ya que, como puede visualizarse en la Figura 4.46, las ondas reflejada y transmitida son muy similares y la reducción de longitud y magnitud que se daría sería equivalente en ambas, resultando la diferencia de áreas siempre menor del 10%.

La única forma de detectar el cruce de ondas a partir del cálculo de áreas es comparar cada área con su homónima del plano anterior (si es que en el plano anterior la onda es estable) y, si el área obtenida es notablemente menor que la del plano anterior, es porque la curva se ha visto modificada.

4.4.2 Flyer de Aluminio Ø10x2mm

En este caso, la tensión transmitida será la misma que en el caso anterior:

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.235 \cdot 142.24 \text{MPa} = \boxed{33.4 \text{MPa}}$$

Sin embargo, la longitud de onda teórica se ve reducida al utilizarse un flyer de menor espesor:

$$\lambda = \frac{2 \cdot t}{C} = \frac{2 \cdot 2 \times 10^{-3} \text{m}}{5080 \text{m/s}} = \boxed{0.787 \mu\text{s}}$$

Es de esperar que si en la simulación anterior, dónde el flyer tenía un grosor mayor, los resultados obtenidos no eran válidos debido a la deformación de éste, en este caso los resultados tampoco van a ser válidos ya que un flyer de menor espesor sufrirá mayores deformaciones invalidando igualmente el ensayo. No obstante, se va a analizar al menos el plano de choque para corroborar esta suposición.

1. Plano de choque

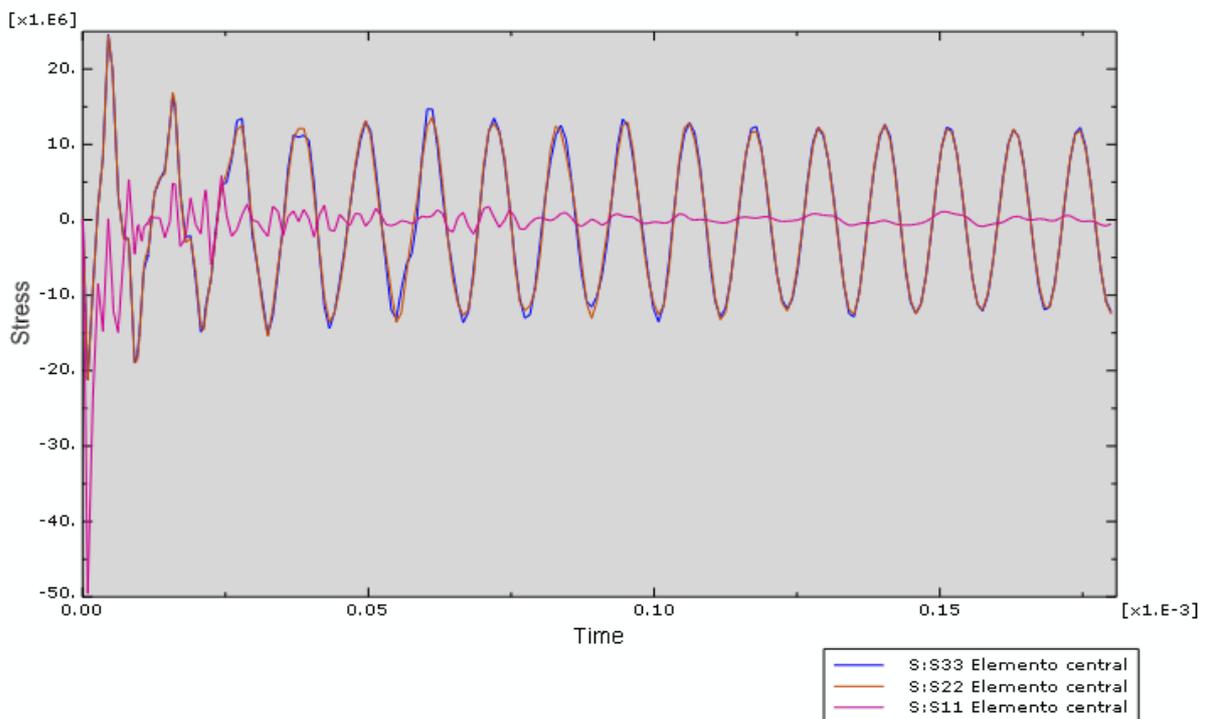


Figura 4.48 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

La Figura 4.48 muestra lo que se esperaba, una situación muy similar a la simulación anterior (4.4.1) pero con una gran diferencia, las tensiones σ_{22} y σ_{33} alcanzan valores de 12MPa, más del doble del caso anterior (4MPa). Esto se debe a que, como ya se suponía, el flyer sufre una mayor deformación al ser más delgado e introduce perturbaciones que hacen que estas tensiones cobren mayor importancia.

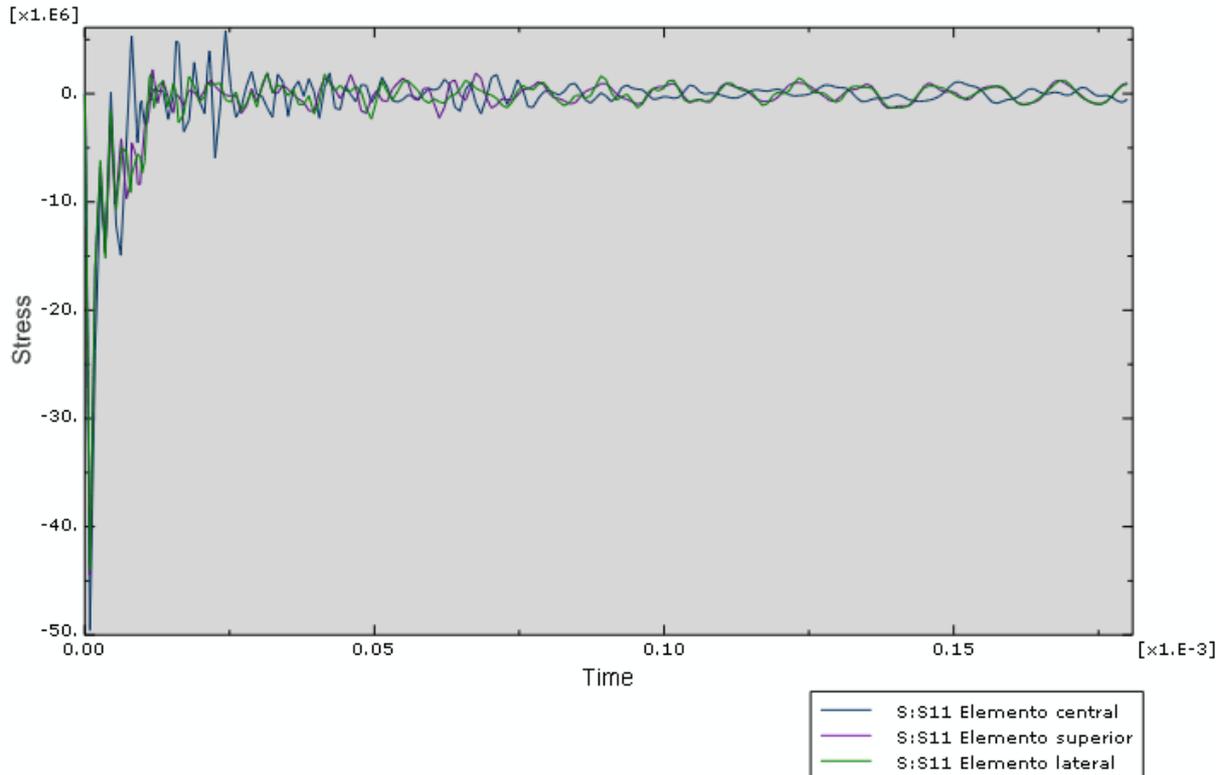


Figura 4.49 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Como puede observarse en la Figura 4.49, la tensión σ_{11} de todos los elementos del plano de choque es la misma, lo que significa que el contacto entre probeta y flyer es total. Sin embargo, como consecuencia directa del aumento de las tensiones σ_{22} y σ_{33} , se tiene una disminución de la magnitud de la tensión σ_{11} .

2. Plano al 25% de la longitud de la probeta

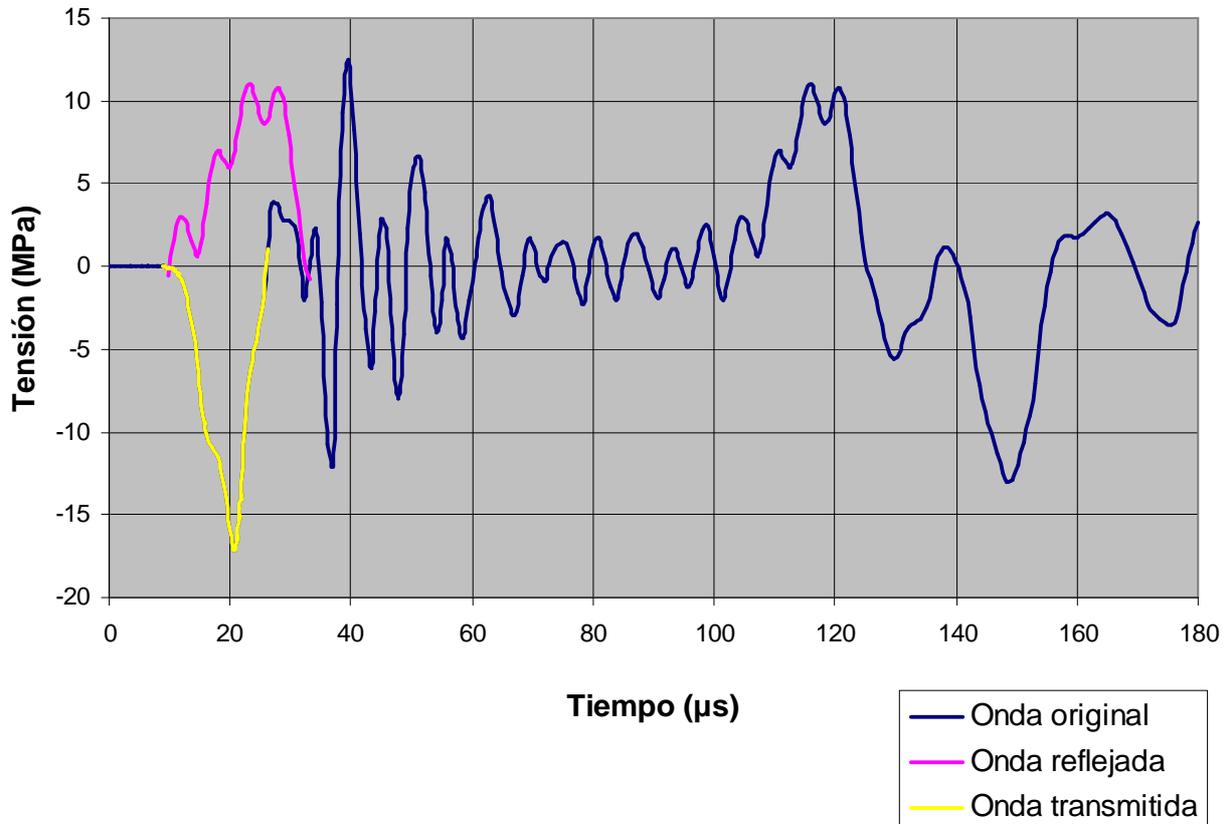


Figura 4.50 Tensión-Tiempo

Como era de esperar, la Figura 4.50 corrobora el hecho de que al aumentar las tensiones σ_{22} y σ_{33} se produce una disminución del valor de σ_{11} (de 23,4 a 15MPa). Otra diferencia con respecto al caso anterior es la diferencia existente entre la onda reflejada y la transmitida también consecuencia directa de las perturbaciones introducidas por el flyer.

Por lo tanto, a partir de esta gráfica se puede determinar que el ensayo con un flyer de 2mm de Aluminio no es válido y no es necesario realizar el resto del análisis.

4.4.3 Flyer de Acero Ø10x5mm

En este caso, la tensión incidente (σ_I) sobre la probeta es la misma que en las otras simulaciones con flyer de acero ya que el diámetro de éste no influye:

$$\sigma_I = \pm \rho_{Al} \cdot C_{Al} \cdot \frac{V_{IMPACTO}}{2} = 7800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5188 \frac{m}{s} \cdot \frac{20}{2} \frac{m}{s} = \boxed{404.66MPa}$$

Del mismo modo que en el caso anterior, la fórmula del coeficiente de transmisión se simplifica notablemente:

$$A_1 = A_2 ;$$

$$C_T = \frac{2A_1\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} = \frac{2\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} = \frac{2 \cdot 1200 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1580 \frac{m}{s}}{7800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5188 \frac{m}{s} + 1200 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1580 \frac{m}{s}} = 0.089$$

La tensión teórica transmitida (σ_T) será este caso:

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.235 \cdot 404.6MPa = \boxed{36MPa}$$

Y la longitud del pulso será:

$$\lambda = \frac{2 \cdot t}{C} = \frac{2 \cdot 5 \times 10^{-3} m}{5188 m/s} = \boxed{1.93\mu s}$$

1. Plano de choque

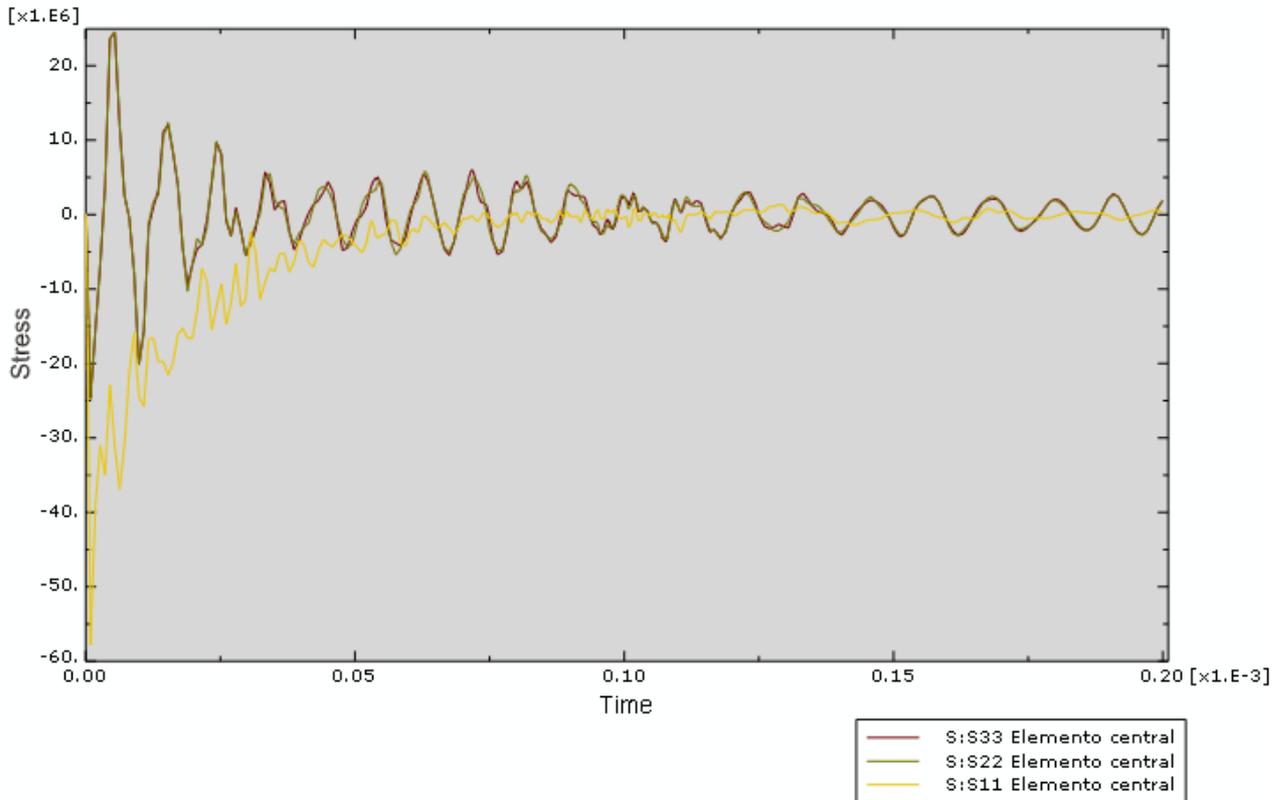


Figura 4.51 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

La Figura 4.51 muestra que en este caso las tensiones σ_{22} y σ_{33} tampoco se disipan; sin embargo, su valor es aún menor que en el caso homólogo con flyer de aluminio de 5mm de espesor. Este hecho era de esperar ya que al ser un material más resistente se deforma menos durante el impacto y se reduce la transmisión de ondas en las direcciones perpendiculares al eje longitudinal de la probeta, disminuyendo así el valor de las tensiones σ_{22} y σ_{33} .

Aunque el valor residual de estas tensiones es muy pequeño (del orden de 2MPa) se debe comprobar, al igual que en el caso anterior, que no influye de manera determinante en el valor de la tensión σ_{11} para que pueda considerarse ensayo válido.

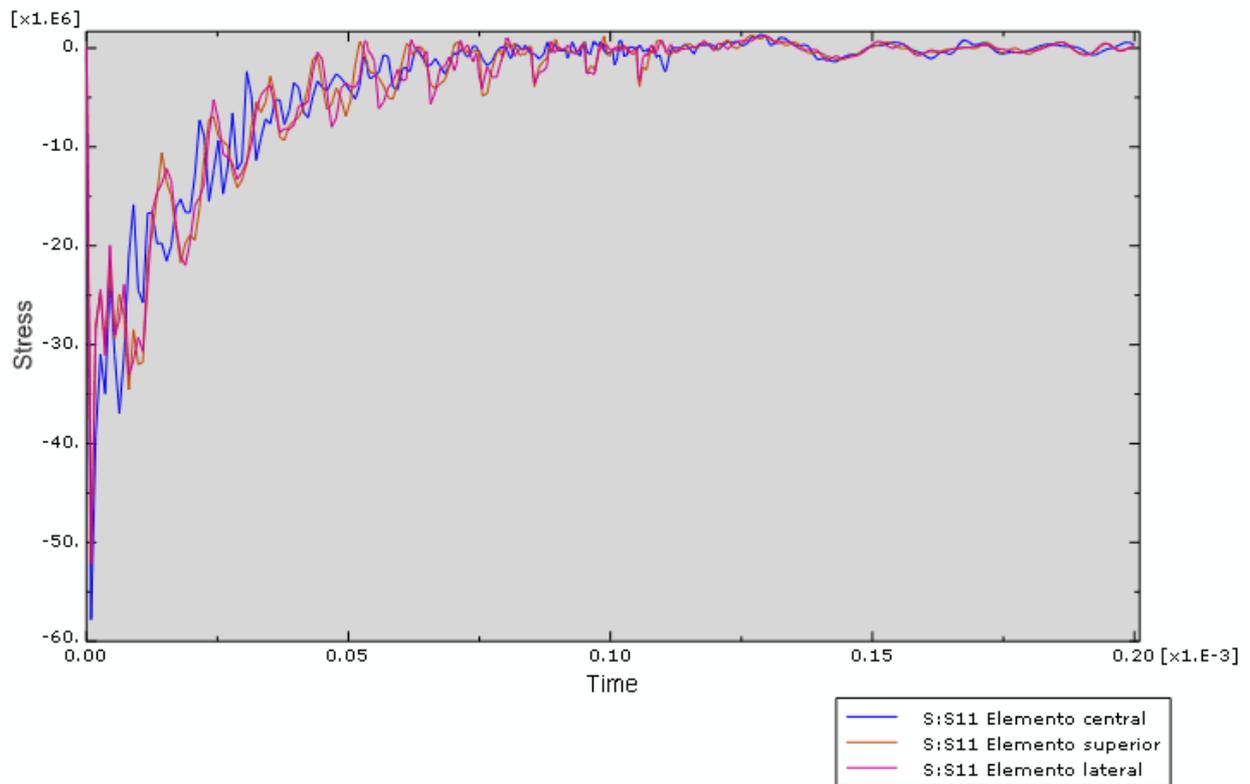


Figura 4.52 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

La Figura 4.52 muestra una situación prácticamente igual a la que sucedía con los flyers de aluminio. El hecho de que el flyer tenga la misma sección que la probeta, evita el efecto envolvente produciéndose así un contacto total y uniforme en la cara de impacto. Este fenómeno puede comprobarse en la gráfica porque las tensiones σ_{11} de todos los elementos son iguales y no existen picos mayores en los elementos exteriores (superior y lateral) como ocurría en los casos donde sí existía efecto envolvente. Por lo tanto, se continuará con el análisis de los demás planos de la probeta para comprobar si se puede obviar el efecto de las tensiones σ_{22} y σ_{33} .

2. Plano 25%

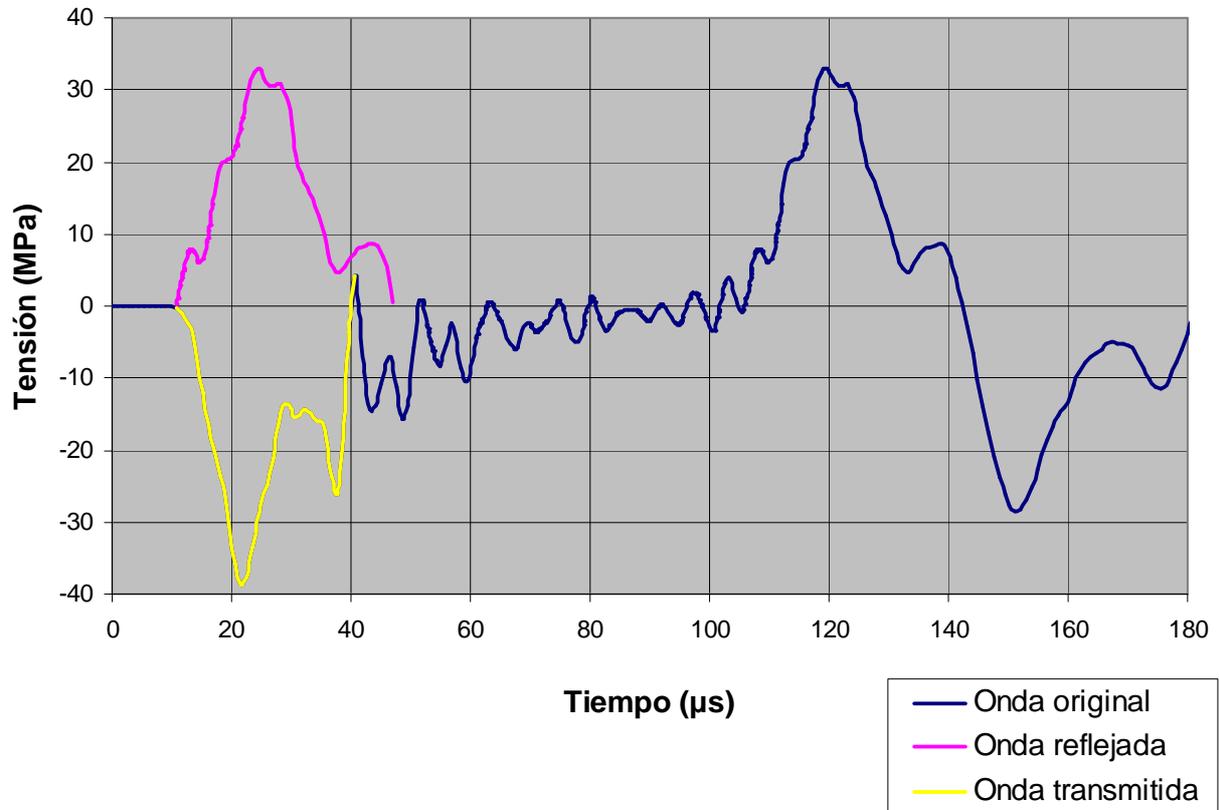


Figura 4.53 Tensión-Tiempo

Como ya sucedía con el caso de flyer de aluminio, una de las mejoras más evidentes al ver la Figura 4.53 es la considerable mejora de la longitud de onda que, aunque sigue sin coincidir con la teórica, es mucho menor que en los casos con flyers de mayor diámetro que la probeta (29μs frente a 55μs). Además, se ha de resaltar que el plano que está siendo analizado está muy próximo al de choque y la onda ya es bastante estable, con lo que la estabilización de ondas sufre también una gran mejoría.

El aspecto positivo es que se cumple la hipótesis planteada en el caso anterior de que al utilizar un flyer de acero que se deforma menos durante el impacto disminuye el valor de las tensiones σ_{22} y σ_{33} , lo que se ve traducido en que la magnitud de la tensión σ_{11} , 33MPa, es muy próxima a la teórica de 36MPa.

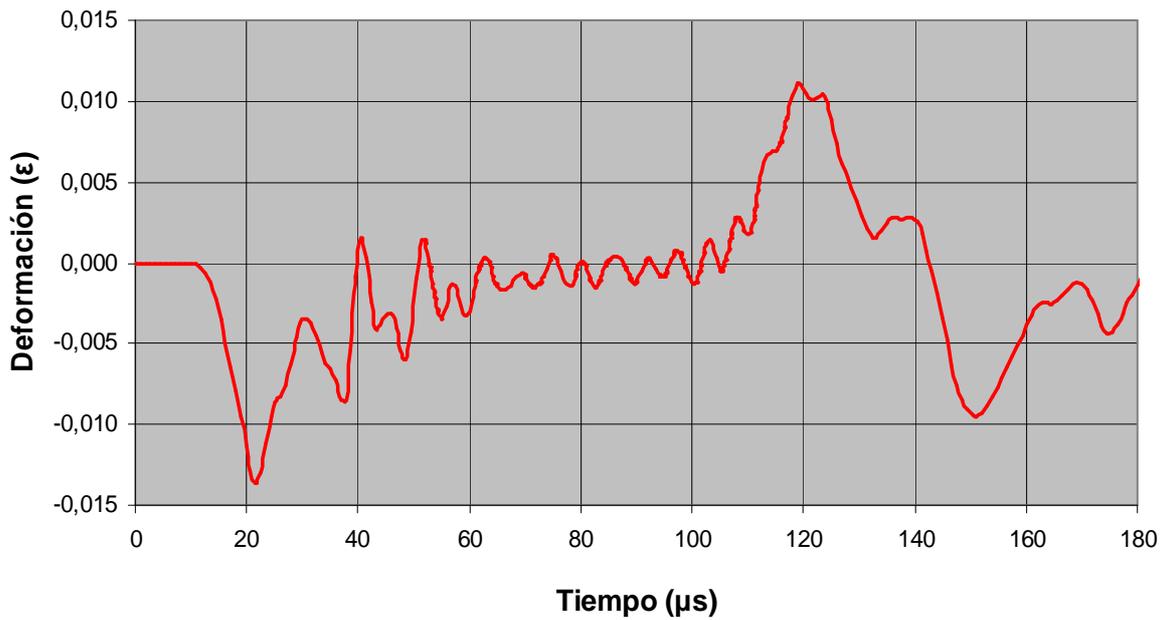


Figura 4.54 Deformación-Tiempo

Al igual que sucedía con la tensión, la deformación representada en la Figura 4.54 muestra también unos valores más próximos a los teóricos, 0,011 ϵ obtenidos frente a los 0,012 ϵ teóricos así como una menor longitud de onda y una estabilización más rápida.

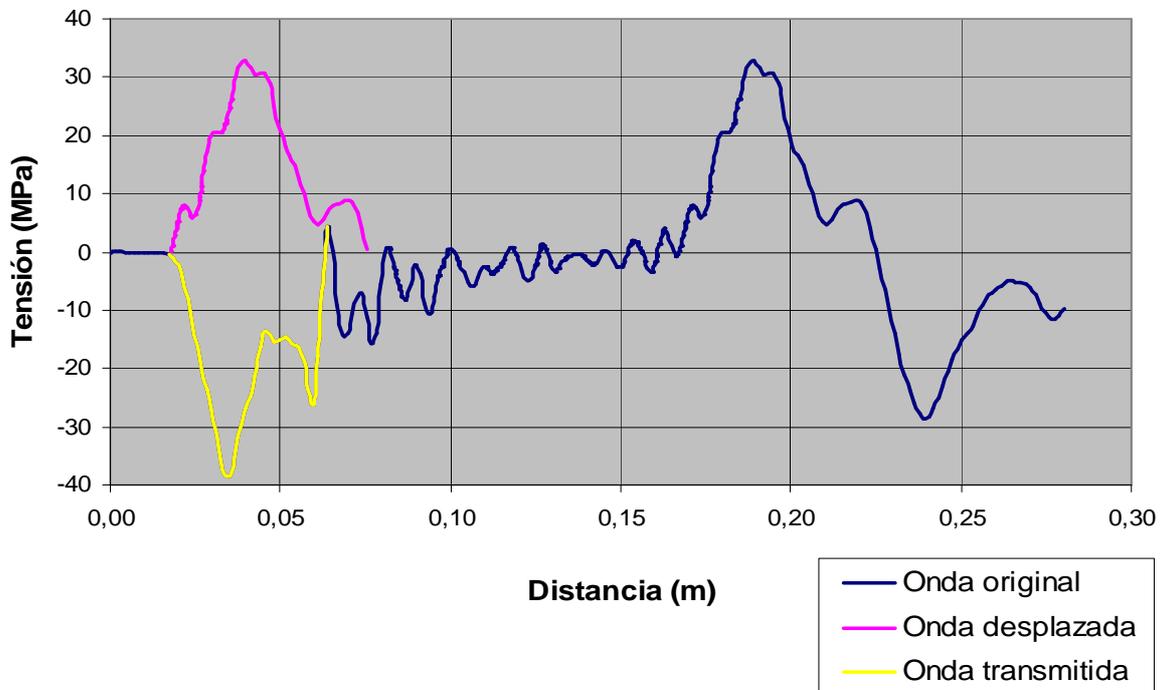


Figura 4.55 Tensión-Distancia

En la Figura 4.55 se muestra la superposición de la onda reflejada sobre la transmitida en función de la distancia al plano de choque. Visualmente, aunque la longitud de onda de la onda reflejada es mayor, la forma de las ondas invita a pensar que pueden considerarse iguales. No obstante, como en todos los demás análisis, se ha de recurrir al cálculo de áreas bajo cada curva para medir la energía que transmite cada una y corroborar que pueden considerarse iguales.

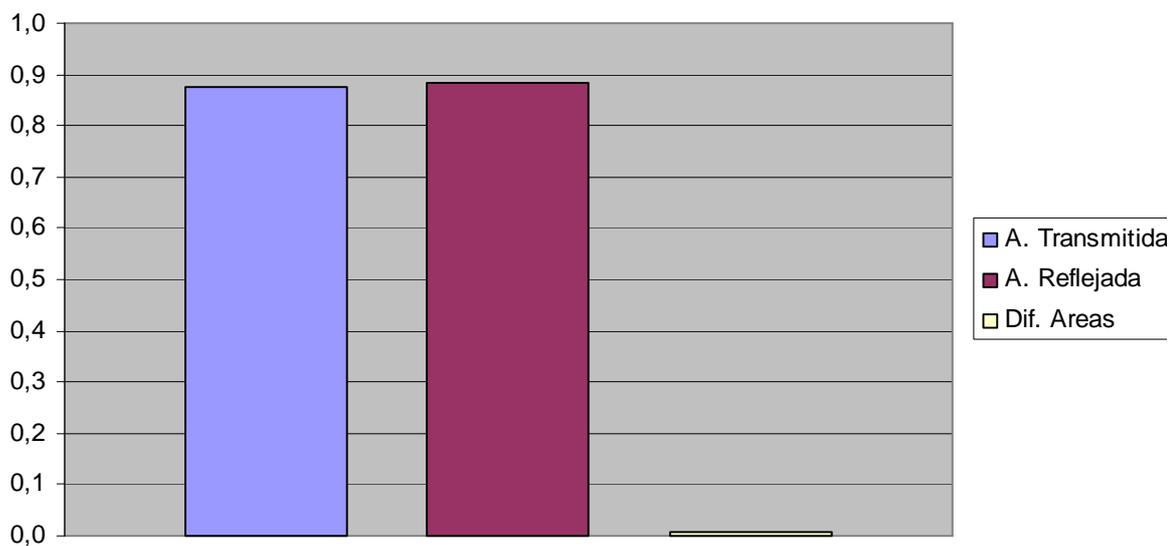


Figura 4.56 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
8,75 E+05	8,83 E+05	7,95 E+03	0,9

A la vista de los resultados, se puede afirmar que las ondas transmitida y reflejada son iguales, la diferencia de áreas es mínima. Es uno de los mejores resultados que se han obtenido hasta ahora, lo que hace prever que puede ser un modelo válido para ser llevado al laboratorio.

3. Plano 50%

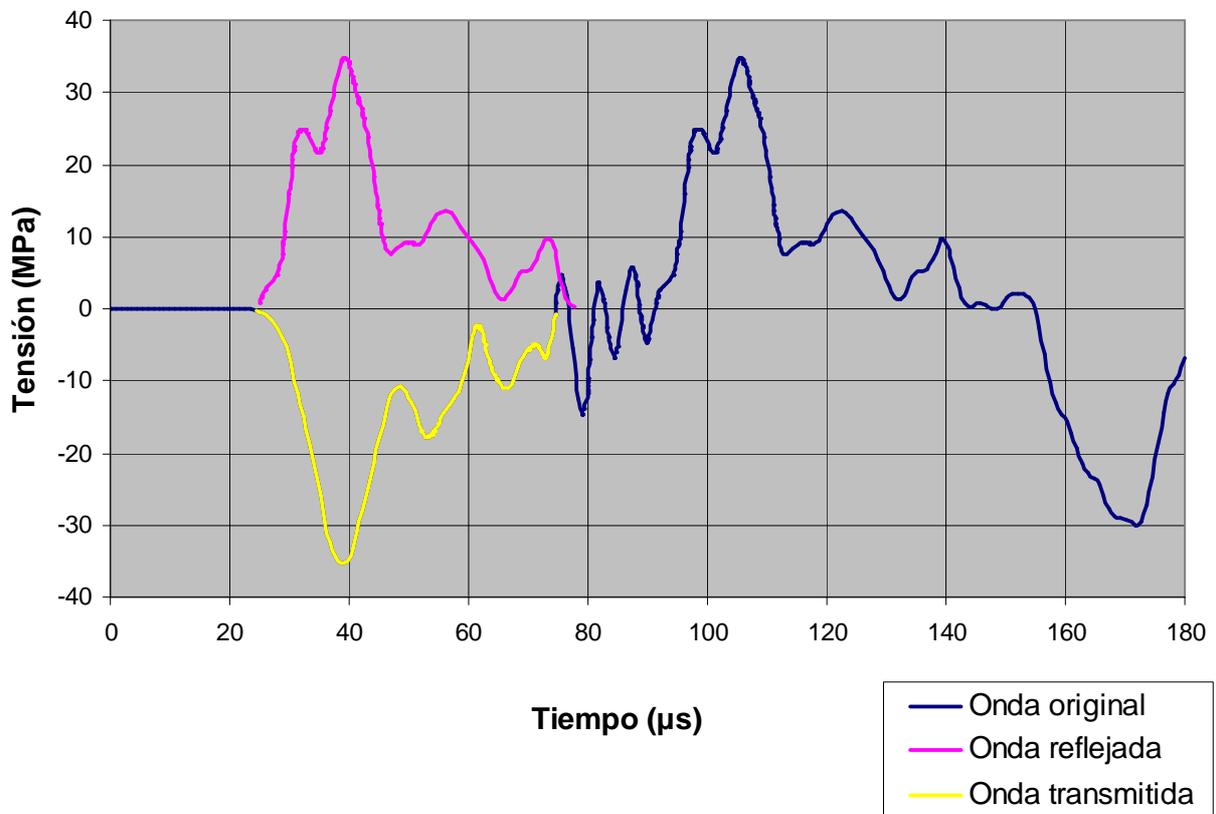


Figura 4.57 Tensión-Tiempo

La Figura 4.57 muestra una onda totalmente estabilizada que permanecerá constante hasta que se produzca el cruce de ondas, como ya se ha explicado anteriormente.

El valor de la tensión en este plano es de 34,9MPa, un valor aún más próximo al teórico que en el plano anterior. Sin embargo, la longitud de onda ha aumentado de 29µs casi 50µs.

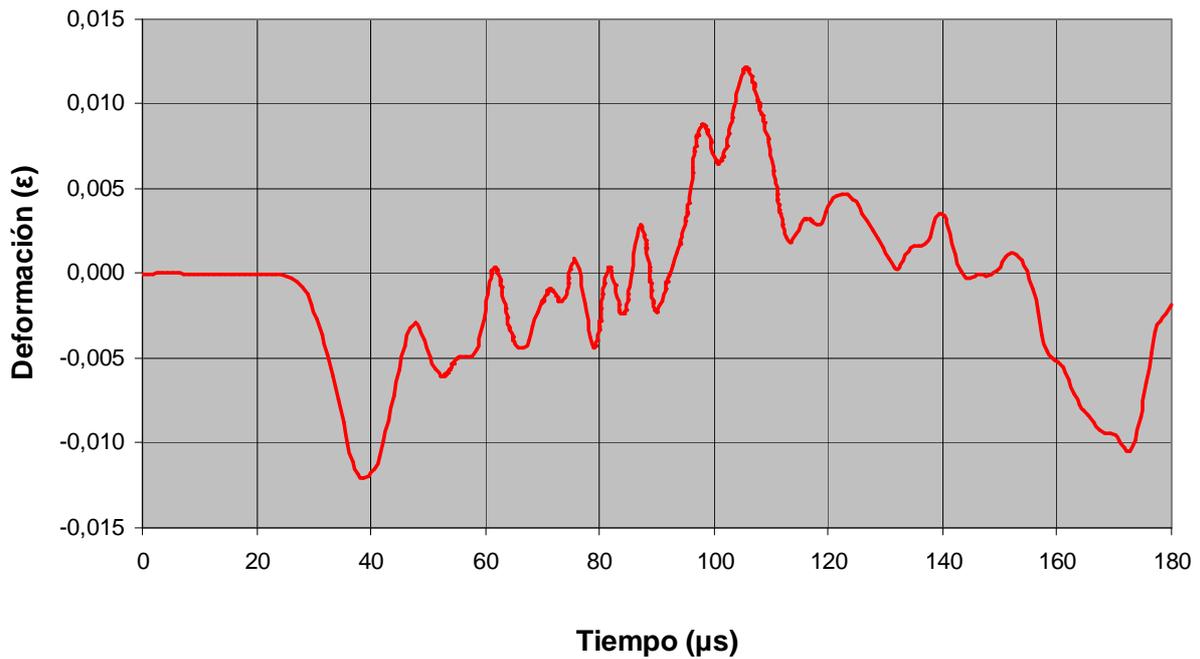


Figura 4.58 Deformación-Tiempo

Del mismo modo, en la Figura 4.58 puede verse que la deformación se aproxima más al valor teórico (0,0116ε obtenidos frente a los 0,012ε teóricos) y la longitud de onda aumenta con respecto al plano anterior.

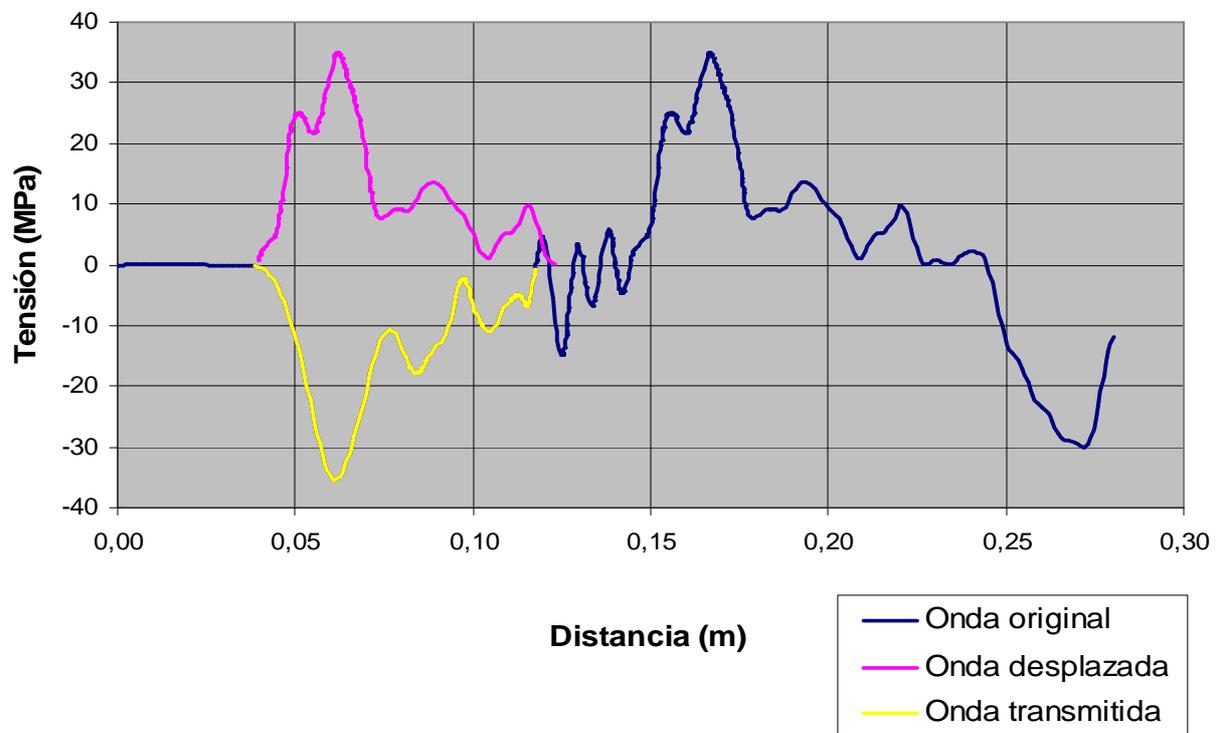


Figura 4.59 Tensión-Distancia

Como se puede observar en la Figura 4.59, las ondas tienen una forma y longitud más similares entre ellas que en el plano anterior, esto evidencia que son ondas más estables. Aunque visualmente parece que pueden considerarse iguales, se ha de recurrir al cálculo de áreas para comprobarlo numéricamente.

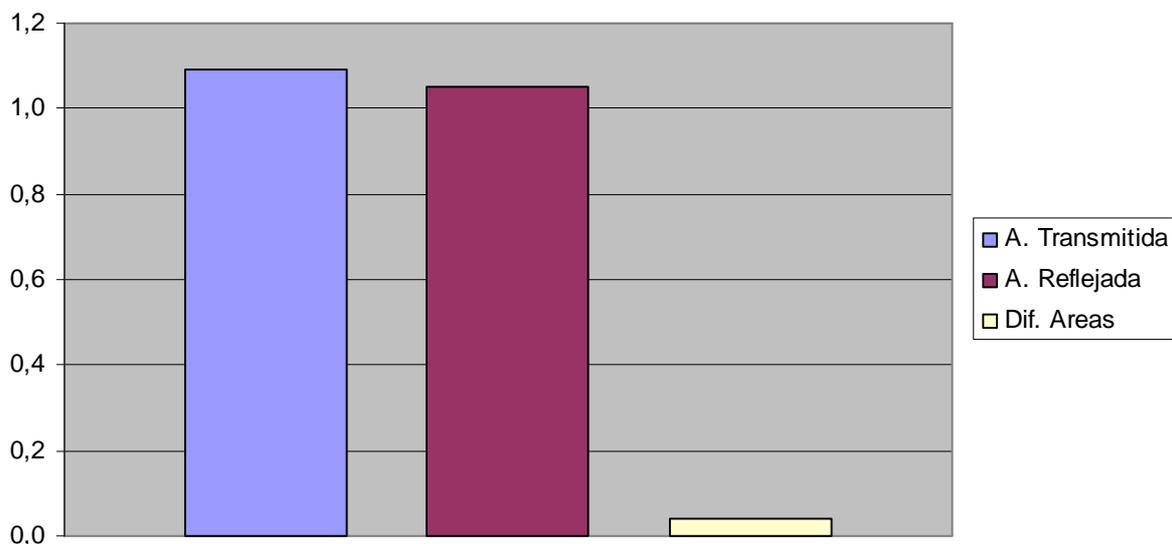


Figura 4.60 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
1,09 E+06	1,05 E+06	4 E+04	3,67

Aunque la diferencia de áreas en este plano es mayor que en el anterior, en este caso, la diferencia que existe entre el área reflejada y la transmitida es de tan sólo un 3,67%, por lo que las ondas pueden considerarse iguales.

4. Plano 55% (límite)

Este es plano a partir de cual se producirá el cruce de la onda transmitida con la reflejada. A partir de este plano la onda reflejada empezará anular a la transmitida (por ser de signos opuestos) y la magnitud y longitud de ambas ondas se verán modificadas, por lo que si se realiza cualquier medición de las ondas a partir de este plano el resultado obtenido no sería real, estaría falseado por este efecto. Este hecho puede comprobarse en el análisis del plano 75%, donde la magnitud y longitud de la onda reflejada se han visto modificadas.

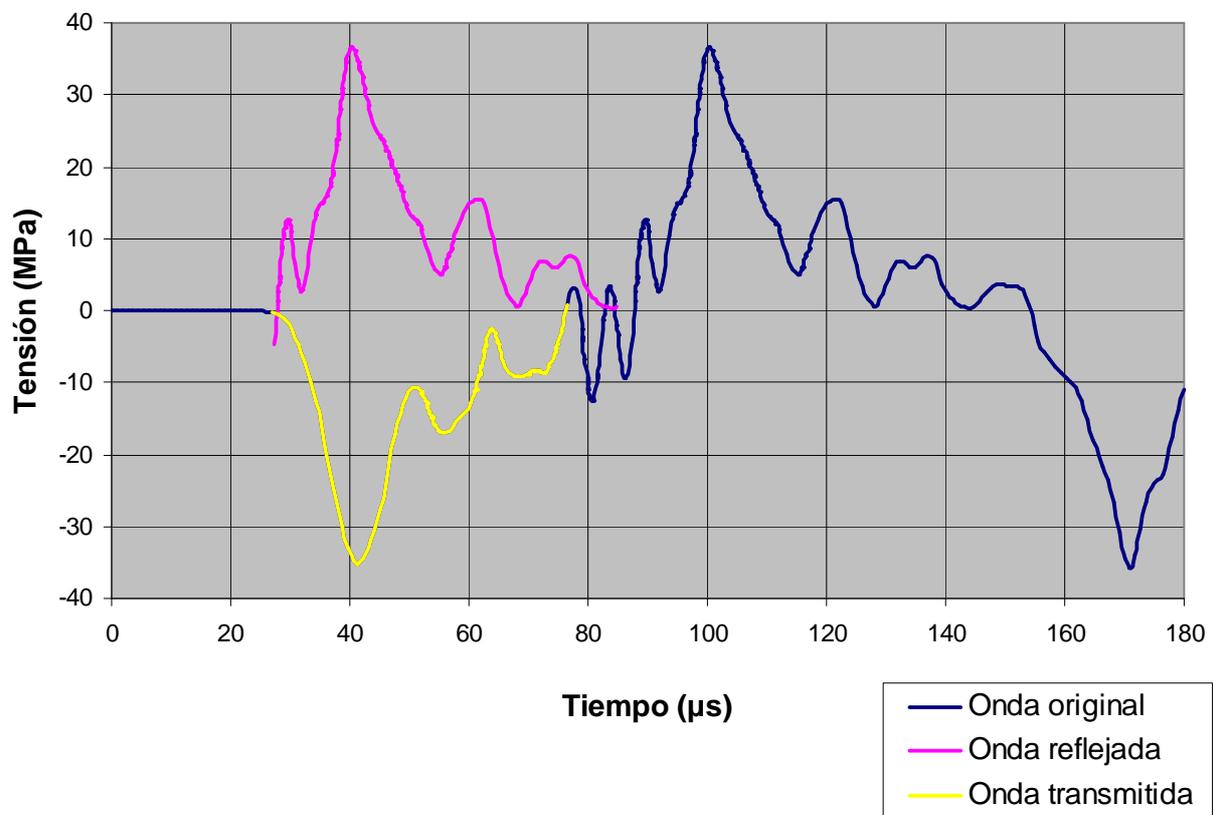


Figura 4.61 Tensión-Tiempo

En la Figura 4.61 se puede observar que la magnitud de la onda es de 34,5MPa y su longitud de 47µs, valores muy similares a los obtenidos en el plano 50% ya que la onda sigue siendo estable.

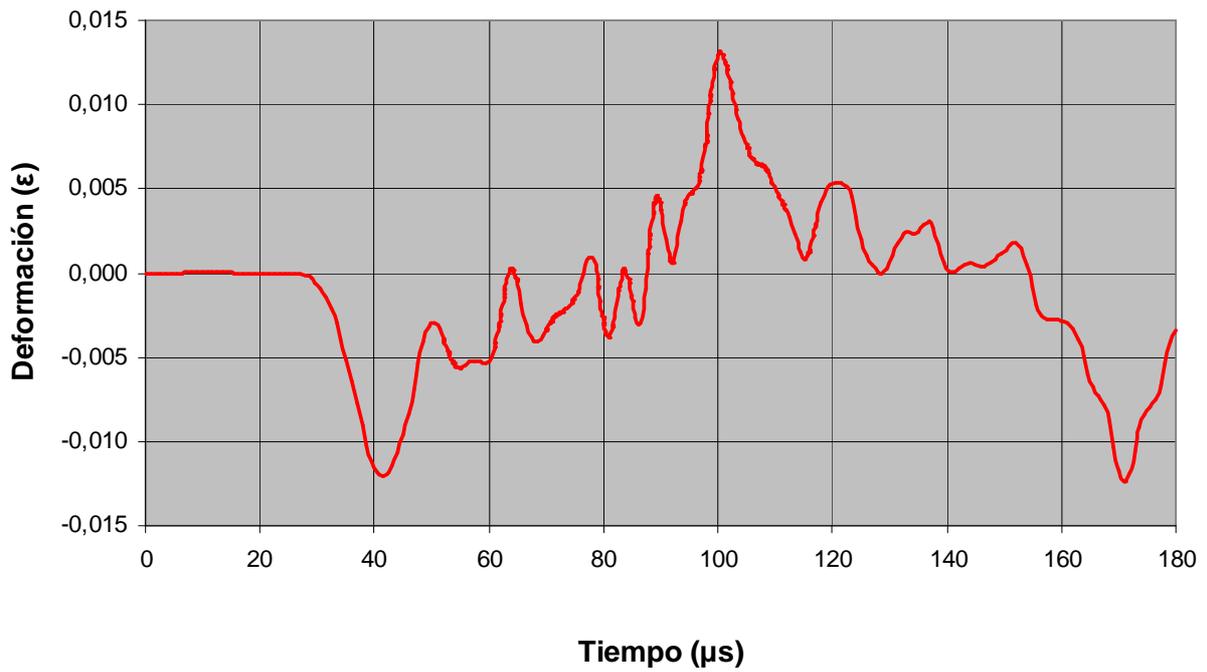


Figura 4.62 Deformación-Tiempo

En esta gráfica también puede observarse como éste es el plano límite. Los valores obtenidos de la deformación son los de una onda estable, 0.0119 ϵ frente a los 0.012 ϵ teóricas.

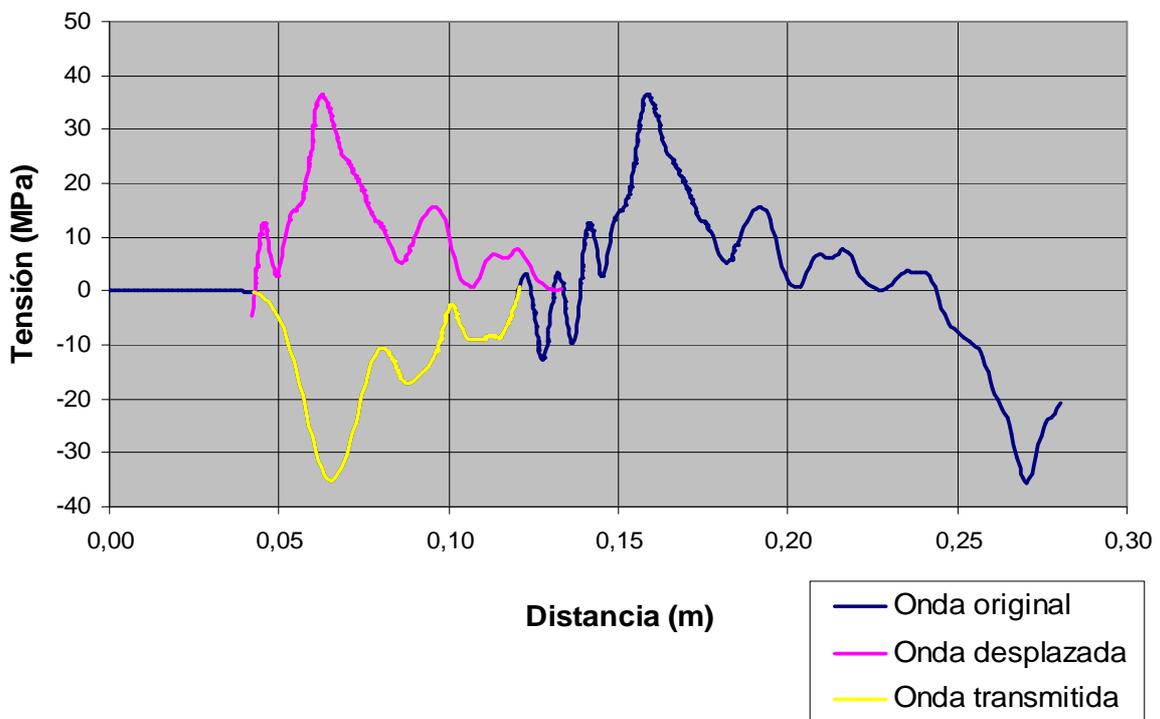


Figura 4.63 Tensión-Distancia

En la Figura 4.63, en la que se ha acoplado la onda reflejada a transmitida, se puede comprobar que la forma, magnitud y longitud de las ondas son muy similares entre sí, por lo que visualmente parece que se pueden considerar iguales. No obstante es necesario, como siempre, recurrir al cálculo de áreas.

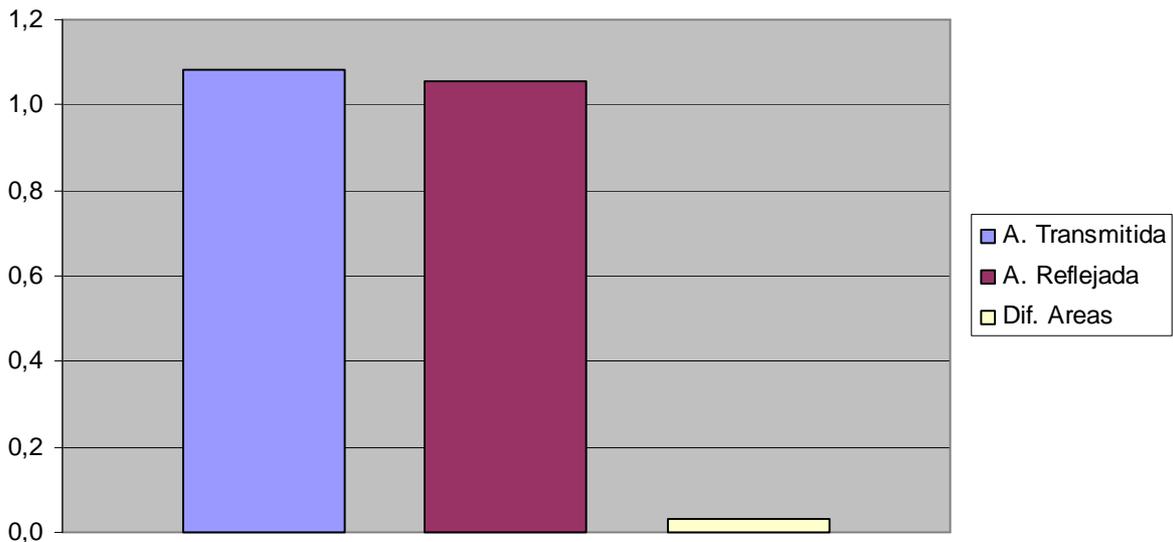


Figura 4.64 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
1,08 E+06	1,05 E+06	3 E+04	2,77

Según los resultados obtenidos, las ondas pueden considerarse iguales al ser la diferencia entre ellas menor del 10%.

A partir de este plano se producirá el cruce de ondas provocando que la longitud y magnitud de las ondas se anulen entre sí. Evidentemente, este hecho hará que las áreas de las ondas posteriores a este plano sean menores y, por ello, puede detectarse cuando se ha producido el cruce de ondas.

5. Plano 75%

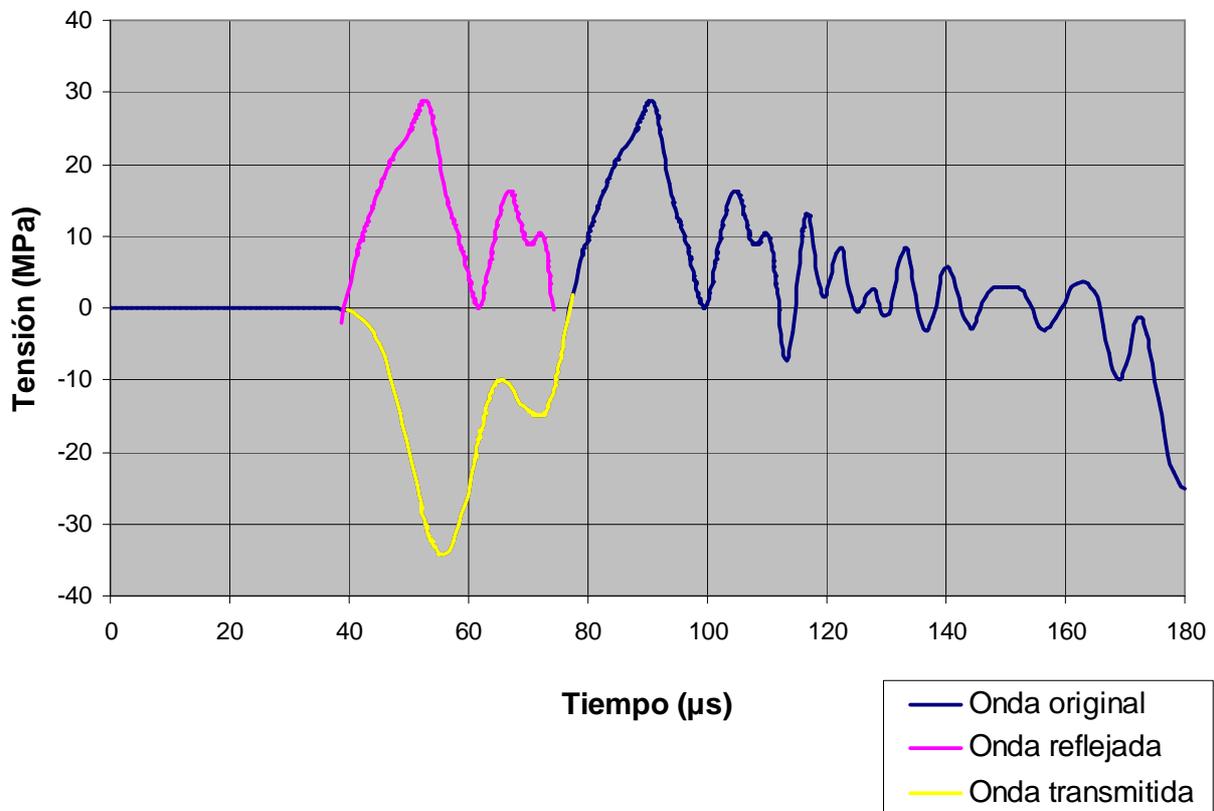


Figura 4.65 Tensión-Tiempo

Como puede observarse en la Figura 4.65, en este plano, se ha producido el cruce de ondas. Las consecuencias pueden observarse claramente si se compara esta onda con del plano anterior. Mientras la longitud de onda anterior era de aproximadamente $50\mu\text{s}$, en este caso se ve reducida a $36\mu\text{s}$. Sucede lo mismo con la magnitud de la onda reflejada, el máximo se ha visto reducido de 34MPa a $29,7\text{MPa}$.

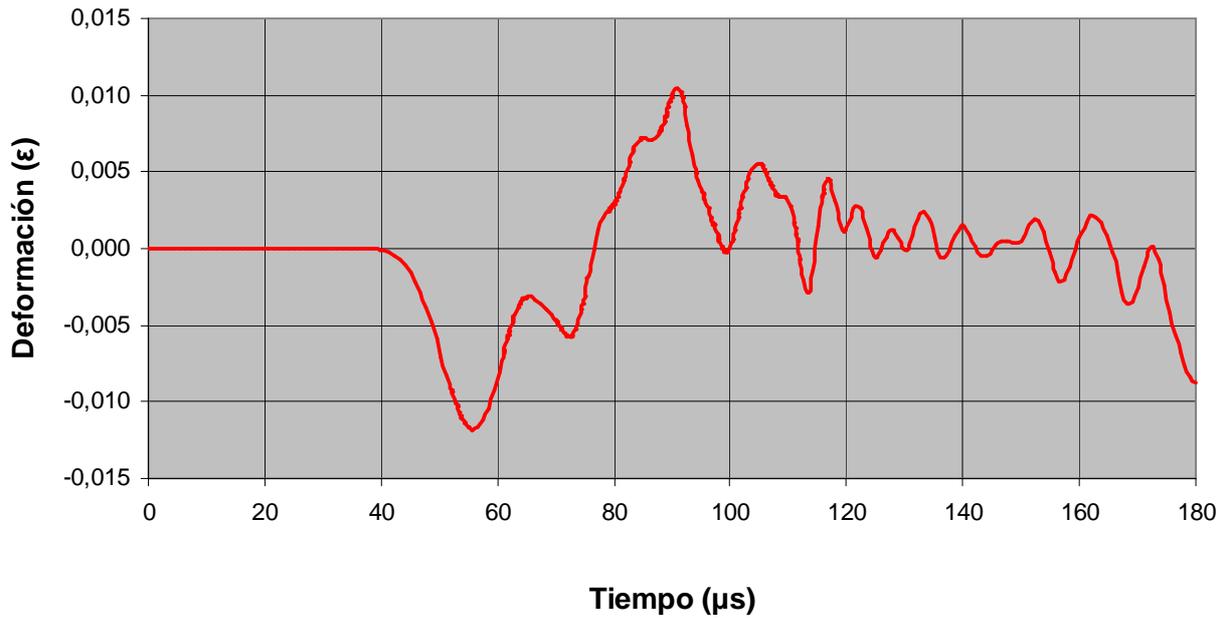


Figura 4.66 Deformación-Tiempo

También pueden comprobarse las consecuencias del cruce de ondas en esta gráfica, donde el valor de la deformación se ha visto reducido de 0,012ε a 0,01ε.

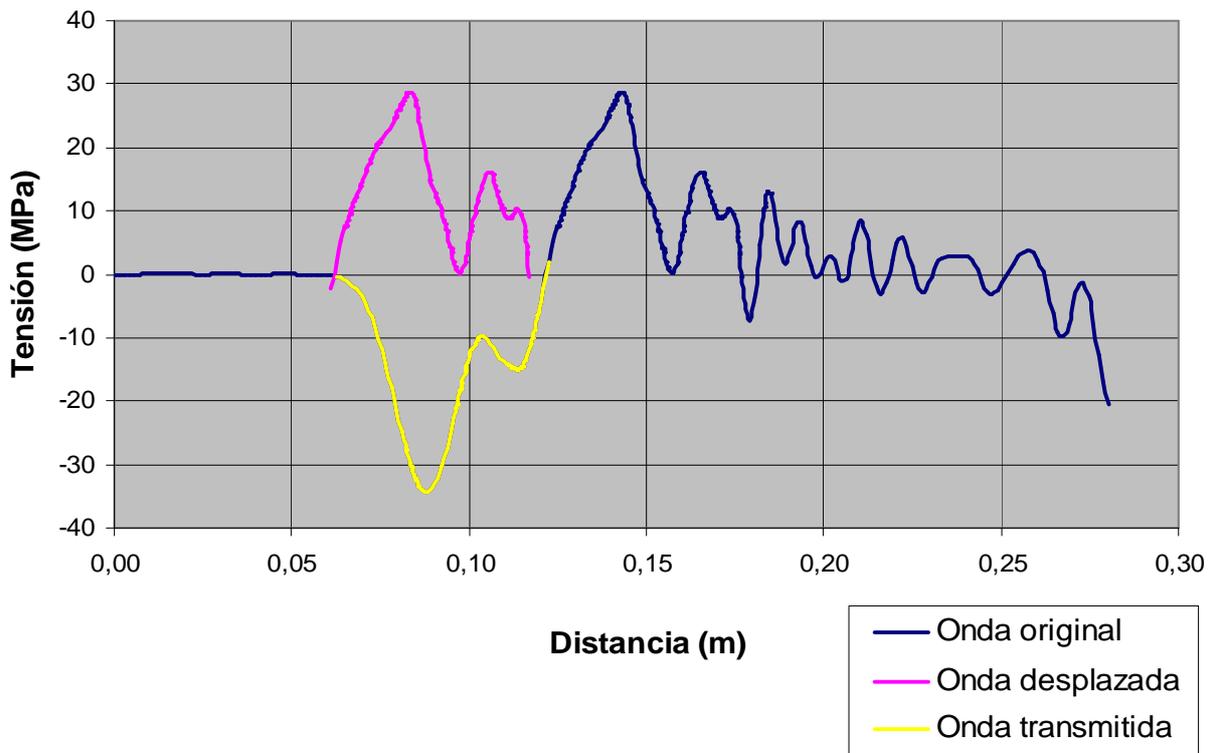


Figura 4.67 Tensión-Distancia

Al hacer la superposición de la onda reflejada sobre la transmitida se puede comprobar cómo la forma y la magnitud de las ondas difieren bastante entre sí, no así la longitud, que resulta ser bastante parecida. Visualmente parece que no pueden considerarse ondas iguales, pero se ha de recurrir al cálculo de áreas para corroborarlo.

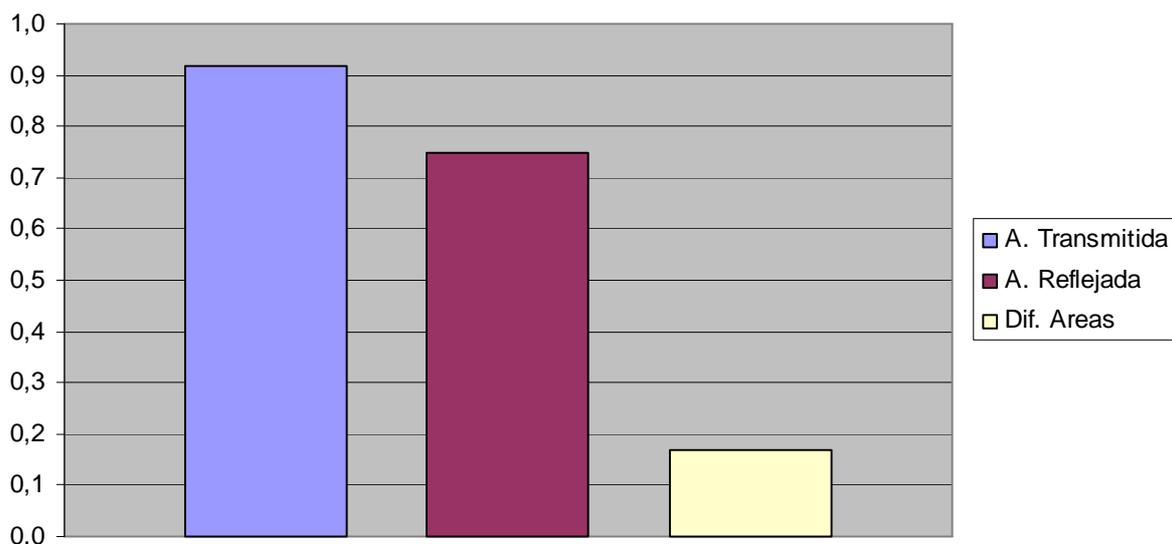


Figura 4.68 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
9,17 E+05	7,47 E+05	1,69 E+05	18,5

Como se esperaba tras la visualización de la Figura 4.67, la diferencia entre ondas es mayor del 10%, por lo que no se pueden considerar iguales.

4.4.4 Flyer de Acero Ø10x2mm

En este caso, la tensión transmitida será la misma que en el caso anterior:

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.235 \cdot 404.6 \text{MPa} = \boxed{36 \text{MPa}}$$

Sin embargo, la longitud de onda teórica se ve reducida al utilizarse un flyer de menor espesor:

$$\lambda = \frac{2 \cdot t}{C} = \frac{2 \cdot 2 \times 10^{-3} \text{m}}{5188 \text{m/s}} = \boxed{0.77 \mu\text{s}}$$

Si en el caso anterior el valor de las tensiones σ_{22} y σ_{33} roza el límite para que el ensayo pueda considerarse válido, en este caso, es de esperar que el valor de dichas tensiones aumente debido a las perturbaciones introducidas invalidando el ensayo.

1. Plano de choque

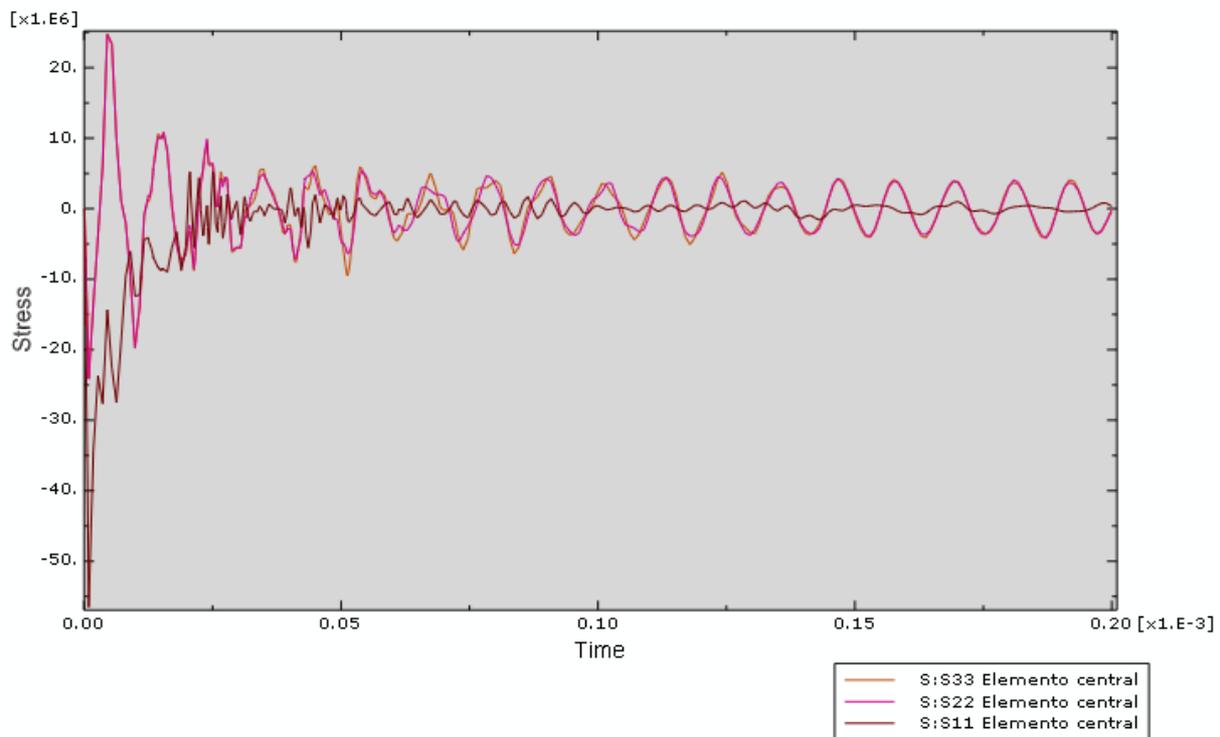


Figura 4.69 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Como puede observarse en la Figura 4.69, en este caso sucede lo mismo que en el apartado 4.4.1, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor de 4MPa, si bien es cierto que en esta ocasión se utiliza un flyer de 2mm de espesor en vez de 5mm. Por analogía con el caso anterior, este hecho hace pensar que el ensayo no será válido.

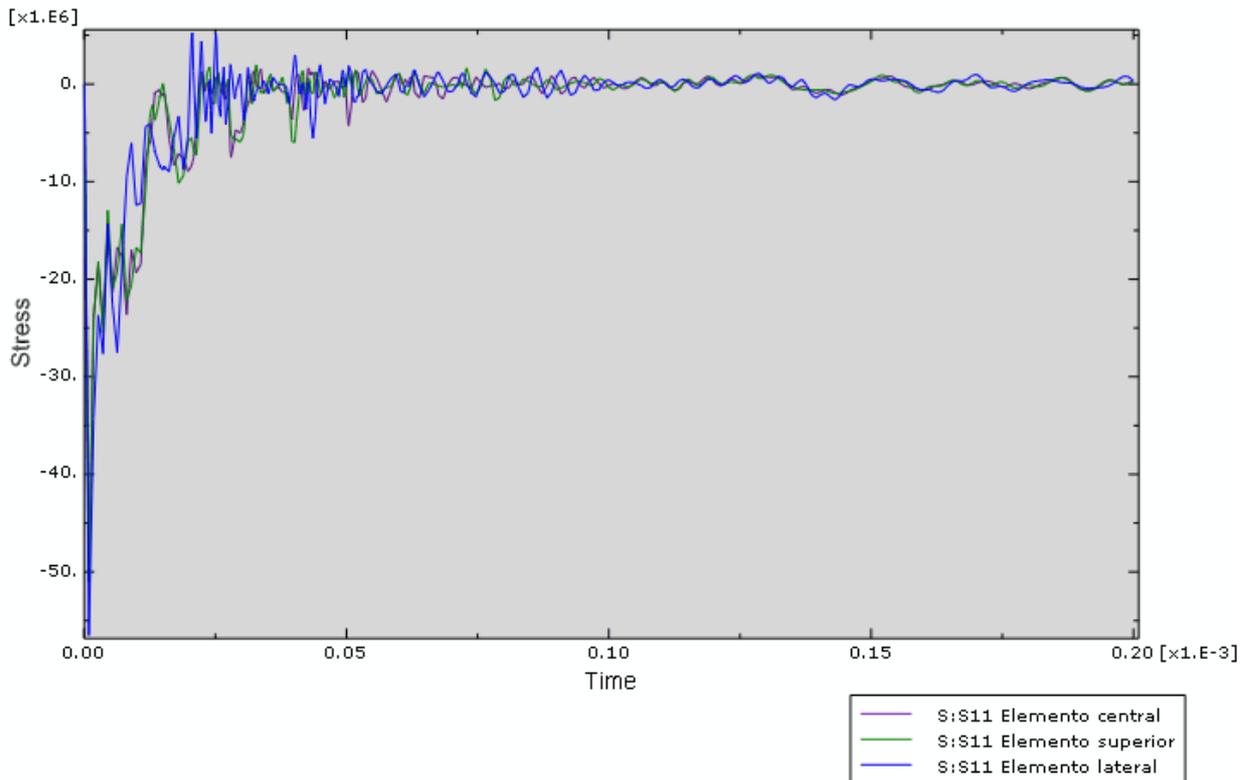


Figura 4.70 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Como ha sucedido en todas las simulaciones con flyers de la misma sección que la probeta, el contacto entre caras es total, lo que provoca que las tensión σ_{11} sea la misma en todos los elementos de la cara. Sin embargo, la magnitud de esta tensión se aleja mucho de la teórica (21,7) debido a la importancia que cobran de las tensiones σ_{22} y σ_{33} debido a las perturbaciones por lo que, como ya se ha mencionado, este ensayo no es válido.

4.4.5 Comparación diámetro del proyectil

De todas las simulaciones realizadas en este apartado, la única que ha resultado ser válida para llevarla al laboratorio es la del flyer de acero de $\varnothing 10 \times 5$ mm, por lo

que lo más lógico es realizar una comparación entre este ensayo y un homólogo al descrito pero que utilice un flyer de $\text{Ø}20 \times 5 \text{mm}$.

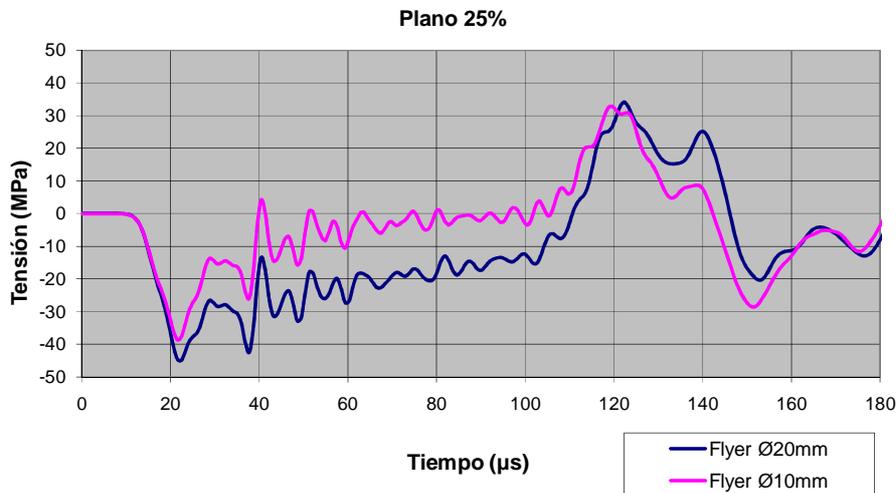


Figura 4.71 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de acero de $\text{Ø}20 \times 5 \text{mm}$ y $\text{Ø}10 \times 5 \text{mm}$.

Plano 25%

Como se puede observar en la Figura 4.71, el flyer de $\text{Ø}10 \times 5 \text{mm}$ transmite una onda cuyos valores se aproximan más a los teóricos, esto se debe a la reducción del efecto envolvente ya comentado anteriormente.

La magnitud de la onda transmitida por el flyer $\text{Ø}10 \times 5 \text{mm}$ es de 35,4MPa frente a los 43,4MPa del flyer $\text{Ø}20 \times 5 \text{mm}$, teóricamente la onda debería ser de 36MPa. Por otro lado, como se puede observar en la gráfica, aunque ninguna de las longitudes de las ondas se aproxima a la teórica, el flyer de menor diámetro transmite una onda mucho más corta, con lo que el valor se aproxima más al teórico.

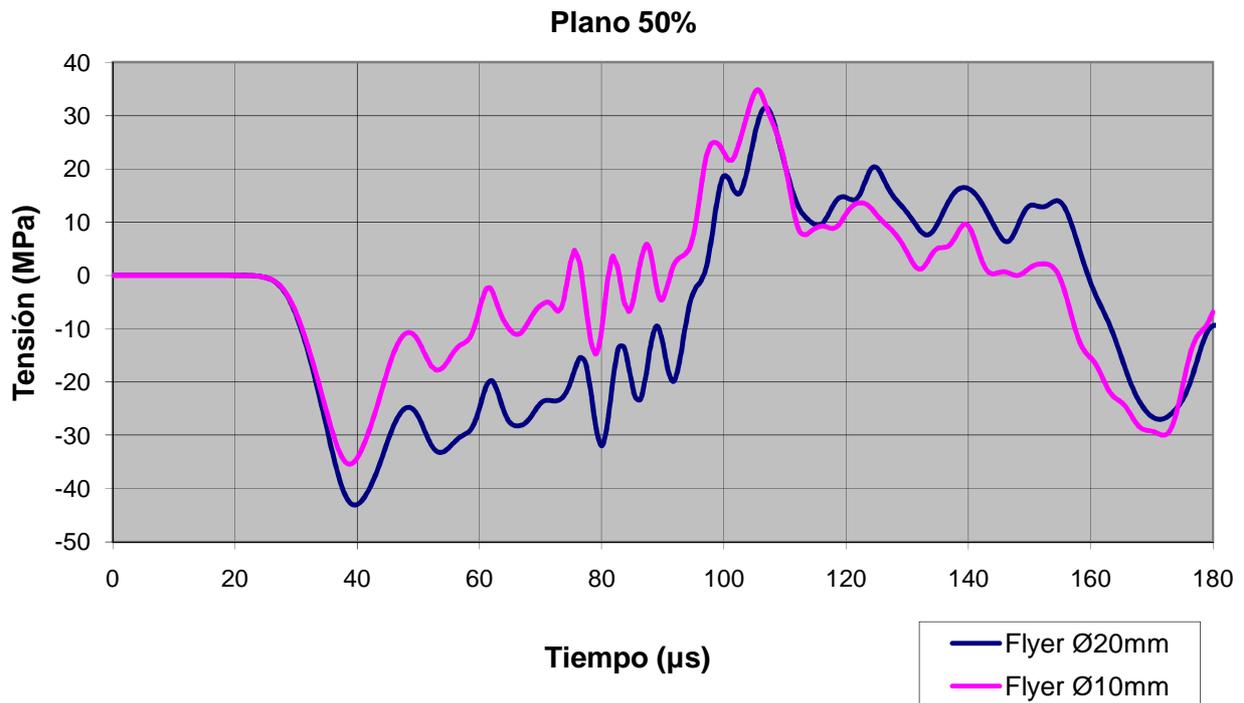


Figura 4.72 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto de flyers de acero de $\text{Ø}20 \times 5 \text{ mm}$ y $\text{Ø}10 \times 5 \text{ mm}$.
Plano 50%

La Figura 4.72 muestra como se ha producido el cruce de ondas en la onda transmitida por el flyer de $\text{Ø}20 \times 5 \text{ mm}$ (debido a la mayor longitud de ésta) mientras que en la onda transmitida por el flyer de $\text{Ø}10 \times 5 \text{ mm}$ aún no se ha llegado a producirse. Este hecho pone de manifiesto lo importante que es obtener ondas estables para realizar este tipo de ensayos evitando así registrar resultados falseados.

4.4.6 Conclusión

Si bien es cierto que en los ensayos realizados en este apartado era imposible que se produjera efecto envolvente del flyer sobre la probeta, en algunos de los casos estudiados, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren valores importantes invalidando el ensayo. En esta ocasión, este hecho se debe a que, ya sea por el material o por el espesor del flyer, el impacto produce en éste deformaciones

que introducen tensiones direcciones diferentes a la del eje longitudinal de la probeta, como muestra la Figura 4.73.

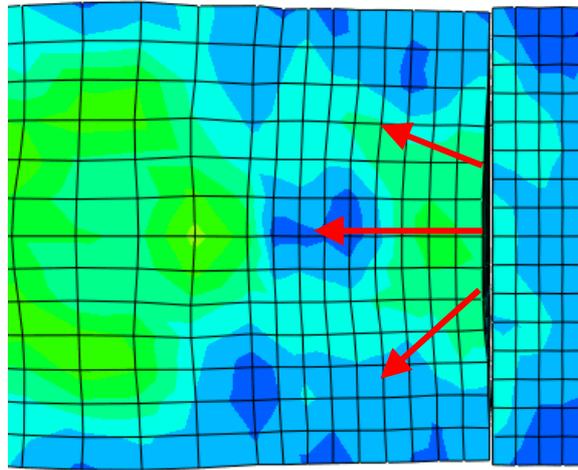


Figura 4.73 Deformación flyer-probeta

Como se ha podido comprobar en el apartado 4.4.3, con un **flyer de acero de Ø10x5mm se obtiene una onda en la que se pueden despreciar los efectos de las tensiones σ_{22} y σ_{33} aceptando la hipótesis de propagación unidimensional y haciendo válido el ensayo.**

El valor de la tensión en este ensayo se aproxima mucho al teórico pero sin llegar a serlo (34,9MPa frente a 36MPa), no así el de la longitud de la onda que difiere bastante del valor obtenido mediante las fórmulas que definen la propagación unidimensional de ondas.

Se ha de aclarar que nunca se podrán alcanzar los valores teóricos ya que la teoría sólo existe tensión en la dirección longitudinal de la probeta haciendo nulas las demás, mientras que en la realidad, por muy perfecto que se sea el ensayo, siempre existirán parámetros que introducirán tensiones en las demás direcciones como por ejemplo:

- Imperfecciones en el material que evitan el paralelismo entre caras.
- Pequeños desalineamientos en el impacto.
- Errores de montaje y/o de ejecución

Del mismo modo, el análisis de elementos finitos tampoco dará los mismos resultados que los teóricos ya que el modelo utilizado no refleja con total fidelidad el modelo real sino que se ha simplificado:

- El material se ha definido como elástico lineal, es decir, su curva σ - ϵ es una línea recta en la que no existe zona plástica ni criterios de daño, mientras que en la realidad el material tiene defectos y varía su comportamiento con el daño sufrido en el impacto.
- Se conoce el módulo elástico del material en condiciones estáticas, pero no en condiciones dinámicas. Esto puede hacer variar mucho los resultados de longitud de onda ya que según la ecuación (3.1), la longitud de onda depende de la velocidad de propagación de ondas en el seno del material, y según la fórmula (2.1), ésta depende directamente del módulo elástico del material.
- Las tensiones en las direcciones perpendiculares al eje longitudinal de la probeta influyen tanto en la magnitud como en la longitud del frente de ondas transmitido. Se han estimado y comprobado qué valores de estas tensiones pueden despreciarse para considerar el ensayo válido, pero es necesario comprobar dichas estimaciones teóricas con los datos reales.

Se han tomado estas simplificaciones por ser un primer modelo en el que se desconocía totalmente el comportamiento que iban a tener los elementos. Así, tras la realización de todas las simulaciones, se tiene conocimiento de qué factores son los más influyentes en los ensayos y se puede actuar directamente sobre ellos en el laboratorio.

4.5 Influencia del ángulo de impacto

En este capítulo se analizará la importancia que supone que el flyer impacte sobre la probeta con cierto ángulo (ver Figura 4.74), es decir, qué variación se obtiene en los resultados cuando el choque entre las caras no es completamente paralelo y, si ésta es aceptable, seguir considerando el ensayo válido. En este apartado, no se deben tener en cuenta las condiciones impuestas inicialmente sobre la propagación unidimensional de ondas, ya que si el impacto es oblicuo, es imposible que se cumplan.

Las simulaciones se han realizado sobre probetas de sección cilíndrica de $\varnothing 10 \times 100 \text{mm}$ y con flyers de acero de $\varnothing 10 \times 5 \text{mm}$ que, según lo expuesto en los apartados anteriores, es el modelo FEM que más se acerca a los resultados teóricos y en el que puede considerarse que se produce propagación unidimensional de ondas. Además, al ser un modelo simétrico sobre su eje axial, la variación que se produzca será la misma tanto si el flyer rota sobre su eje vertical como si lo hace sobre el horizontal.

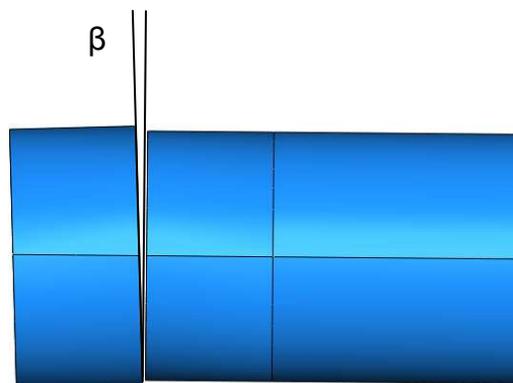


Figura 4.74 Ángulo entre caras en el momento del impacto

La forma de analizar este tipo de ensayos no va a ser la misma que la utilizada hasta el momento ya que el impacto en estos casos se producirá primero en los elementos exteriores de un lado de la probeta. A partir de ahí, el flyer irá corrigiendo su posición hasta contactar con toda la superficie de la probeta y rebotar en el lado opuesto al que se inició el contacto. Debido a éste fenómeno

las tensiones de los elementos analizados no serán tan similares como en los casos anteriores, por lo que para comprobar la validez del ensayo se va a comparar:

- Tensión σ_{11} del elemento central, superior y lateral.
- Tensión σ_{22} del elemento central, superior y lateral.
- Tensión σ_{33} del elemento central, superior y lateral.
- Tensiones σ_{11} , σ_{22} y σ_{33} del elemento central.

Con estas gráficas se obtienen los datos suficientes para comparar la diferencia que existe cuando el impacto es totalmente plano o cuando existe cierto ángulo entre probeta y flyer. Además, se podrá cuantificar la diferencia de tensiones existente entre la parte central de la probeta y su caras exteriores, así se podrá determinar si la colocación de las galgas extensométricas registrará datos correctos o no.

4.5.1 Desalineamiento probeta-flyer de 1º

1. Plano de choque

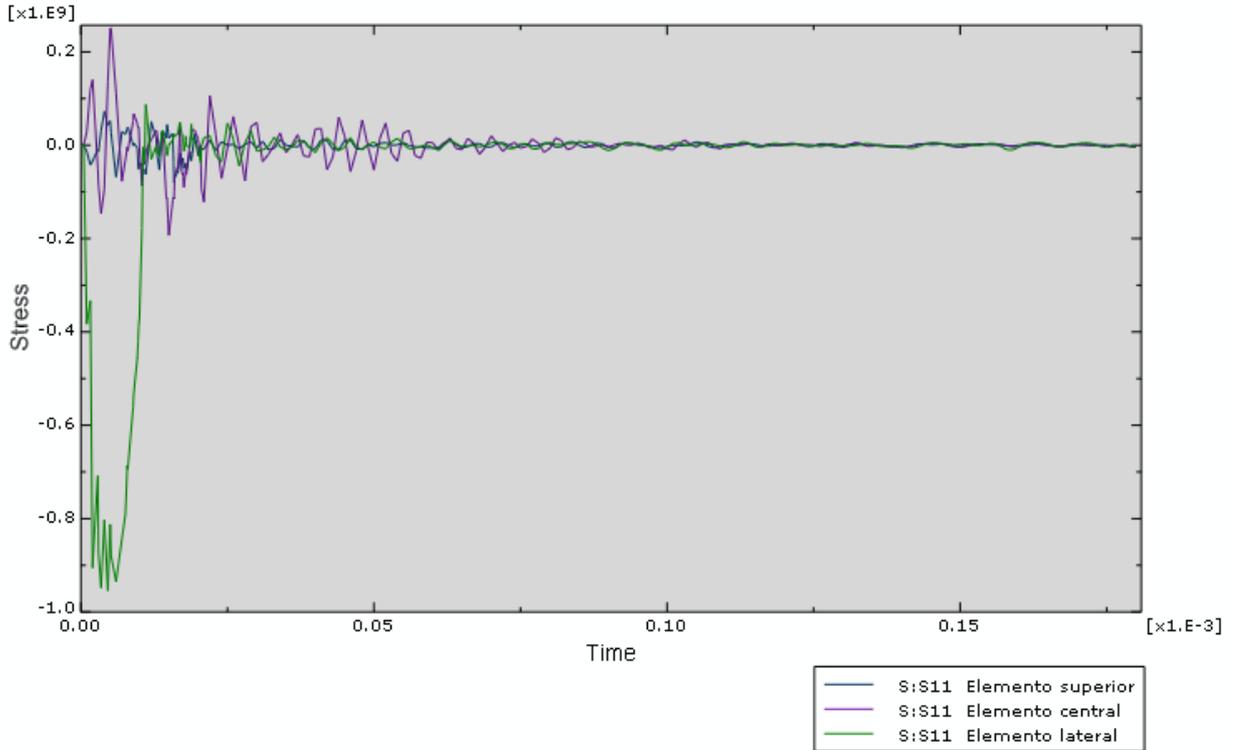


Figura 4.75 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Como se puede observar en la Figura 4.75 el elemento lateral sufre la mayor compresión debido a que es el que recibe el impacto del flyer. Al propagarse la onda por el sólido, se transmiten las tensiones a los demás elementos, de ahí los picos de tensión en los elementos central y superior. Posteriormente, se producirá el contacto total del flyer con el resto de elementos.

Impresiona la magnitud de la tensión obtenida en el elemento lateral con respecto a las magnitudes obtenidas en las simulaciones anteriores. Sin embargo, este es el resultado obtenidos de aplicar la tensión en un único punto en vez de distribuida en un área, como ocurría en el caso de contacto total entre caras, el resultado obtenido es prácticamente el teórico:

$$\sigma_I = \pm \rho_{Ac} \cdot C_{Ac} \cdot V_{IMPACTO} = 7800 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5188 \frac{m}{s} \cdot 20 \frac{m}{s} = \boxed{809MPa}$$

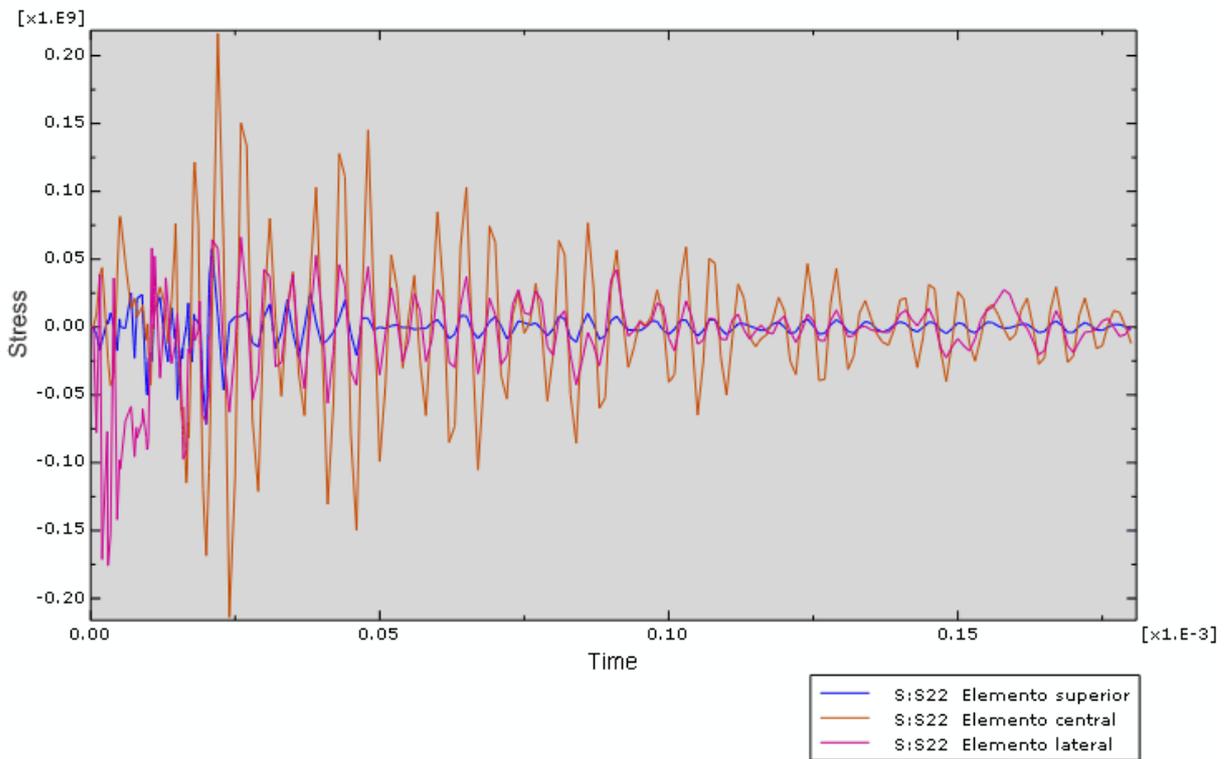


Figura 4.76 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

La Figura 4.76 muestra las tensiones σ_{22} de los elementos, como se puede observar, existe un pico inicial de tensión $\sigma_{22}=80\text{MPa}$ en el elemento lateral coincidente con el pico de $\sigma_{11}=815\text{MPa}$ debido a que el impacto oblicuo introduce directamente tensiones en estas dos direcciones.

Se puede observar también como el elemento central sufre un pulso cíclico que va decreciendo con el tiempo. Esto hecho se debe a que, al ser el impacto oblicuo, se transmite una onda en la dirección 22 que va reflejándose en las paredes laterales de la probeta (ver Imagen 1) y que al atravesar el elemento central produce dichos ciclos. A medida que este pulso se aleja del plano analizado la magnitud de estos ciclos decrece.

Como era de esperar, con impacto oblicuo, la tensión σ_{22} es bastante elevada en todos los elementos, más en el elemento central que en el superior ya que éste está alineado diametralmente con el lateral (línea de transmisión de esfuerzos).

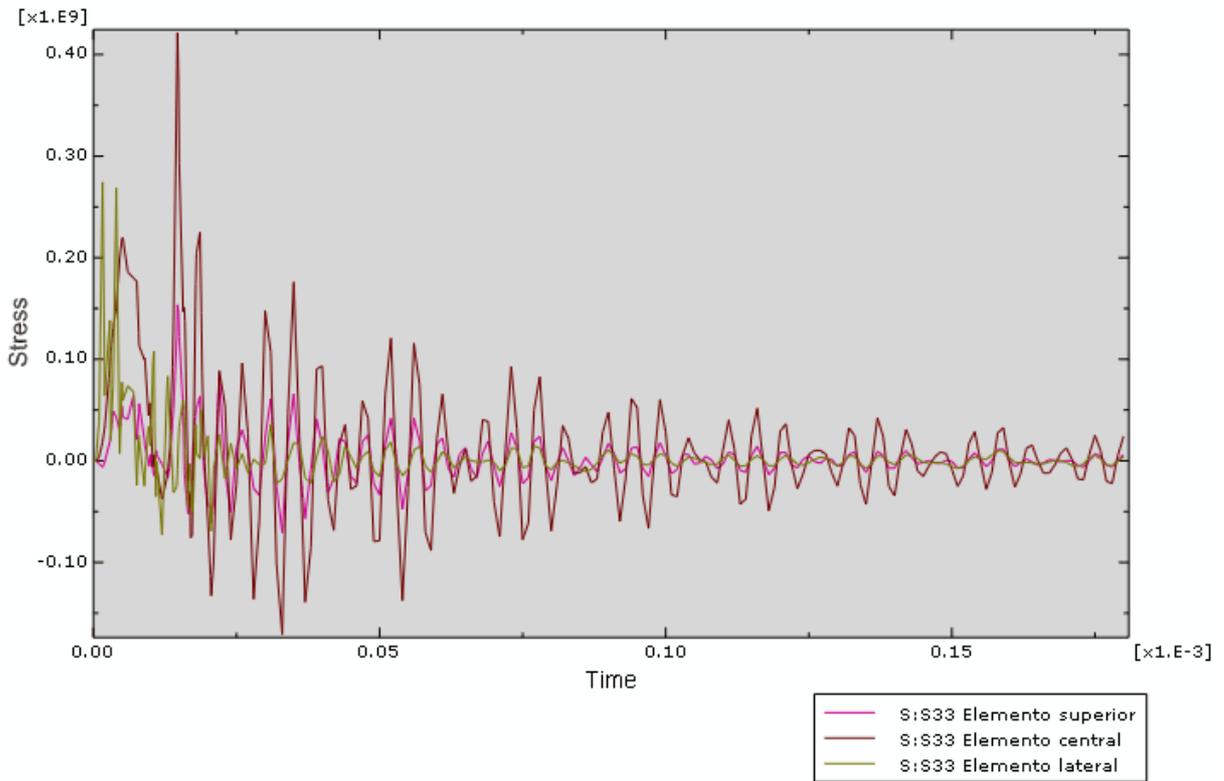


Figura 4.77 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 4.77 muestra una tensión σ_{33} bastante elevada ya que, si las tensiones σ_{11} y σ_{22} lo son, por efecto Poisson, la tensión σ_{33} también lo será. Aunque el mayor pico de esta tensión visible en la gráfica pertenezca al elemento central, en realidad, la mayor magnitud media se encuentra en el elemento lateral ya que es el que recibe el impacto del flyer. En este caso, el elemento central también sufre el pulso cíclico comentado anteriormente.

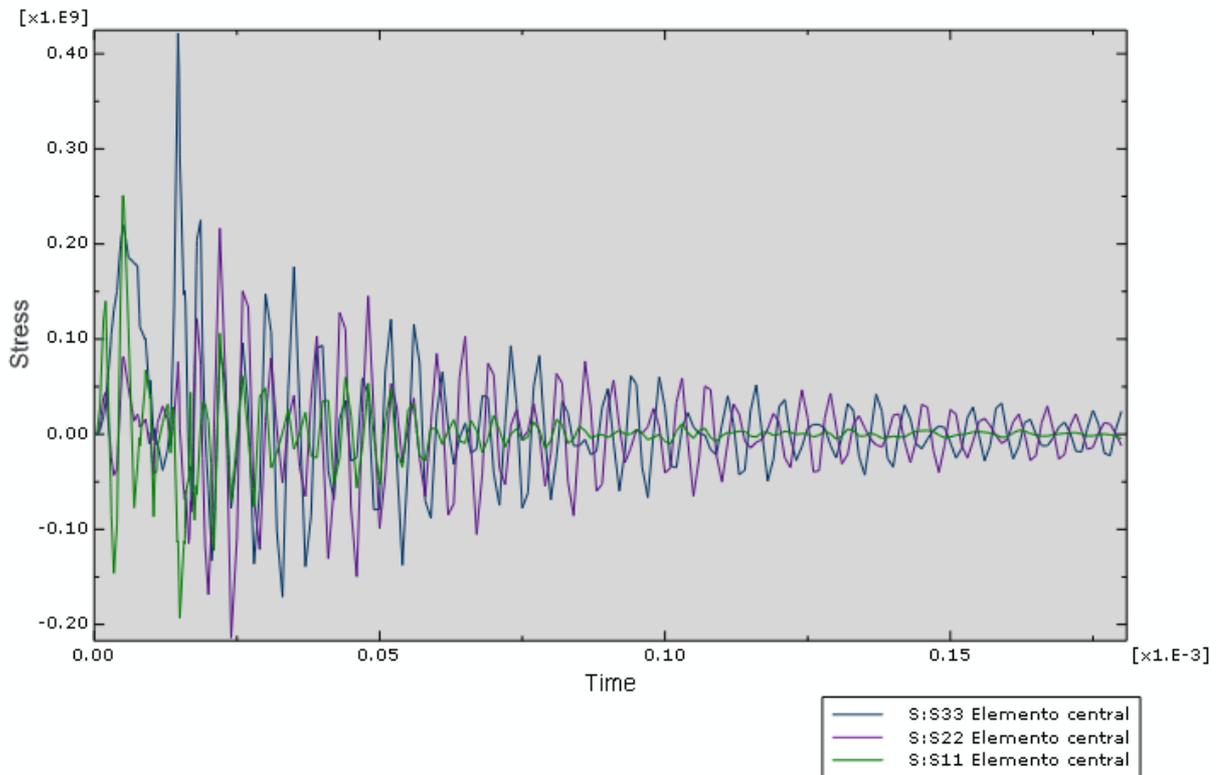


Figura 4.78 Tensiones del elemento central

En esta gráfica se muestran las tensiones del elemento central, como se puede observar, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante con respecto a σ_{11} y, además, no terminan por disiparse. Sin embargo, en este plano no se puede sacar información útil para el análisis debido a que existen demasiadas perturbaciones, por lo que habrá que analizar los planos posteriores.

2. Plano 25%

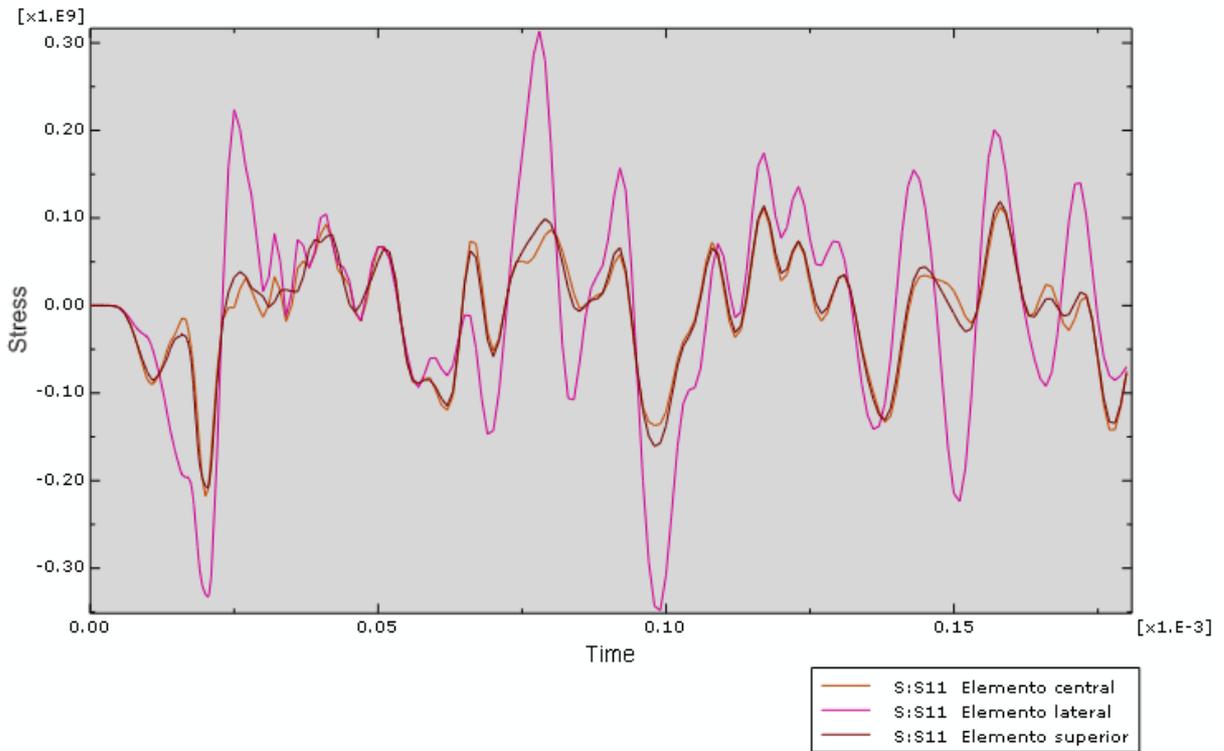


Figura 4.79 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 4.79 muestra como las tensiones de todos los elementos siguen el mismo perfil de ondas, ya que el frente de ondas se estabiliza y avanza todo junto. Sin embargo, se diferencia perfectamente que el elemento que recibe el impacto es el lateral ya que la magnitud de la tensión σ_{11} en este elemento es mayor que en los otros dos.

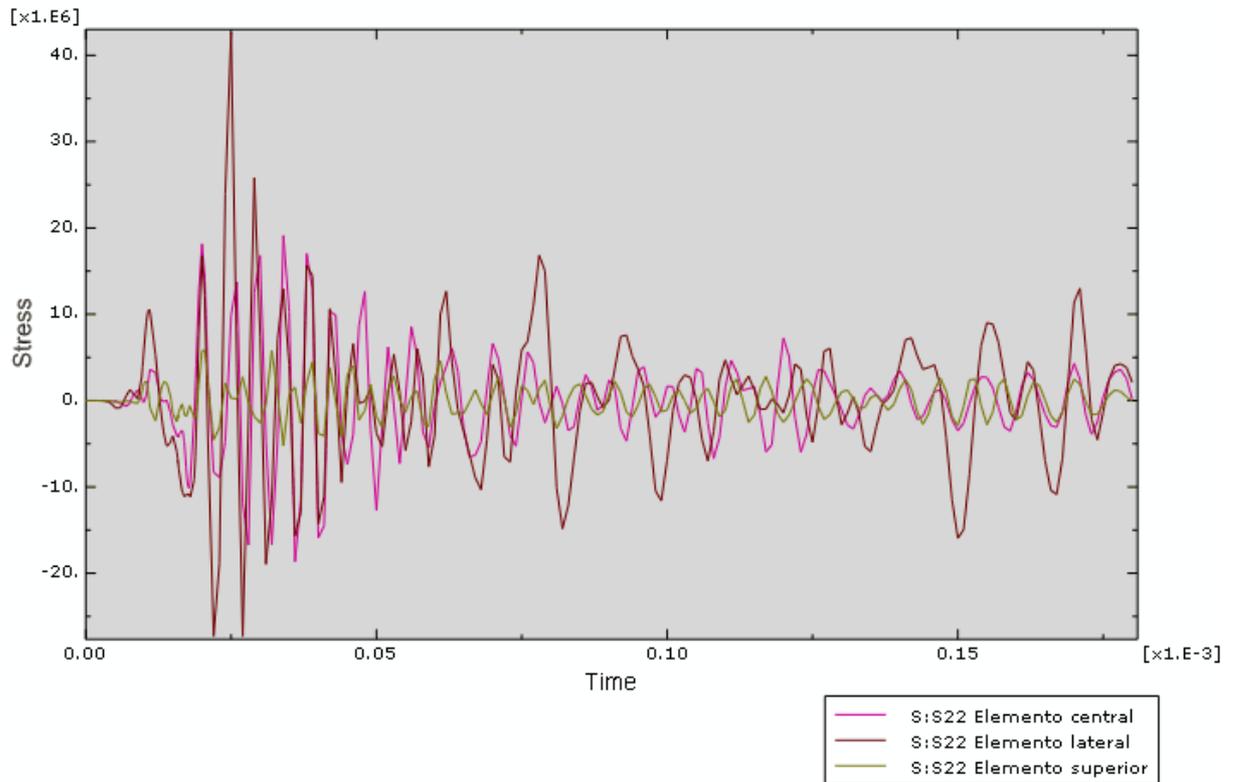


Figura 4.80 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

El valor de la tensión σ_{22} es la suma de dos componentes, la tensión directa introducida por el impacto oblicuo y la provocada por efecto Poisson a partir de la tensión σ_{11} .

Al igual que sucedía en el plano anterior, la tensión σ_{22} del elemento superior es muy inferior a la de los elementos lateral y central debido a que, como se ha mencionado anteriormente, es el elemento más alejado de la línea de transmisión de esfuerzos. Se observa además que, exceptuando algunos picos, la tensión en el elemento central y lateral es prácticamente la misma durante la primera parte de la gráfica, posteriormente la tensión en el elemento central va disipándose mientras que en el elemento lateral permanecen tensiones residuales.

Se observa también la reducción del pulso cíclico que sufría el elemento central ya que en los planos cercanos a la cara de impacto hay demasiadas perturbaciones, a medida que aumenta la distancia a esta cara, las ondas se

separan (una avanza más rápido que la otra) y las perturbaciones se reducen dando lugar a una onda más estable.

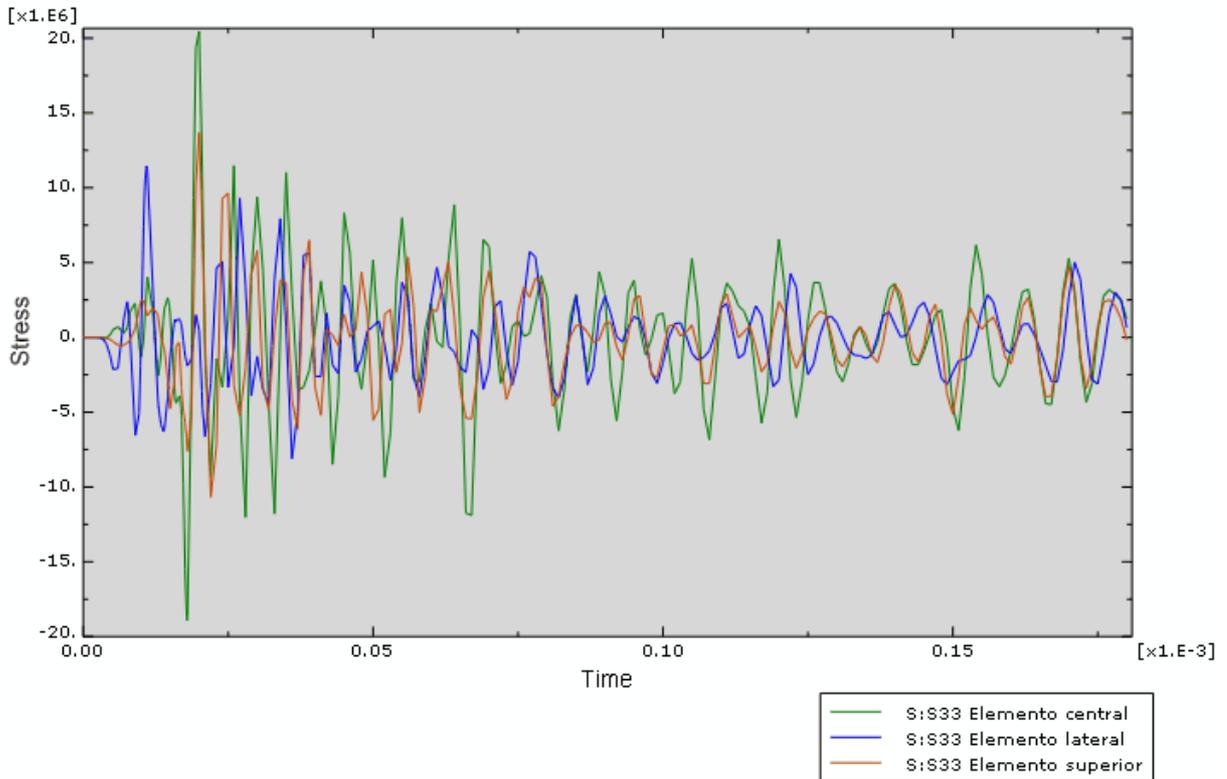


Figura 4.81 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Como se puede ver en la Figura 4.81, exceptuando algunos picos, la tensión en todos los elementos es muy similar debido a que el frente de ondas en este plano es más estable.

A diferencia de σ_{22} , σ_{33} se produce únicamente por efecto Poisson (de las tensiones σ_{11} y σ_{22} introducidas en el impacto), por ello tendrá un valor menor que σ_{22} pero mayor que en los casos de impacto plano, ya que tiene una mayor contribución.

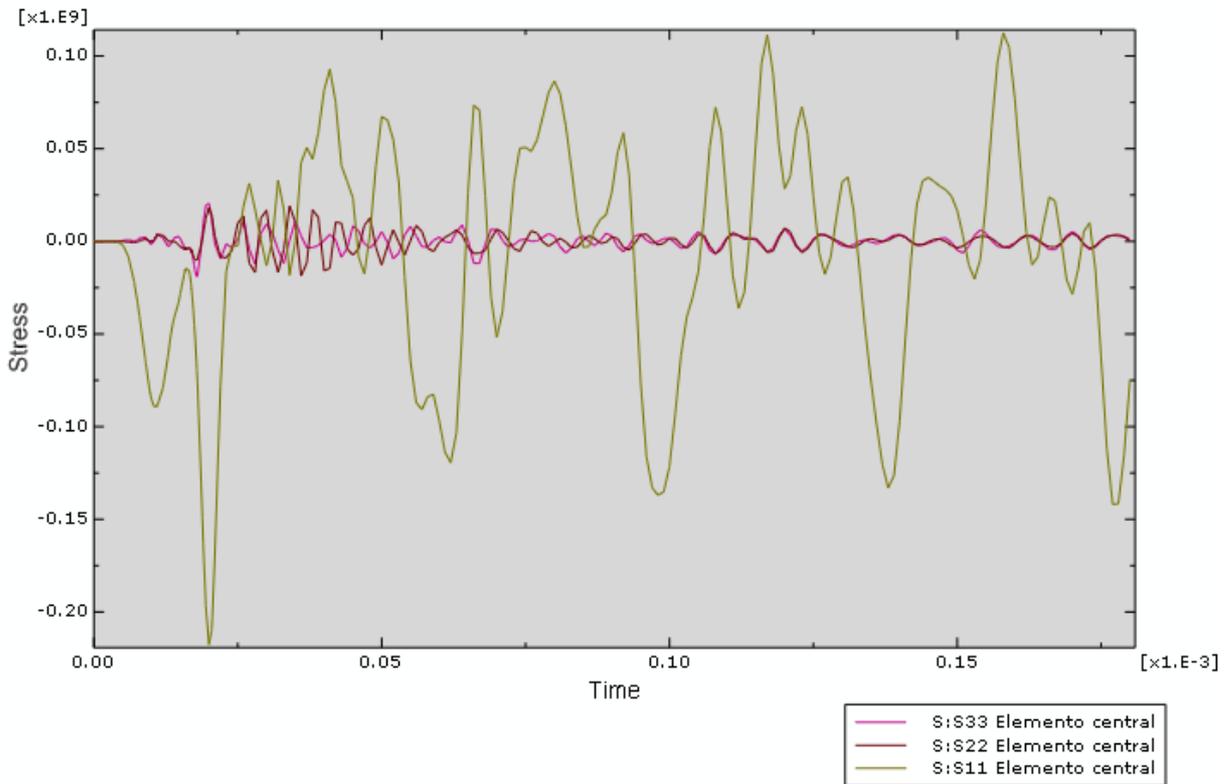


Figura 4.82 Tensiones del elemento central

Al observar las tensiones que se producen en el elemento central en este plano, se observa que el valor de las tensiones σ_{22} y σ_{33} es muy inferior al de la tensión σ_{11} . El valor de estas tensiones ronda los 10MPa, valor que en el caso de impacto plano (dónde σ_{11} era del orden de 35MPa) no podría despreciarse. Sin embargo, en el impacto oblicuo, el valor obtenido de σ_{11} es del orden de 80MPa, por lo que en este caso sí estaría justificado despreciar la existencia de dichas tensiones.

3. Plano 50%

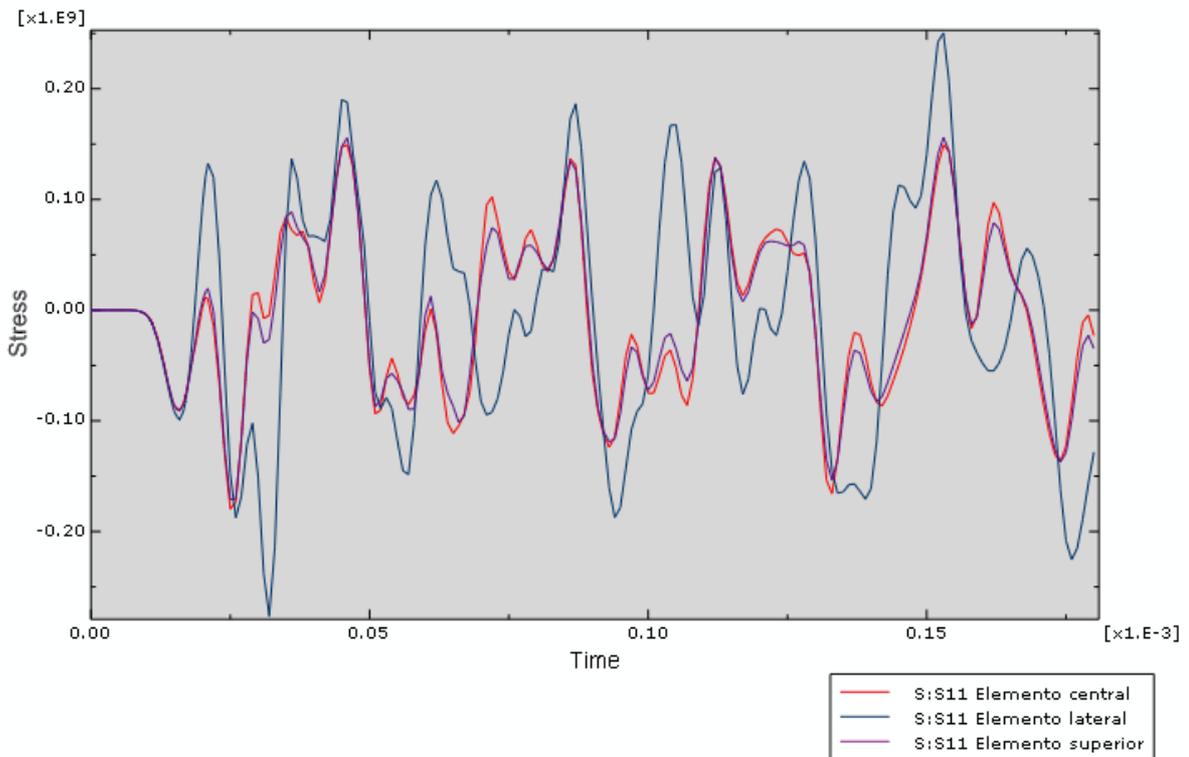


Figura 4.83 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Como sucede en los planos anteriores, la tensión σ_{11} en el elemento lateral es algo mayor al de los otros elementos debido a que es el que recibe el impacto. No obstante, al compararlo con el plano anterior se observa que esta diferencia es menor debido a que el frente de ondas se ha vuelto más estable.

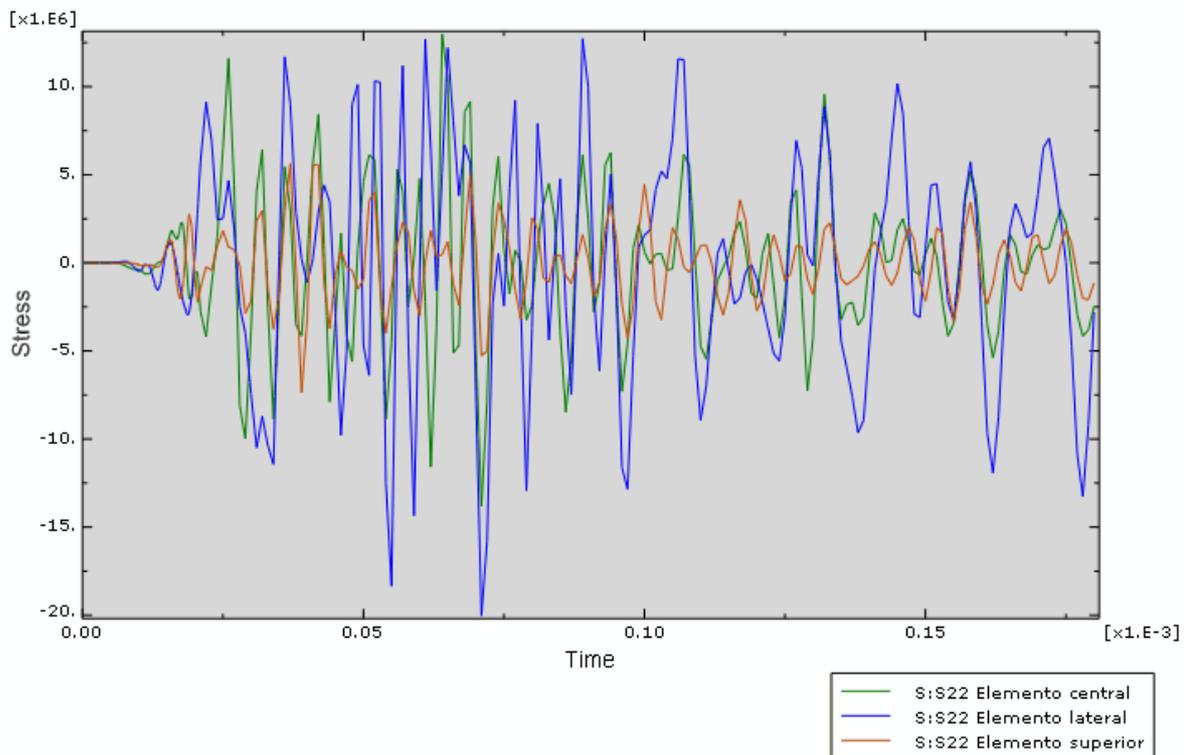


Figura 4.84 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

En la Figura 4.84 se observa como la tensión σ_{22} del elemento superior es, al igual que en los planos anteriores, menor que la de los otros elementos (del orden de la mitad), debido a que es el elemento más alejado de la línea de transmisión de esfuerzos.

La magnitud de esta tensión se mantiene constante con respecto a los otros planos, 10MPa aproximadamente para los elementos central y lateral, y 6MPa para el elemento superior. En el elemento central se disipa adquiriendo valores similares a los del elemento superior mientras que en el elemento lateral permanecen valores mayores debido a que es el elemento que recibe el impacto.

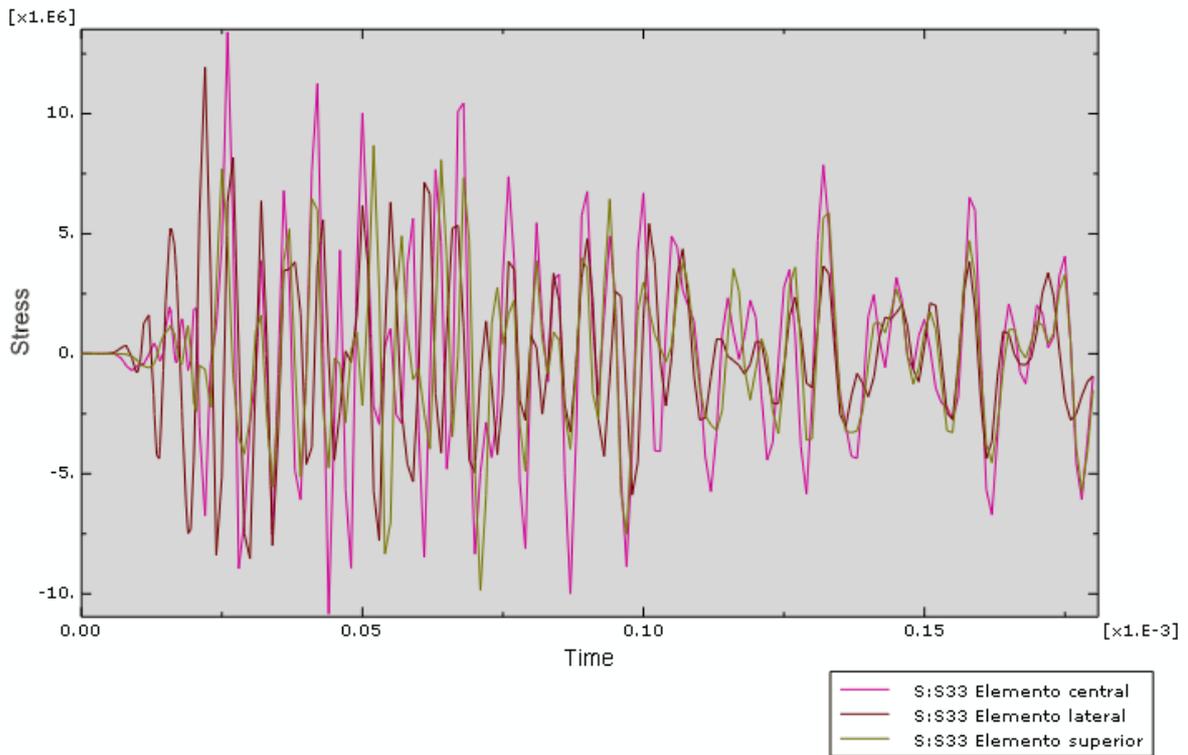


Figura 4.85 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 4.85 muestra como, excepto algunos picos, se puede considerar que existe la misma tensión en todos los elementos. Como se ha comentado anteriormente, esto se debe a que la tensión σ_{33} proviene únicamente del efecto Poisson, por lo que si la diferencia de tensión σ_{11} en los elementos es menor en este plano, también lo será la tensión σ_{33} .

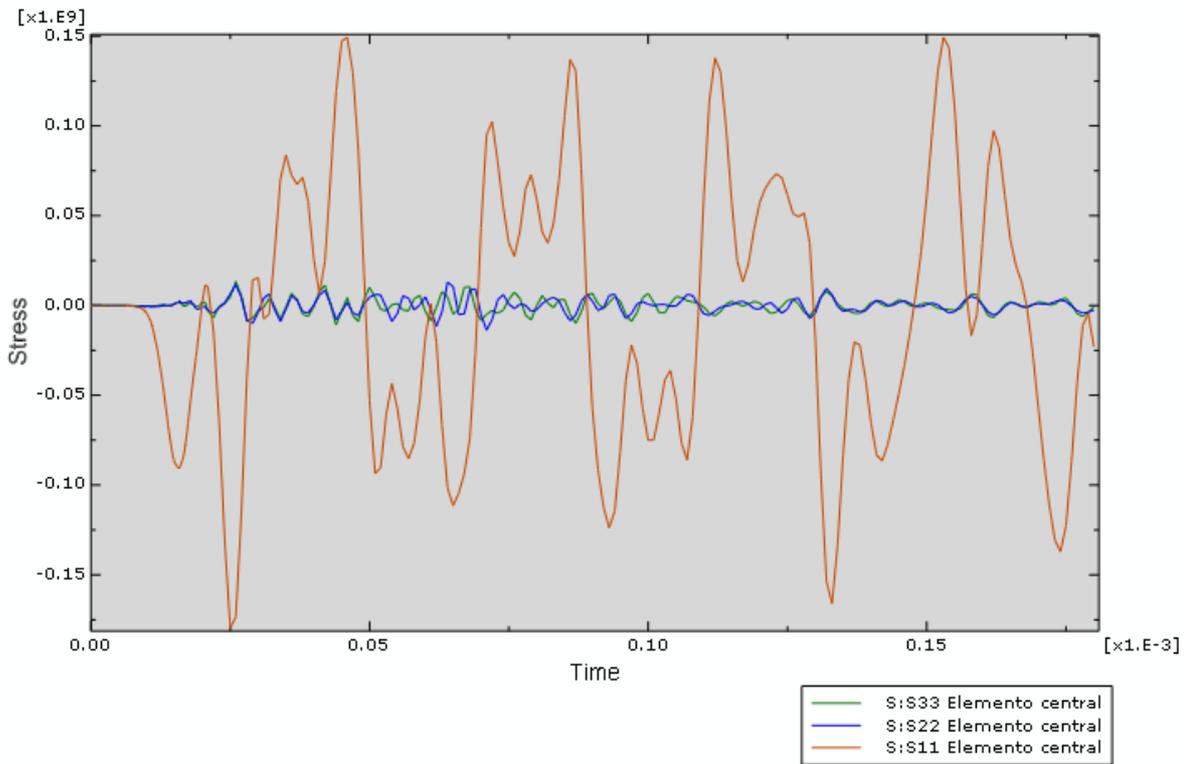


Figura 4.86 Tensiones del elemento central

Al comparar las tensiones del elemento central se observa que, al igual que en planos anteriores, la magnitud de la tensión σ_{11} es muy superior a la de σ_{22} y σ_{33} . Mientras que σ_{11} es de 80MPa aproximadamente, las tensiones σ_{22} y σ_{33} tienen un valor de 7MPa. Como se ha comentado, a diferencia del caso de impacto plano en este caso las tensiones σ_{22} y σ_{33} pueden considerarse despreciables frente a σ_{11} .

4. Plano 75%

A diferencia del caso de impacto plano, con impacto oblicuo se producen gráficas con tantas perturbaciones que no puede identificarse con claridad en qué momento se produce el cruce de ondas. Además en este plano, al igual que ocurre en el plano del 25%, por estar cerca de una cara libre (dónde se produce la reflexión de la onda transmitida) las perturbaciones aumentan.

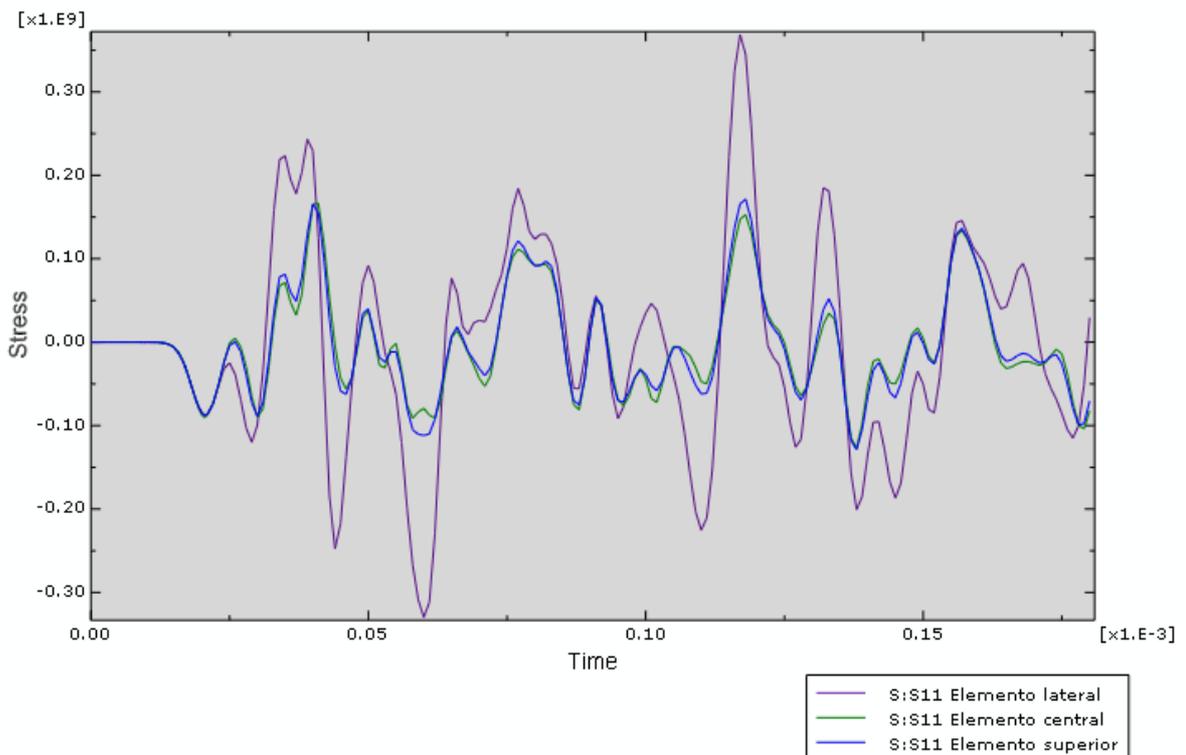


Figura 4.87 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 4.87 muestra como en este plano vuelve a producirse una diferencia considerable entre la magnitud de la tensión que se da en el elemento lateral y los otros dos. En este plano, las diferencias existentes entre las tensiones de los elementos aumentan, se produce una situación muy similar a la que del plano 25% ya que al ser un plano próximo a una cara libre las perturbaciones aumentan.

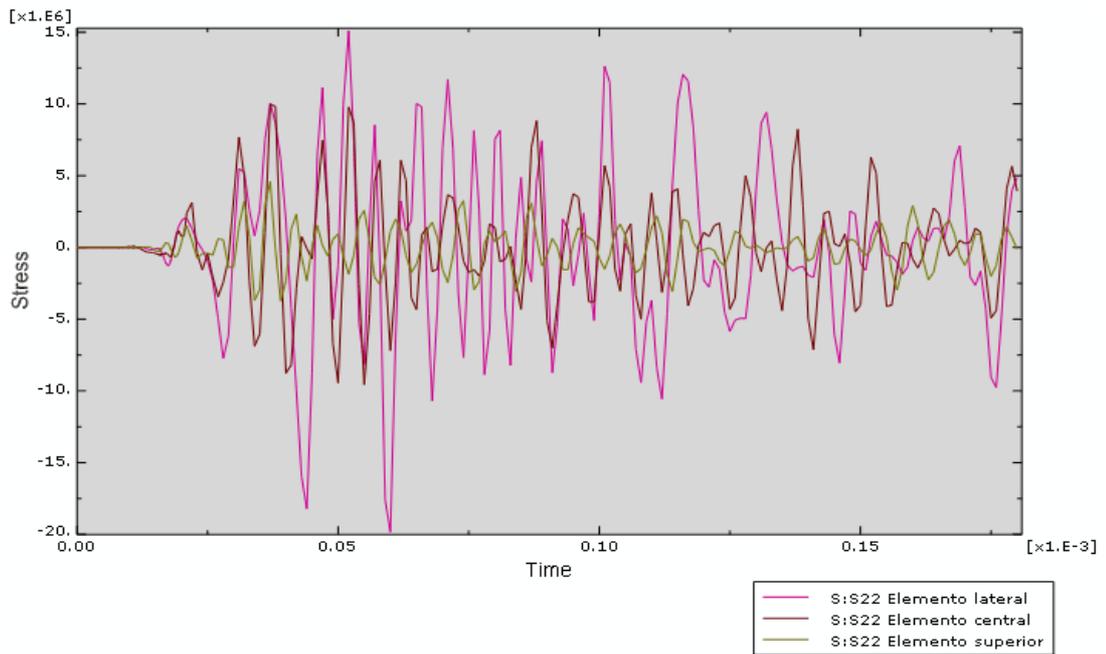


Figura 4.88 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Del mismo modo que sucede en los demás planos, la tensión σ_{22} de los elementos central y lateral es mayor que la del elemento superior debido a que éste es el más alejado de la línea de transmisión de esfuerzos.

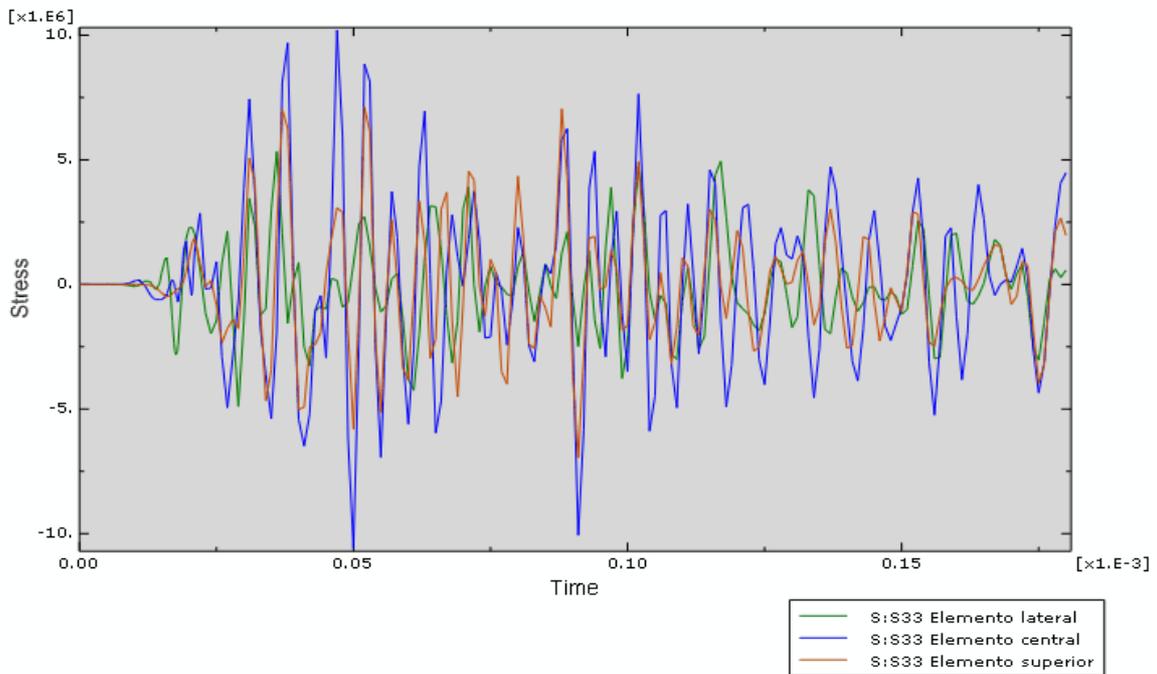


Figura 4.89 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Al comparar la tensión σ_{33} se observa que, al igual que sucede con la tensión σ_{11} , existe una mayor diferenciación de la magnitud existente en cada elemento volviendo a un estado similar al que existe en el plano del 25% de la longitud de la probeta.

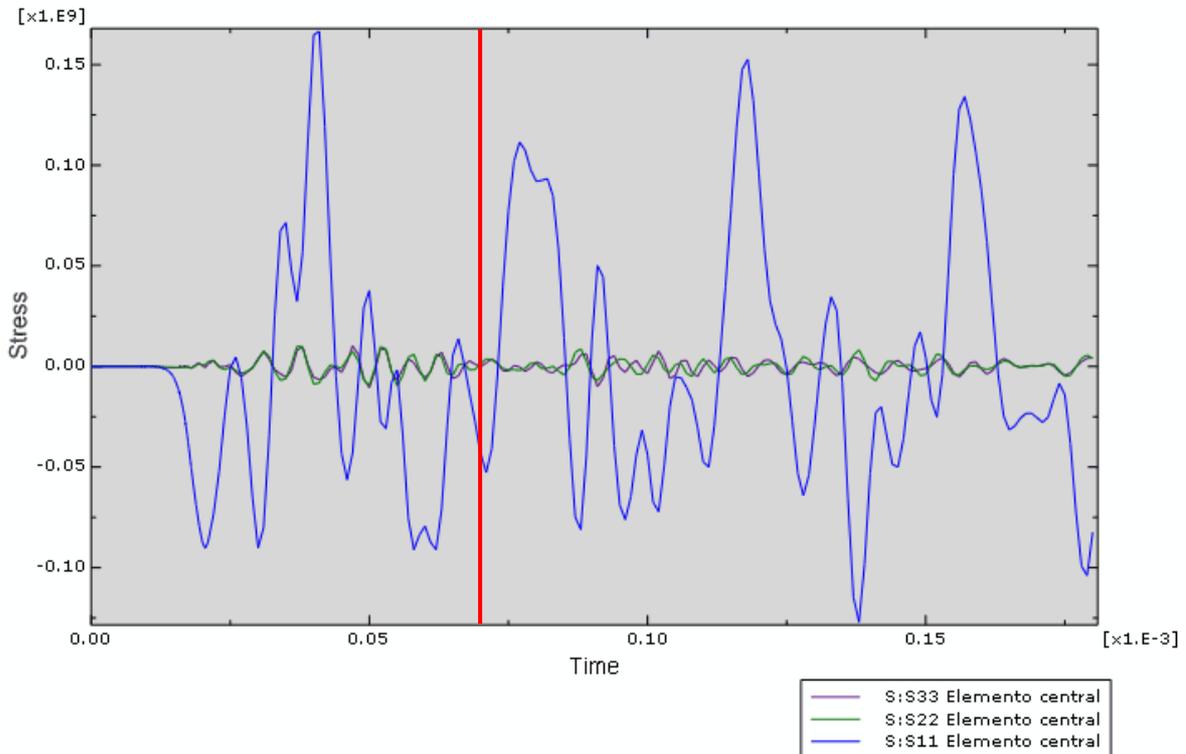


Figura 4.90 Tensiones del elemento central

La Figura 4.90 muestra con claridad como las tensiones σ_{22} y σ_{33} son insignificantes frente a la tensión σ_{11} . Comparando esta gráfica con sus homónimas de planos anteriores se puede determinar que se ha producido el cruce de ondas ya que los pulsos posteriores a la línea roja tienen menor magnitud y longitud.

4.5.2 Desalineamiento probeta-flyer de 2º

1. Plano de choque

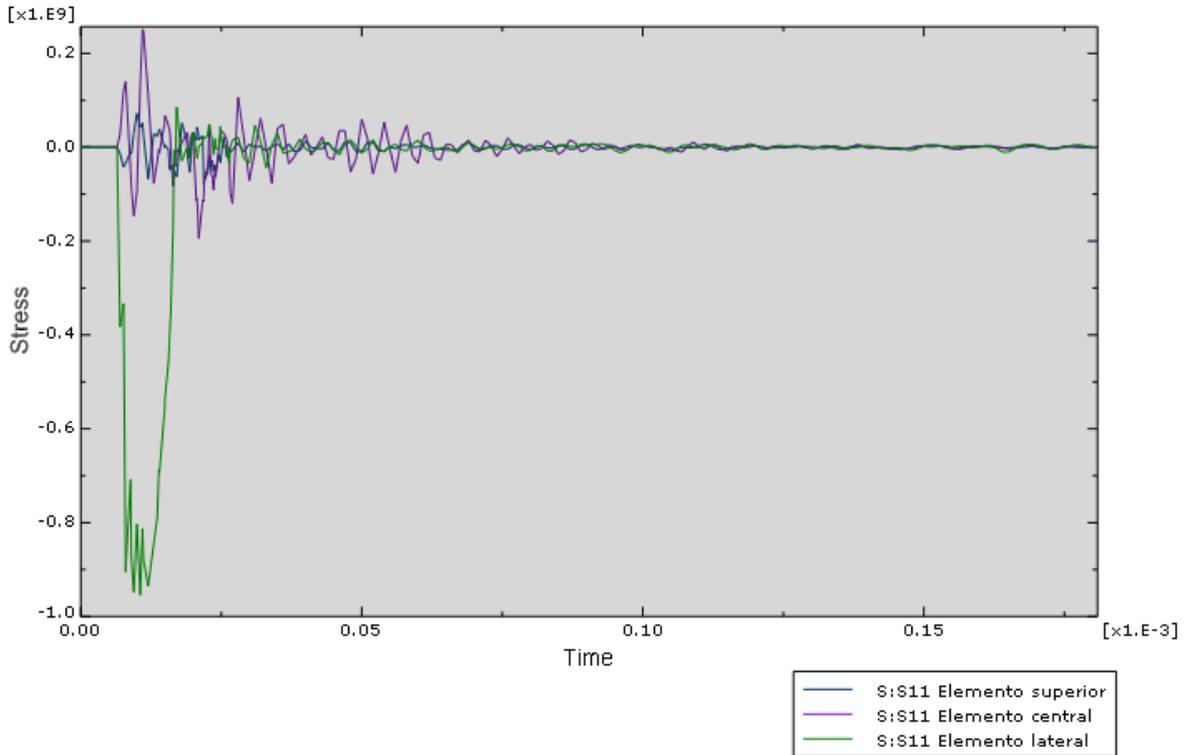


Figura 4.91 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 4.91 es idéntica a su homónima en el caso anterior (Figura 4.75) ya que, aunque el ángulo de desalineamiento en este caso sea mayor, en el momento del choque el flyer lleva la misma velocidad y sólo impacta con un elemento con lo que en este instante no se aprecian los efectos de un mayor desalineamiento.

La magnitud de la tensión σ_{11} en el elemento lateral, al igual que en el caso anterior, es de aproximadamente 815MPa, un valor muy próximo al teórico de 809MPa cuando el impacto es puntual y no repartido sobre una superficie.

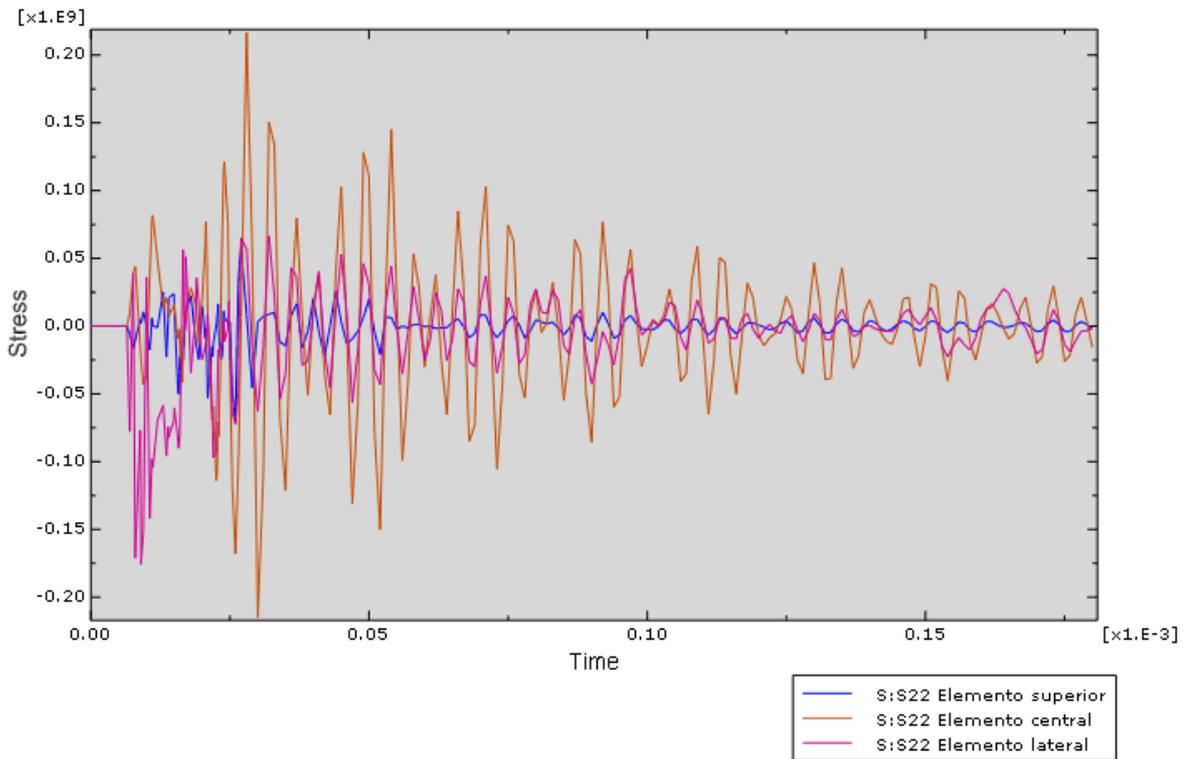


Figura 4.92 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Como se puede observar en la Figura 4.92, existe un pico inicial de tensión $\sigma_{22}=80\text{MPa}$ en el elemento lateral coincidente con el pico de $\sigma_{11}=815\text{MPa}$ debido a que el impacto oblicuo introduce directamente tensiones en estas dos direcciones. Por ello, y debido a la línea de transmisión de esfuerzos comentada anteriormente, las tensiones de los elementos lateral y central son mayores que la del elemento superior.

El elemento central sufre un pulso cíclico resultado de la onda lateral que introduce el impacto oblicuo, de ahí los picos que se observan y que no existen en los otros dos elementos. El hecho de que sólo se produzca en el elemento central es debido a que, como se ha mencionado anteriormente, es un elemento que no tiene caras libres, está totalmente rodeado por otros elementos que influyen sobre él.

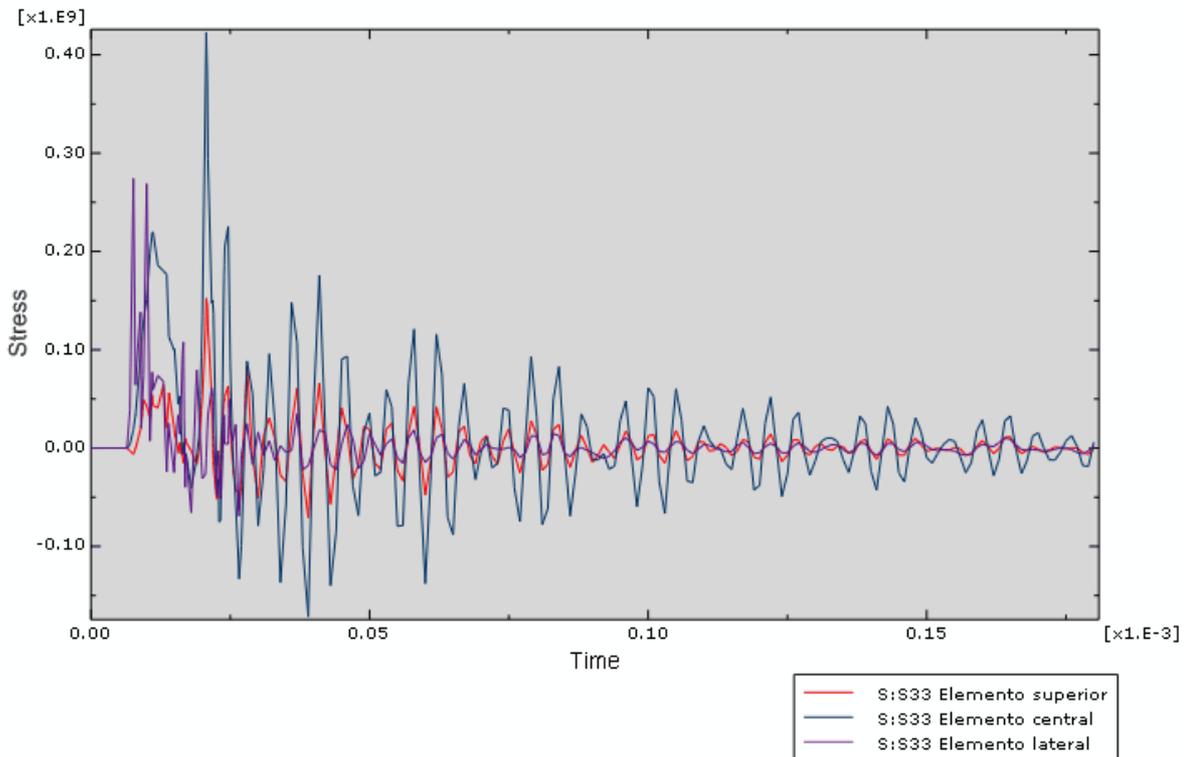


Figura 4.93 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Del mismo modo, la tensión σ_{33} en este caso es idéntica a la obtenida con desalineamiento de 1° , donde las mayores tensiones se producen en los elementos lateral y central por los motivos ya mencionados.

La menor tensión se obtiene en el elemento superior por ser el más alejado de la línea de transmisión de esfuerzos. Se puede observar también que se produce de nuevo un pulso cíclico en el elemento central por los motivos expuestos anteriormente.

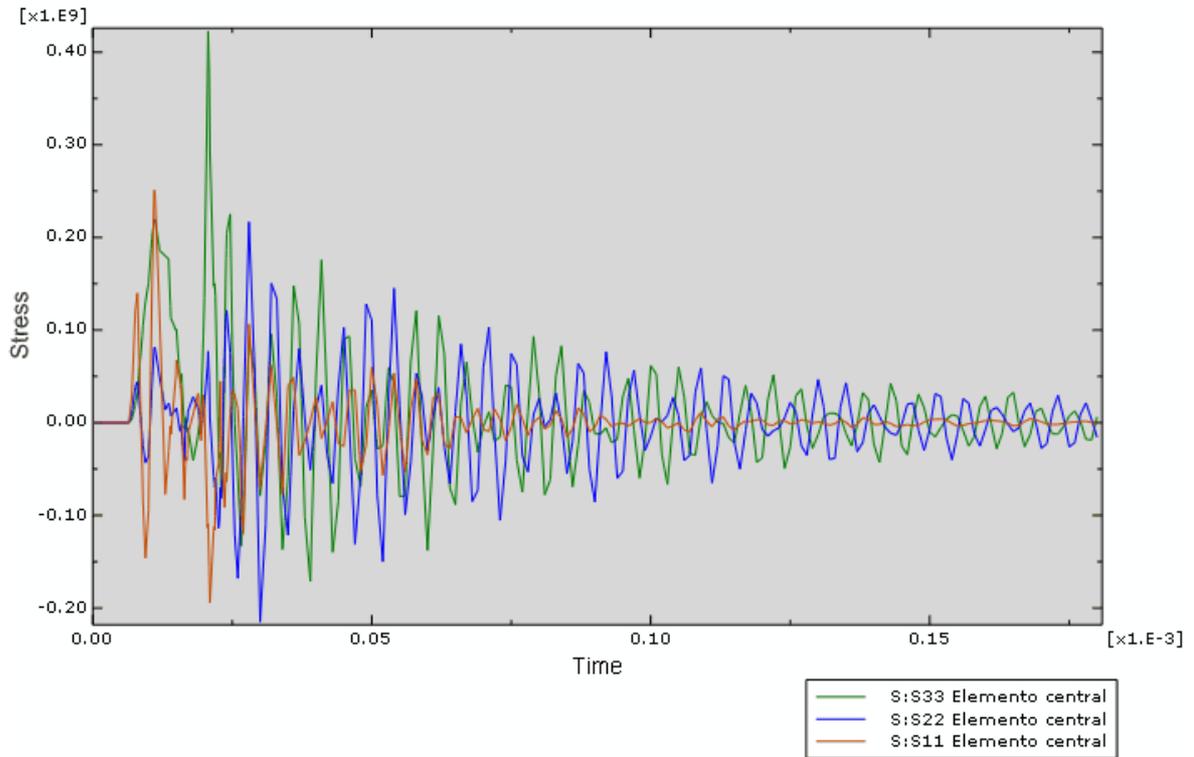


Figura 4.94 Tensiones del elemento central

La Figura 4.94 muestra las tensiones del elemento central, como se puede observar, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante con respecto a σ_{11} y, además, no terminan por disiparse. Sin embargo, como ya se ha comentado, de los resultados del plano de impacto no se pueden sacar conclusiones útiles ya que los datos obtenidos están falseados por la utilización de un área infinitesimal.

2. Plano 25%

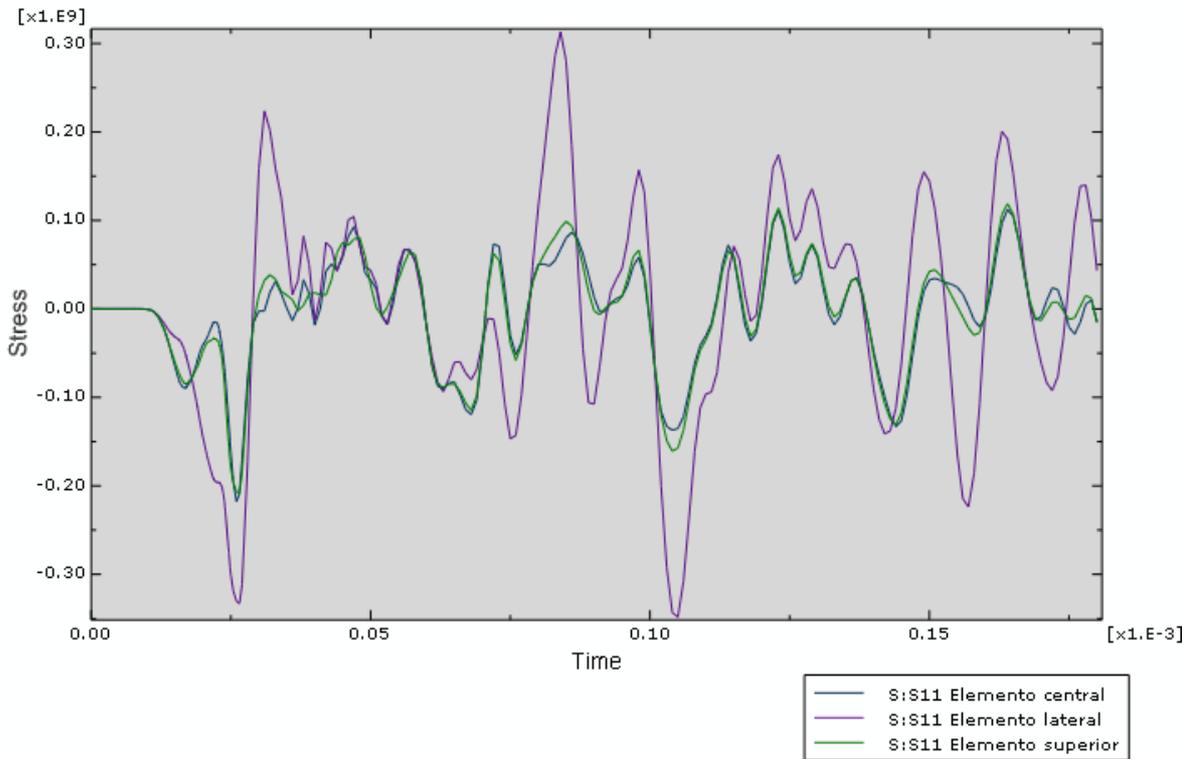


Figura 4.95 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Si se compara esta gráfica con su homónima del caso de desalineamiento de 1° se puede comprobar que ambas son idénticas, la única diferencia radica en el instante temporal dónde se producen las ondas debido a que en la simulación de este caso el flyer se ha alejado más de la probeta para salvar la interferencia producida por la mayor inclinación del flyer y, por tanto, transcurre más tiempo hasta que se produce el impacto.

Como se puede observar, los elementos central y superior están sometidos a la misma tensión, una consecuencia lógica ya que el flyer al girar impacta sobre ambos elementos a la vez transmitiéndoles la misma tensión, la diferencia entre la ondas se debe a que el elemento central recibe una mayor contribución de las otras tensiones que el superior. Por su parte, en el elemento lateral se dan las mayores tensiones ya que es el que recibe el impacto.

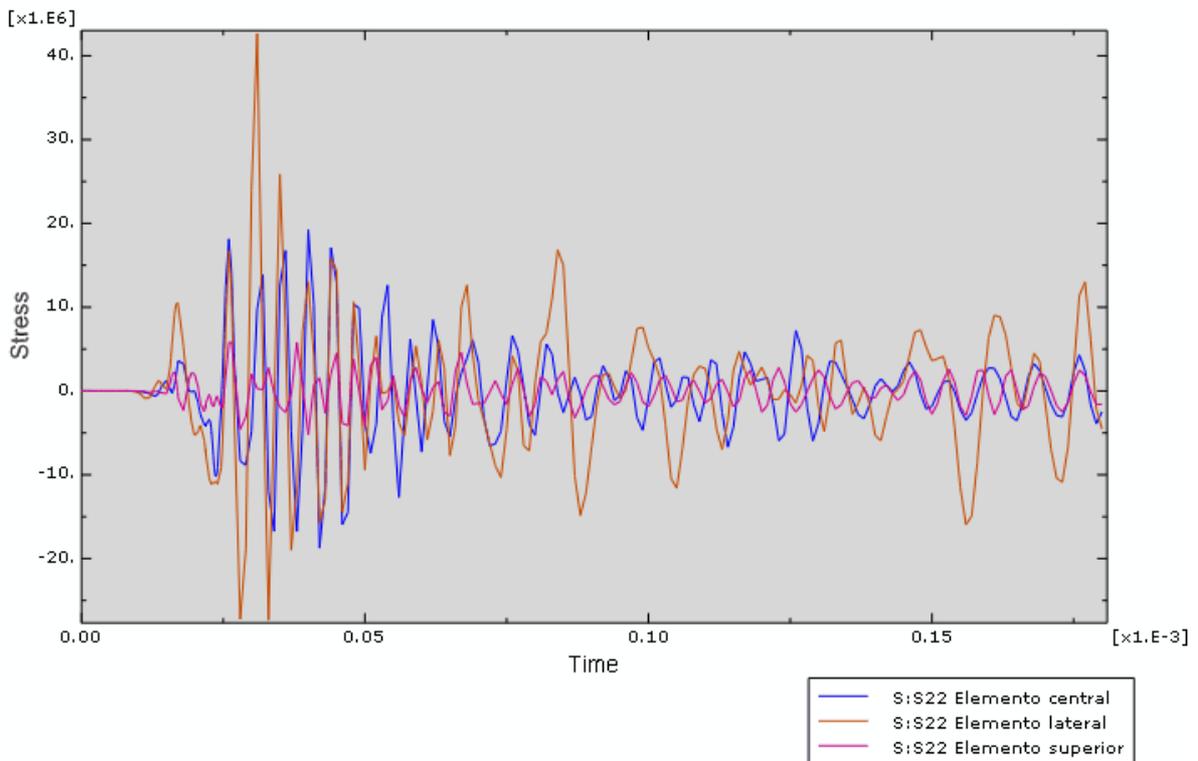


Figura 4.96 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Como ya sucedía en el caso anterior, la tensión σ_{22} del elemento superior es mucho menor que la de los elementos lateral y central debido a que es el elemento más alejado de la línea de transmisión de esfuerzos.

Además se observa que, exceptuando algunos picos, la tensión en el elemento central y lateral es prácticamente la misma durante la primera parte de la gráfica, posteriormente la tensión en el elemento central va disipándose mientras que en el elemento lateral permanecen tensiones residuales ya que es el que recibe el impacto.

Se observa también que el pulso cíclico en el elemento central se reduce debido a que, al aumentar la distancia a la cara de impacto, las ondas transmitidas se separan (una avanza más rápido que la otra) y las perturbaciones disminuyen.

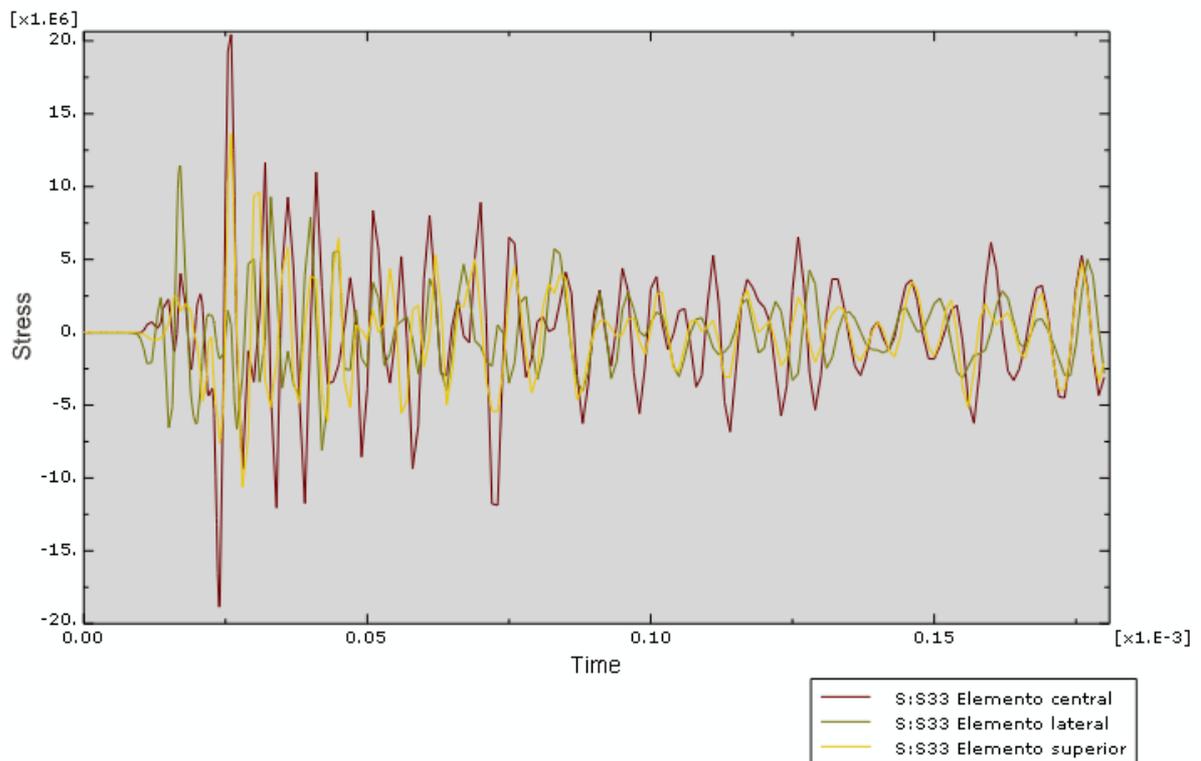


Figura 4.97 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

En este plano la tensión en todos los elementos es muy similar ya que el frente de ondas es más estable, no como en el plano anterior dónde las tensiones de cada elemento estaban más diferenciadas.

Como se puede ver en la Figura 4.97, la máxima tensión σ_{33} es de aproximadamente 7MPa, un valor mayor que en su homónimo de impacto plano ya que en este caso la tensión σ_{33} es el resultado de la contribución por efecto Poisson de las tensiones σ_{11} y σ_{22} , mientras que en el caso de impacto plano sólo contribuye σ_{11} (que además es menor que la σ_{11} del impacto oblicuo).

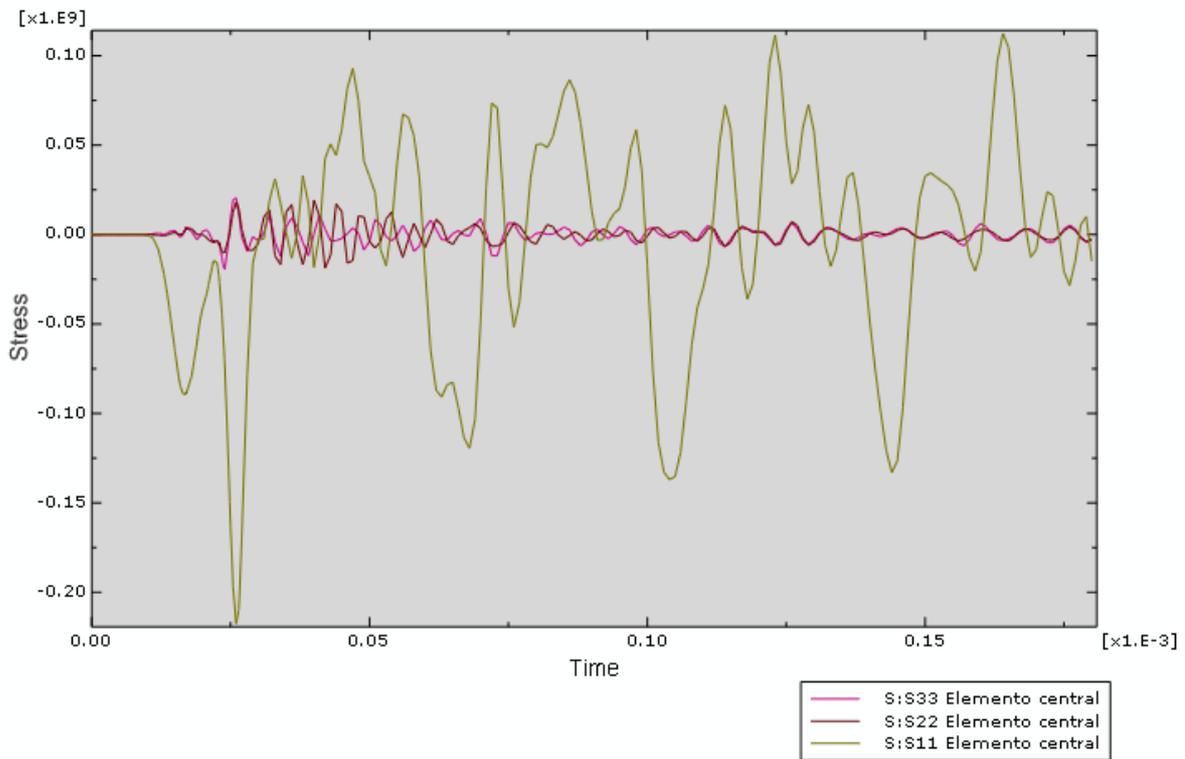


Figura 4.98 Tensiones del elemento central

En la Figura 4.98 se observa que las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren valores que rondan los 10MPa, en el caso de impacto plano dónde la tensión σ_{11} era de 35MPa, estos valores no podrían obviarse a la hora de estudiar la propagación unidimensional ya que representan un 25,5% del valor de σ_{11} . Sin embargo, en este caso, el valor de σ_{11} es del orden de 100MPa, lo que hace que las tensiones σ_{22} y σ_{33} representen un 10% de su valor estando en el límite de poder ser obviadas.

Como ya sucedía en el caso anterior, el valor obtenido de la tensión σ_{11} transmitida es inicialmente 80MPa aproximadamente, pero a medida que se produce la estabilización de la onda, el valor medio de compresión aumenta hasta los 100MPa.

3. Plano 50%

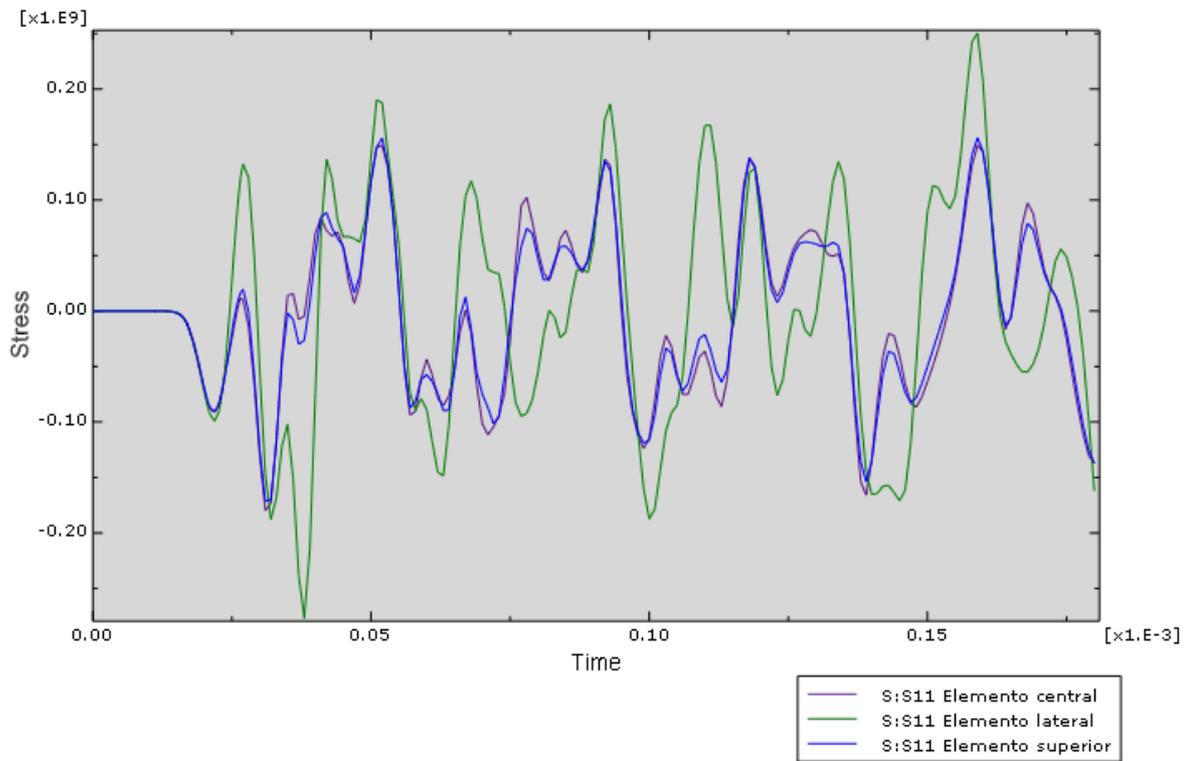


Figura 4.99 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 4.99 muestra como el valor de la tensión σ_{11} del elemento lateral es algo mayor al de los otros elementos debido a que es el que recibe el impacto directo del flyer. La diferencia de tensiones entre los elementos en este plano es menor que en los anteriores debido a que al ser un plano más alejado de la cara de impacto, las perturbaciones son menores y el frente de ondas es más estable.

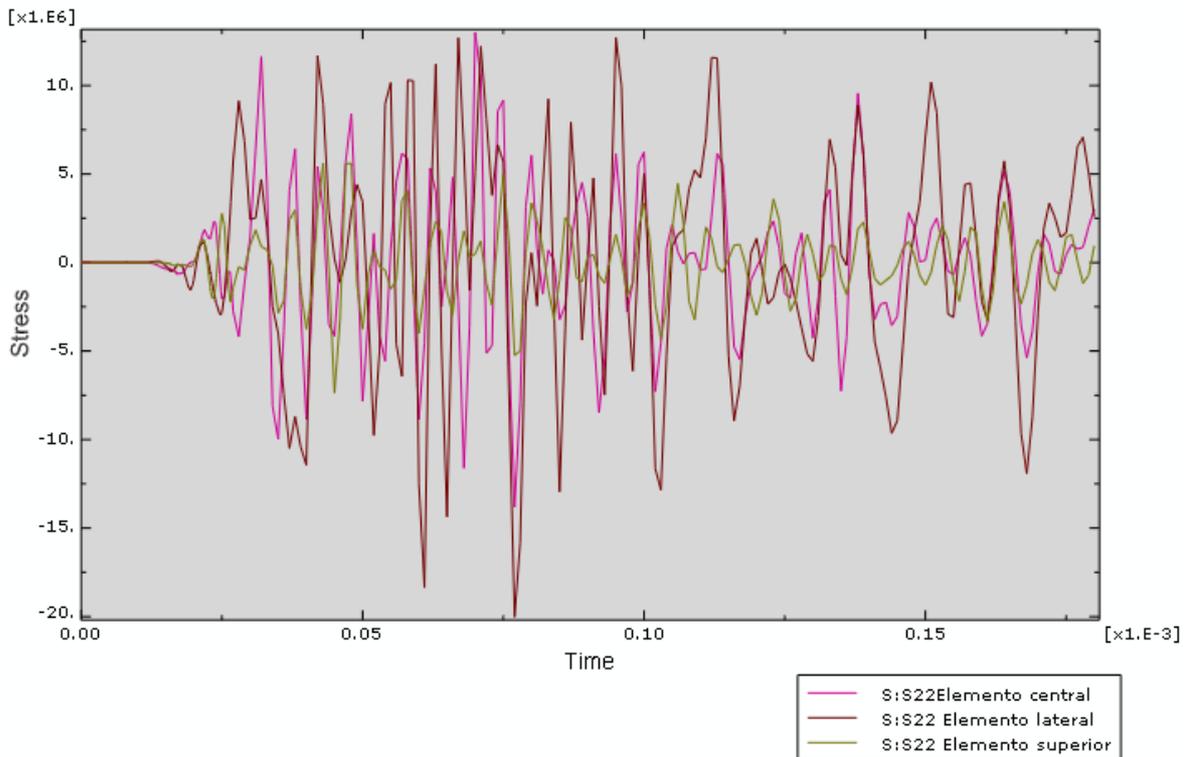


Figura 4.100 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

En esta gráfica se puede comprobar que tensión σ_{22} del elemento superior es, al igual que en los planos anteriores, menor que la de los otros elementos, del orden de la mitad. Este hecho se debe a que es el elemento más alejado de la línea de transmisión de esfuerzos.

La magnitud de esta tensión se mantiene constante con respecto a los otros planos y es de 8MPa aproximadamente para los elementos central y lateral durante la primera parte de la gráfica, posteriormente la tensión en el elemento central va disipándose adquiriendo la misma tensión que el elemento superior (4MPa).

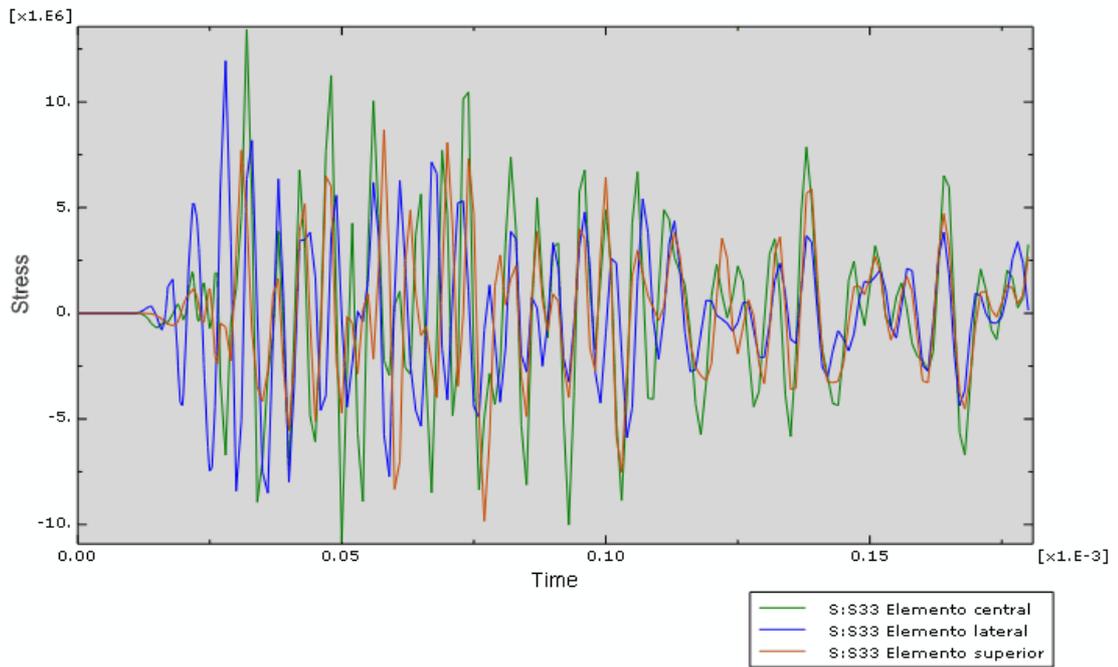


Figura 4.101 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 4.101 muestra como, excepto algunos picos, la tensión σ_{33} sigue el mismo patrón y puede considerarse que tiene una magnitud de 7MPa aproximadamente en todos los elementos.

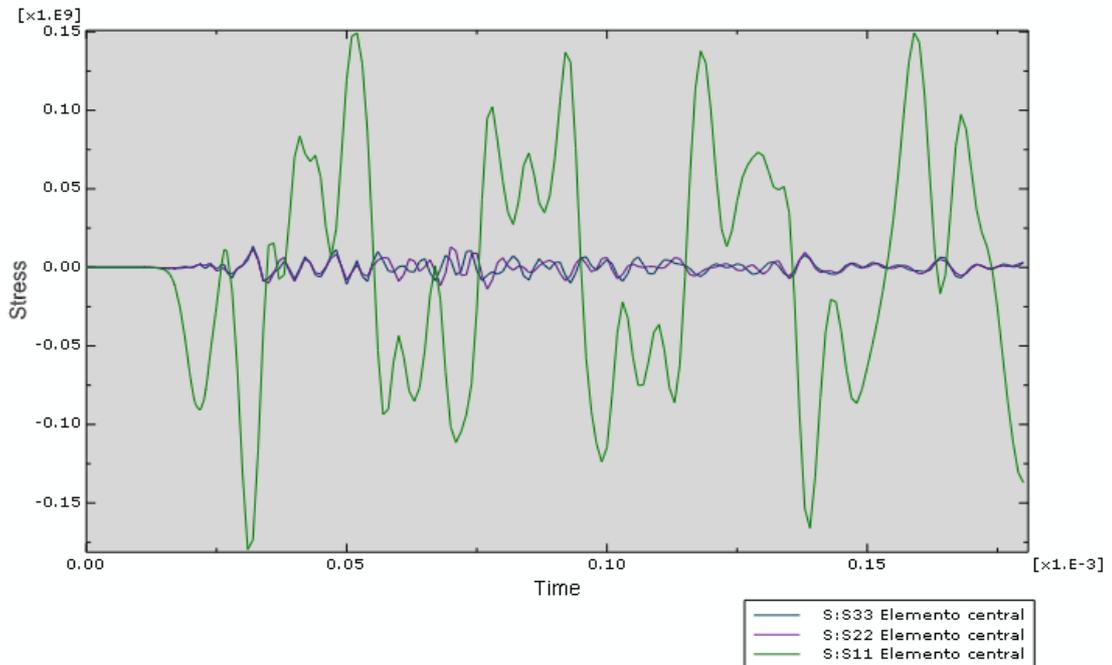


Figura 4.102 Tensiones del elemento central

La Figura 4.102 muestra una comparativa entre las tensiones del elemento central, se observa como en este plano la magnitud de la tensión σ_{11} se mantiene en, aproximadamente, los 80MPa de los planos anteriores mientras que las tensiones σ_{22} y σ_{33} tiene un valor mucho menor, de 7MPa aproximadamente. Como ya se ha comentado, este valor en el caso de impacto plano, invalidaría la hipótesis de propagación unidimensional. Sin embargo, en este caso, donde el valor de σ_{11} es mucho mayor, están en el límite de poder considerarse despreciables.

4. Plano 75%

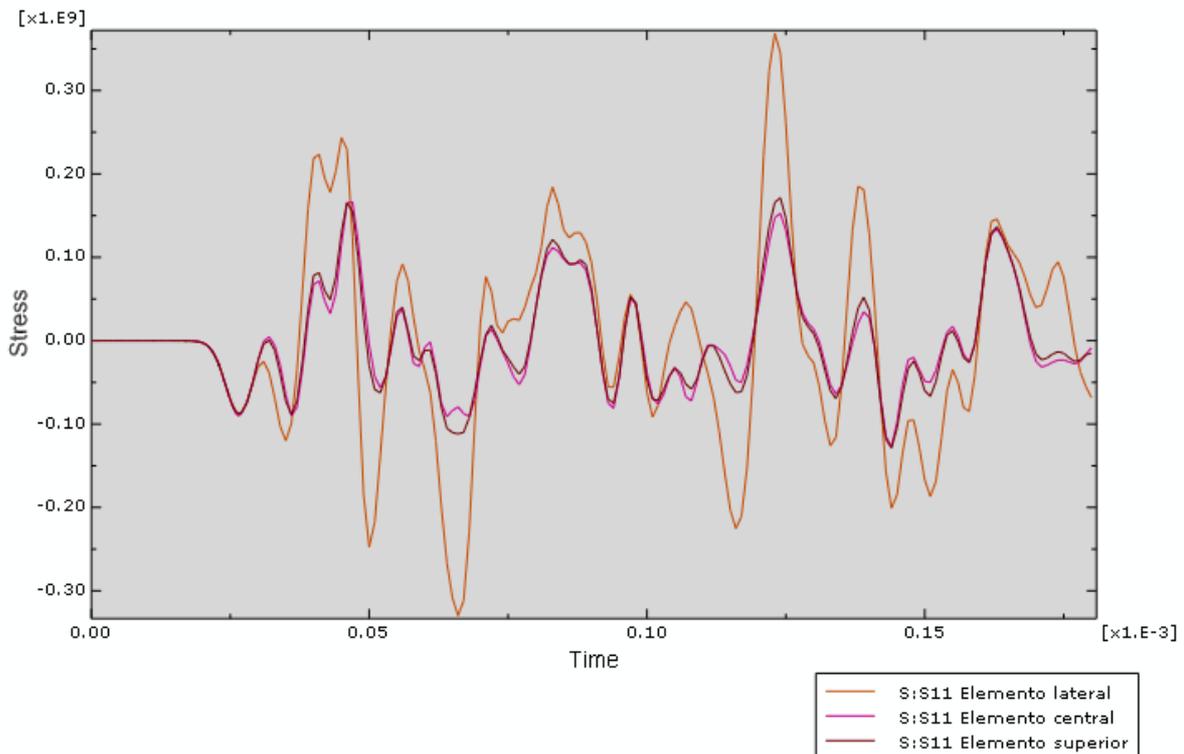


Figura 4.103 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Si se atiende a las ondas de la Figura 4.103 se puede observar que, en este plano, ya se ha producido el cruce de ondas debido a que tanto la cercanía entre los pulsos de tracción-compresión como la longitud y magnitud de los mismos es menor que en los planos anteriores.

Existe poca diferenciación entre los pulsos, esto se debe a la cercanía de este plano a la cara de reflexión de ondas, dónde las perturbaciones aumentan ya que conviven las reflexiones de las ondas (una en dirección 11 y otra en 22) introducidas por el impacto oblicuo del flyer.

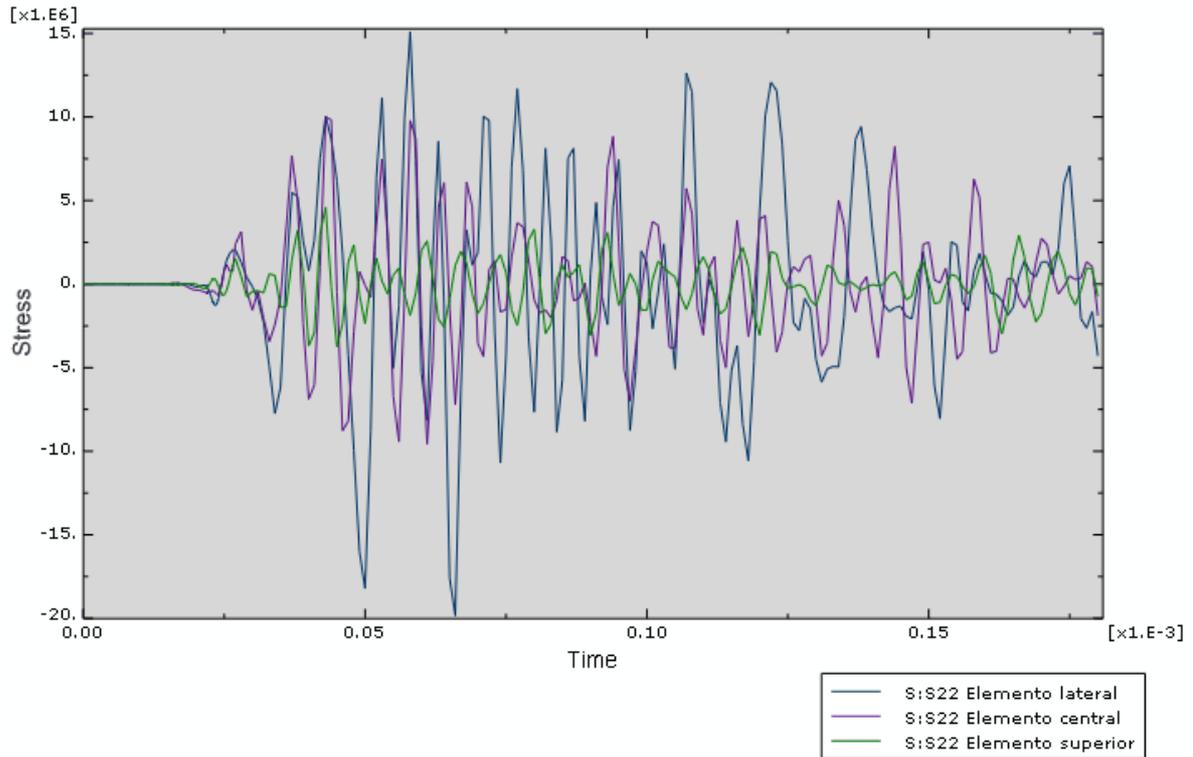


Figura 4.104 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

La Figura 4.104, como el resto de las gráficas que comparan la tensión σ_{22} , muestra como la tensión en los elementos central y lateral es mayor que la del elemento superior debido a que éste es el más alejado de la línea de transmisión.

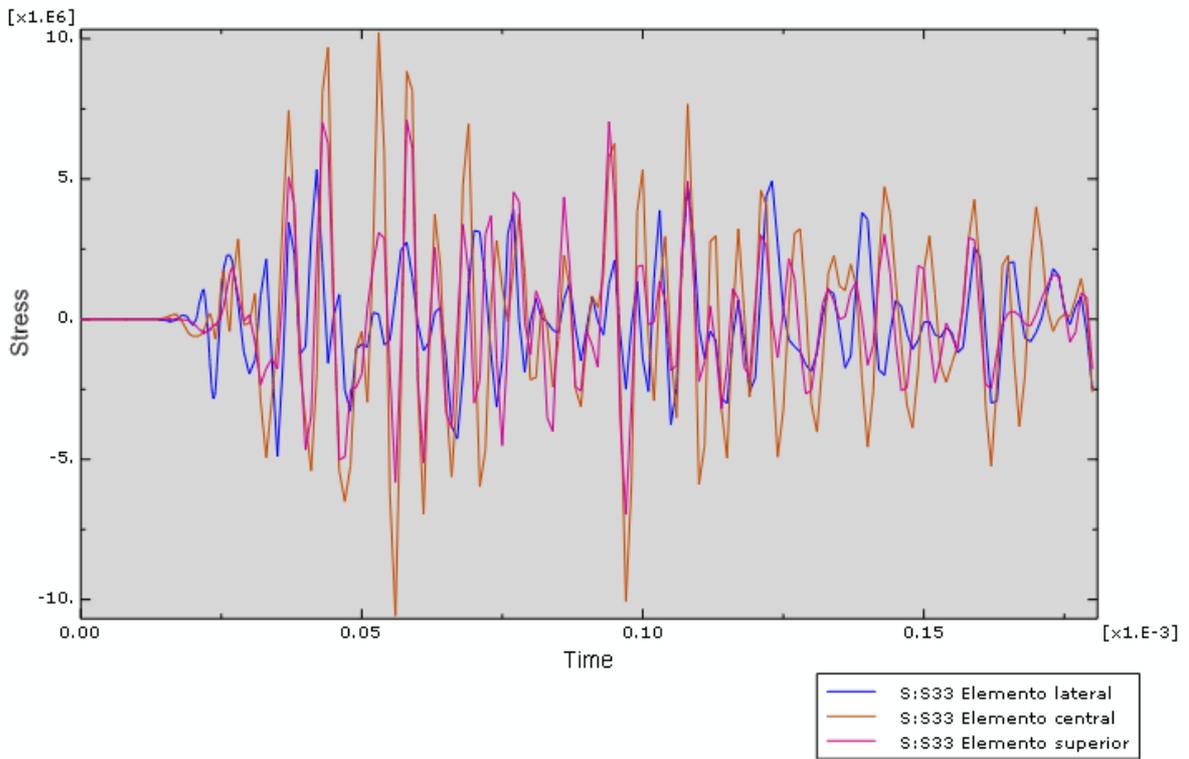


Figura 4.105 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Como sucede con la tensión σ_{11} , la Figura 4.105 muestra como se vuelve a un estado similar al del plano 25%, dónde hay una gran diferenciación entre las tensiones de los elementos rompiéndose la tendencia de estabilización del frente de ondas.

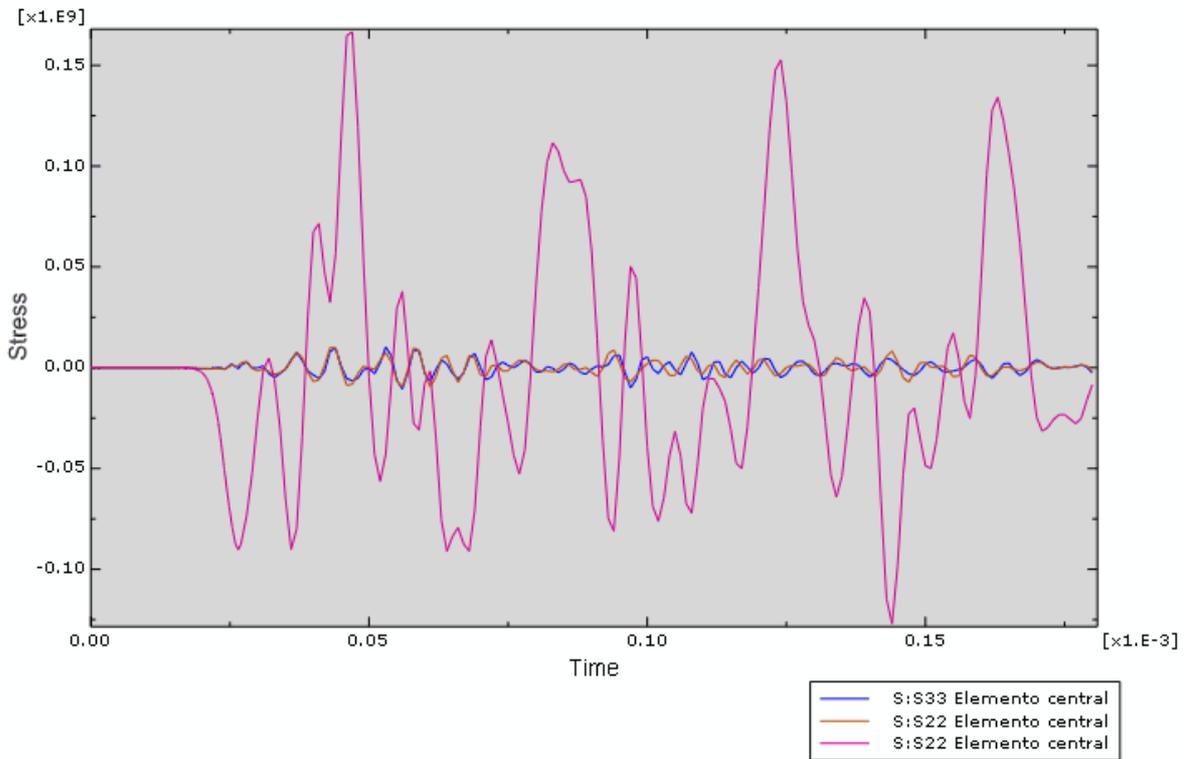


Figura 4.106 Tensiones del elemento central

La gráfica muestra con claridad como las tensiones σ_{22} y σ_{33} son insignificantes frente a la tensión σ_{11} . Además, puede observarse cómo se ha producido el cruce de ondas ya que la longitud y magnitud de la onda se ve reducida con respecto a los planos anteriores.

4.5.3 Desalineamiento probeta-flyer de 5°

1. Plano de choque

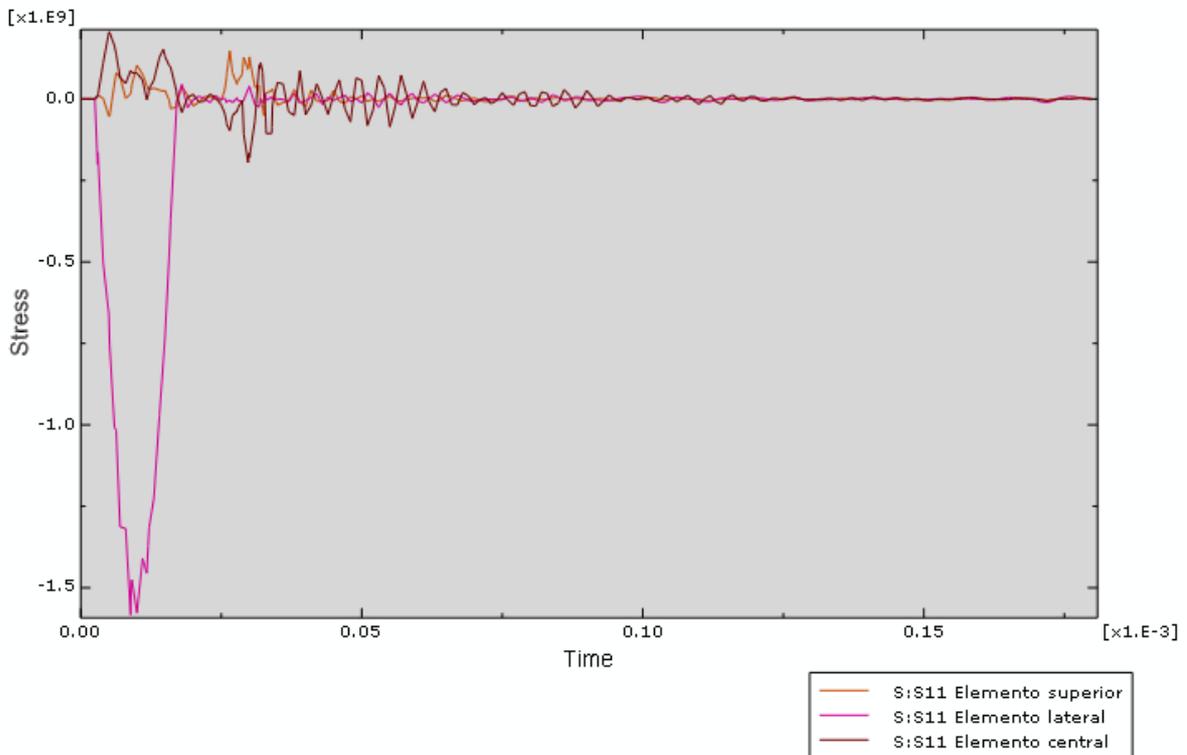


Figura 4.107 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 4.107 refleja un incremento sustancial en la magnitud de la tensión σ_{11} en el elemento lateral, del orden del doble que en los casos anteriores, 1400MPa frente a 820MPa anteriores. Este hecho se debe a que, al aumentar el ángulo del flyer, disminuye aún más el área de impacto y, por lo tanto, la tensión aumenta.

De esta gráfica no se pueden sacar conclusiones ya que el resultado está falseado por la disminución del área. Si la fuerza se diera sobre un punto, el área sería infinitesimal, por lo que la tensión saldría infinita. Es tarea del ingeniero interpretar los resultados obtenidos de la simulación. Por lo tanto, se han de analizar planos posteriores donde la onda sea más estable y poder así analizar sus características.

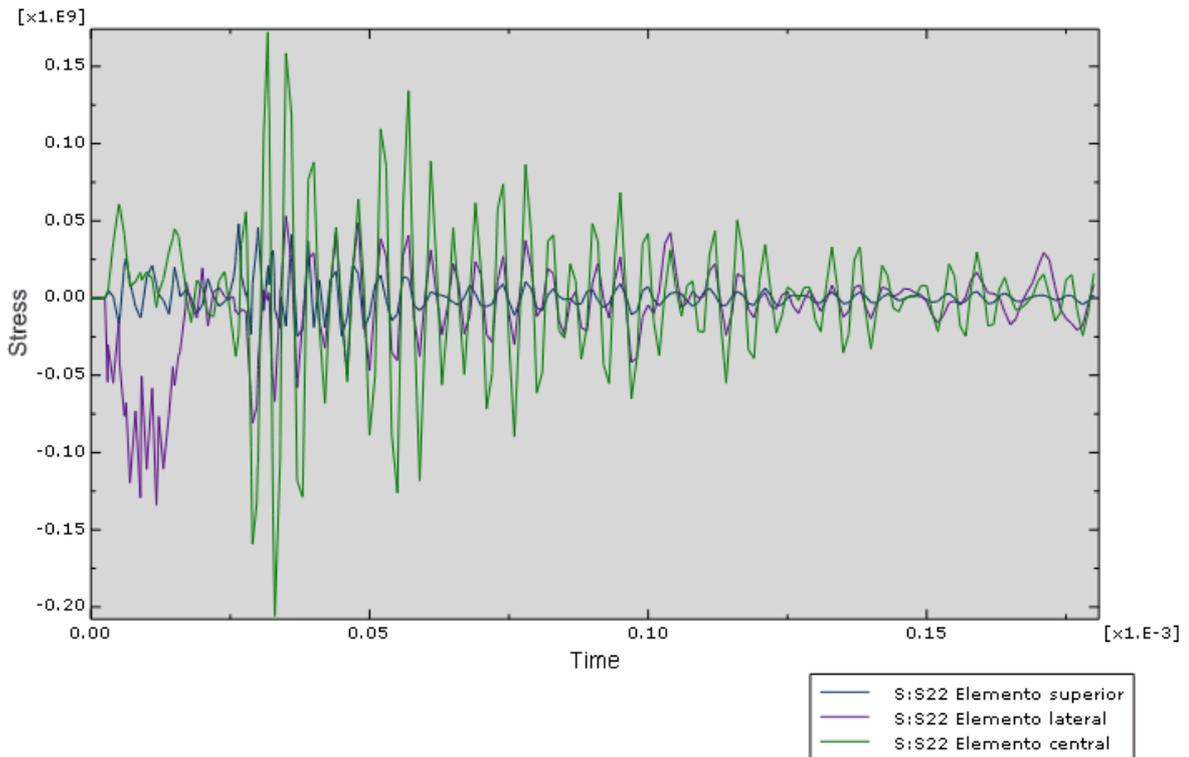


Figura 4.108 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Una consecuencia directa del aumento de la tensión σ_{11} es que las tensiones σ_{22} y σ_{33} también aumentan por efecto Poisson. Además, a este efecto, se suma también que, al aumentar el ángulo de impacto, se transmite una onda de mayor magnitud en la dirección 22 como se puede observar en la gráfica, dónde existe un pico de compresión en el elemento lateral de 10MPa frente a los 6MPa de los casos anteriores.

Como se ha comentado anteriormente, el elemento central es el más perjudicado por las perturbaciones introducidas en el impacto con ángulo ya que, a diferencia de los otros elementos, no tiene ninguna cara libre y recibe influencias de todos los elementos que le rodean, de ahí que su tensión σ_{22} sea cíclica y mayor que en los demás.

La mayor “claridad” de esta gráfica con respecto a sus homónimas de los casos anteriores se debe a que al aumentar el ángulo transcurre más tiempo hasta que el flyer corrige su posición e impacta con el resto de elementos. Así pues, el

pulso introducido por el impacto inicial termina antes de que se introduzca el pulso posterior por el giro del flyer, pudiendo discernir claramente ambos pulsos.

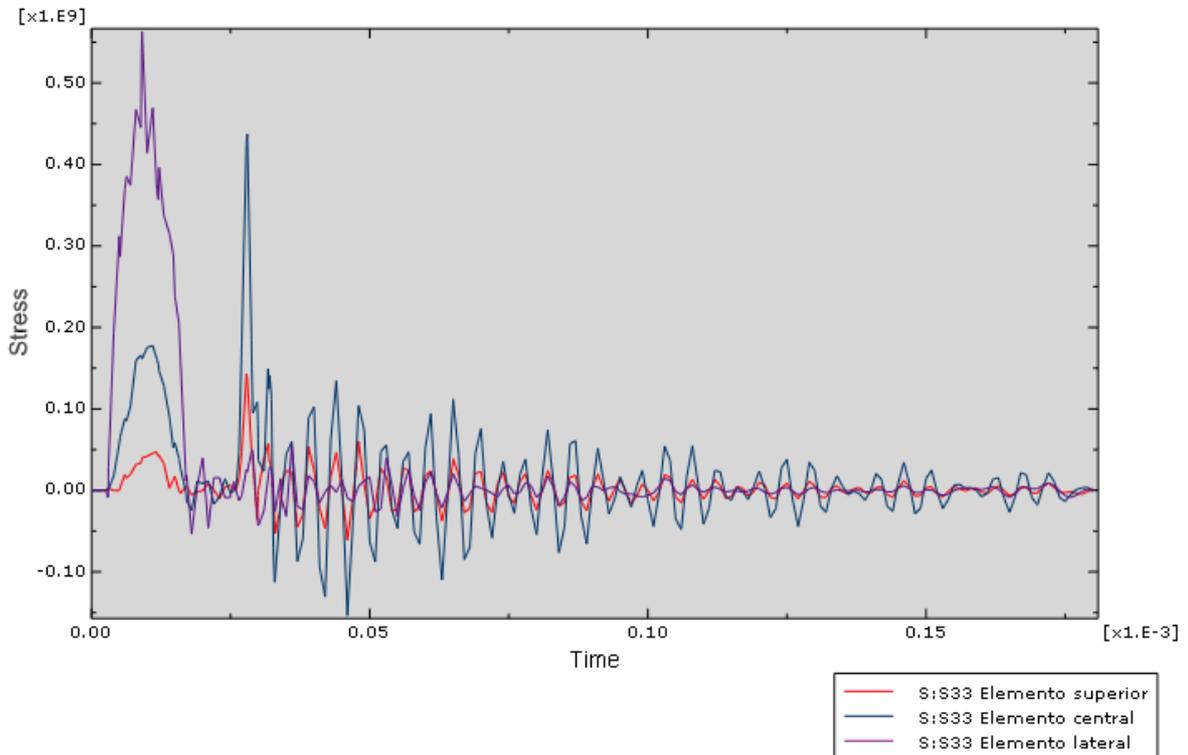


Figura 4.109 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

En la Figura 4.109 se aprecia perfectamente la tensión σ_{33} producida por efecto Poisson, el elemento lateral, que es el que recibe el impacto, es el que mayor tensión sufre, seguido del elemento central, por estar en la línea de transmisión de esfuerzos y, por último, el elemento superior, que es el más alejado de dicha línea. Al igual que en los casos anteriores, el elemento central sufre un pulso cíclico debido a las perturbaciones introducidas por el impacto oblicuo.

Como puede observarse, en esta gráfica también pueden discernirse claramente el pulso inicial producido por el impacto y el posterior debido a la corrección de la posición del flyer.

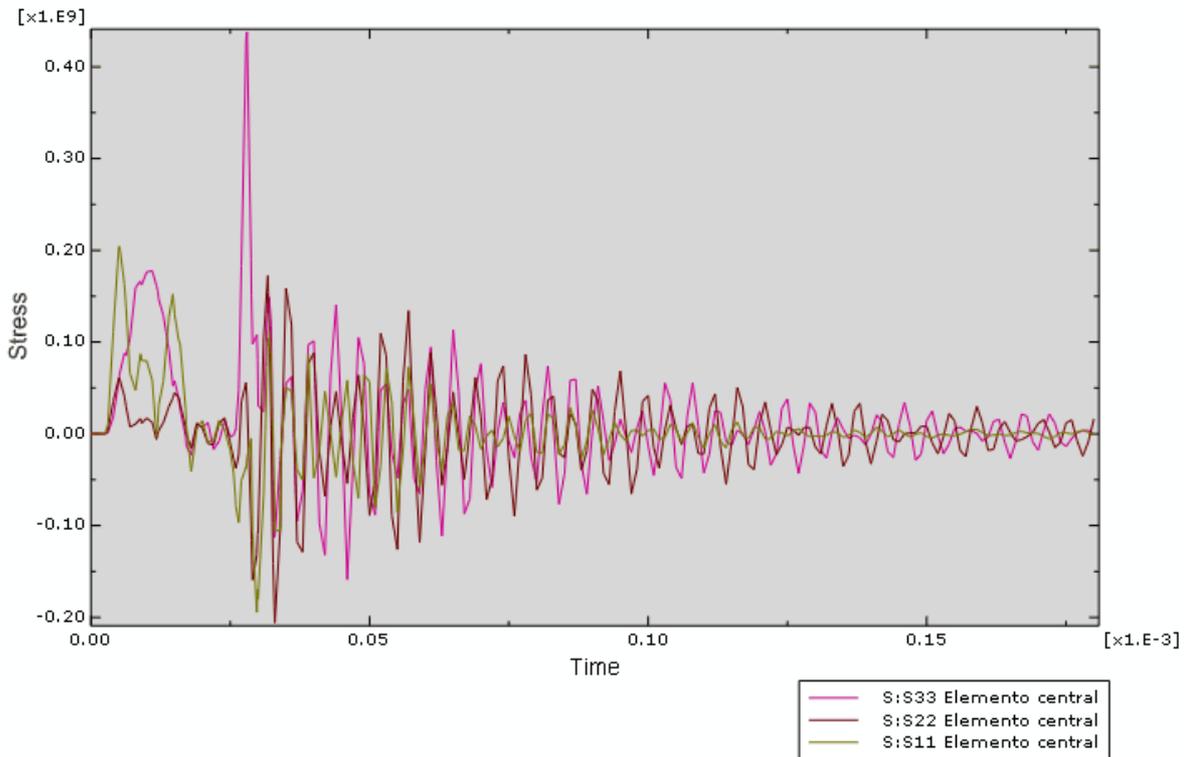


Figura 4.110 Tensiones del elemento central

Atendiendo a la Figura 4.110 y gracias a la mayor claridad de la gráfica, se puede observar que inicialmente el valor de la tensión σ_{22} es inferior al de las otras dos, este hecho se deba a que el impacto introduce un pulso de mayor magnitud en la dirección 22, produciendo una tensión σ_{22} de compresión en el elemento lateral, sin embargo, la contribución de σ_{11} a σ_{22} por efecto Poisson resulta ser de tracción, por lo que al aumentar la magnitud de σ_{22} de compresión el valor total se ve reducido con respecto a los casos anteriores.

Una vez producido el segundo impacto provocado por el giro del flyer se observa como las todas las tensiones adquieren valores similares. No obstante, al igual que en los casos anteriores, debido a la gran cantidad de perturbaciones que existen en este plano no se pueden sacar conclusiones, siendo necesario el análisis de planos posteriores.

2. Plano 25%

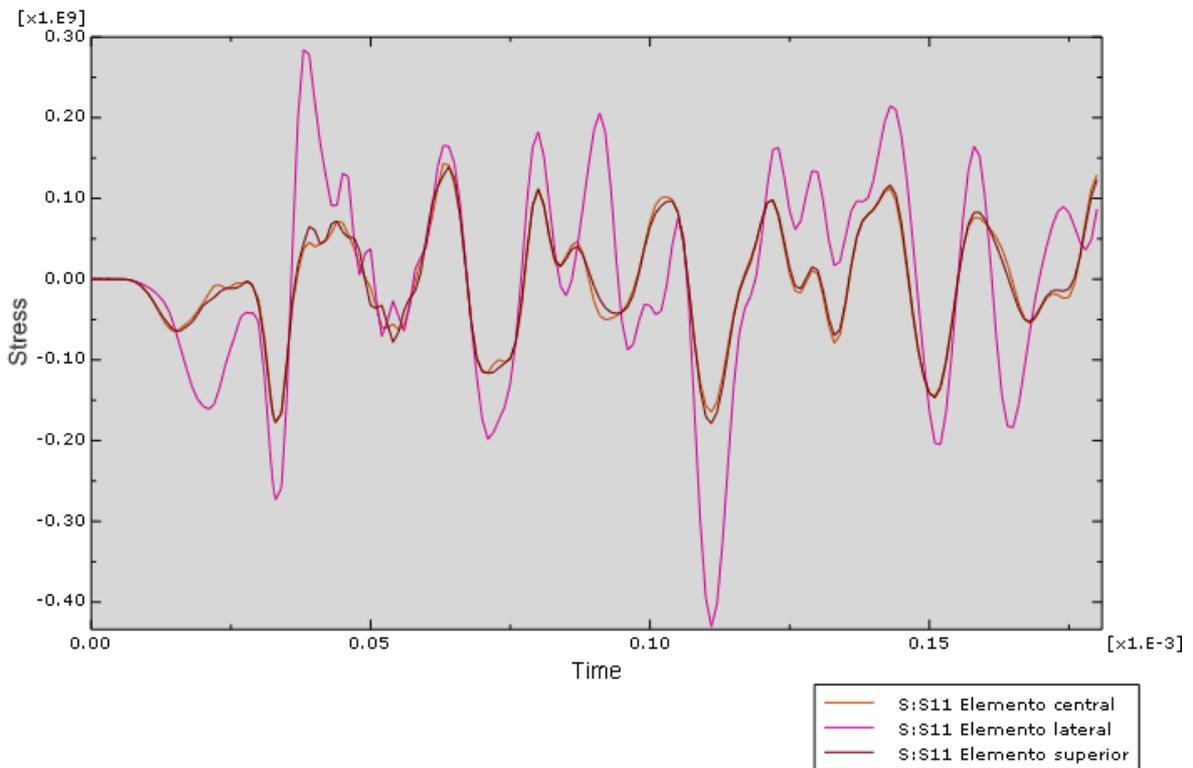


Figura 4.111 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Observando la Figura 4.111 se puede comprobar con respecto a los casos anteriores que los valores de σ_{22} y σ_{33} aumentan mientras que el valor de σ_{11} se ve ligeramente reducido, este hecho se debe a lo ya mencionado de que al aumentar el ángulo de impacto, la magnitud de la onda en la dirección 22 aumenta, por lo que aumenta la magnitud de σ_{22} de compresión y, por efecto Poisson el valor de σ_{11} de tracción. Por otro lado, la onda en la dirección 11 introduce una σ_{11} de compresión y una σ_{22} de tracción menores dando como resultado el aumento de σ_{22} y σ_{33} y una disminución de σ_{11} .

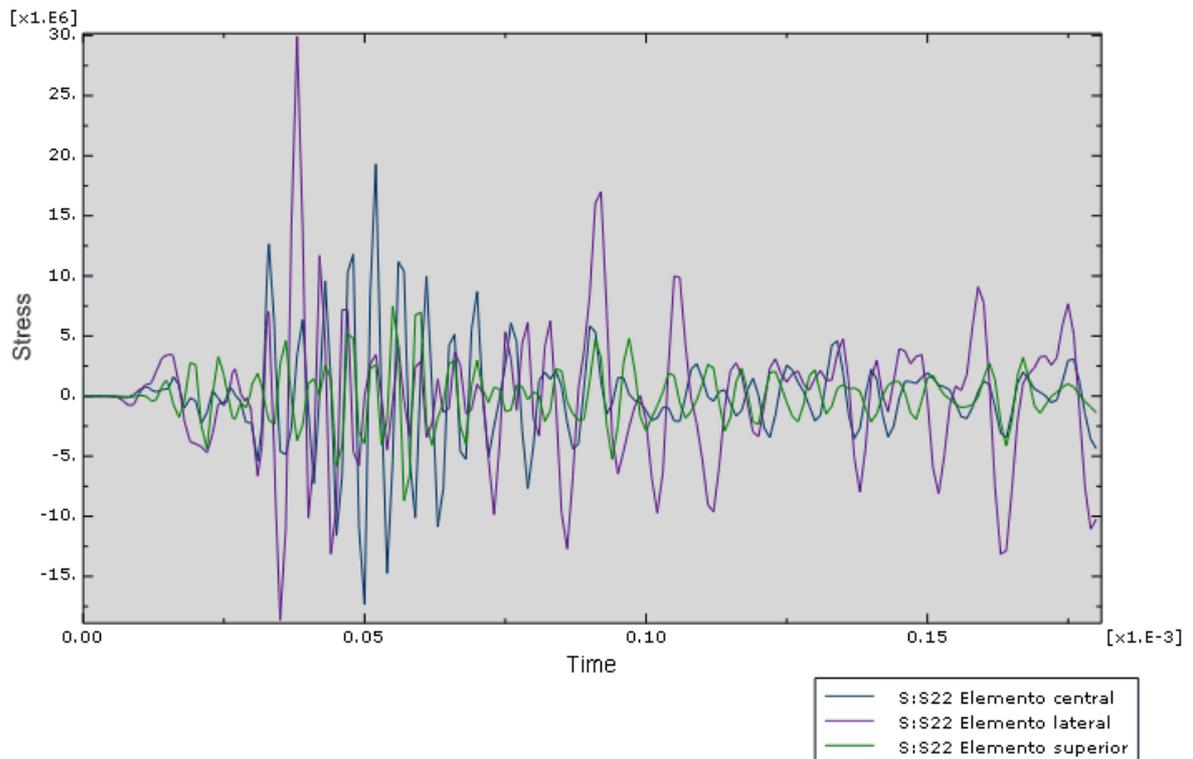


Figura 4.112 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Como ha sido común en todos los casos analizados, el elemento lateral está sometido a una mayor tensión σ_{22} que los otros dos. Por otro lado, exceptuando algunos picos (debido a que el elemento central no tiene ninguna cara libre), se puede considerar que la tensión en el elemento central y superior es la misma.

Se puede observar que el pulso cíclico que sufría el elemento central en los casos anteriores en este caso desaparece gracias a la mayor separación temporal entre las ondas, lo que deriva en una menor cantidad de perturbaciones.

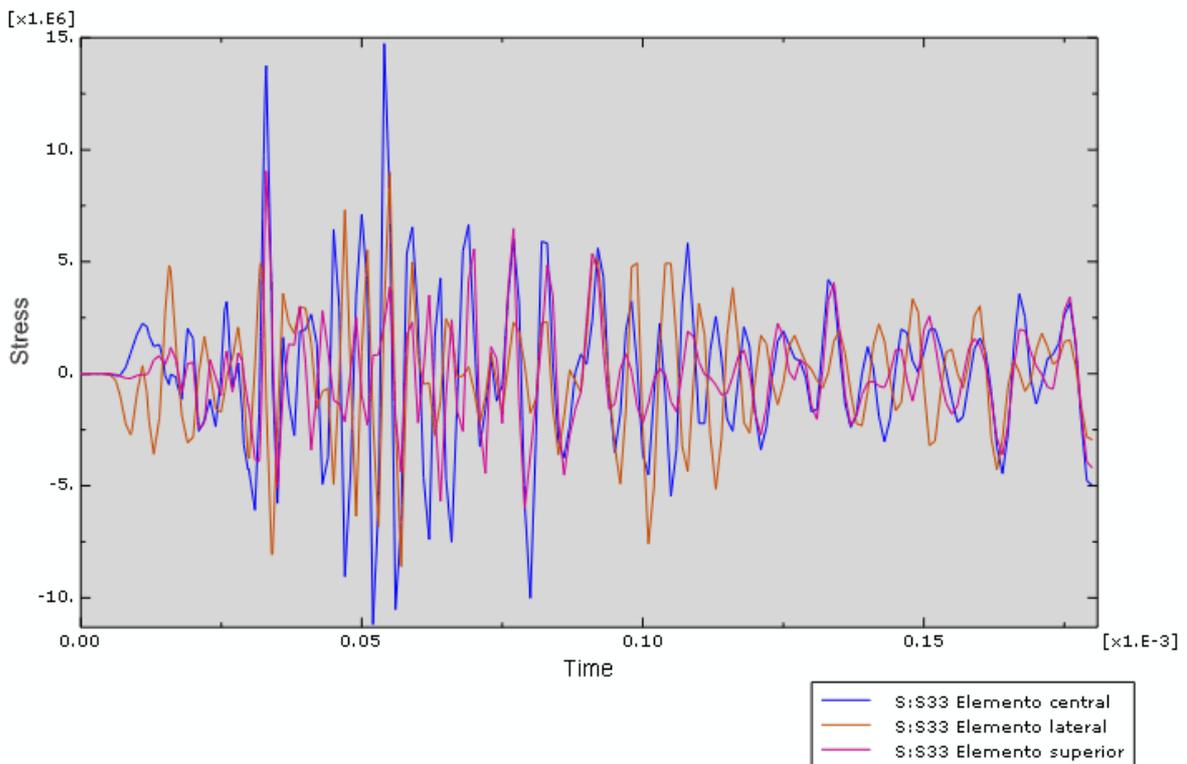


Figura 4.113 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 4.113 muestra un espectro cuyas ondas están más sincronizadas temporalmente que en los casos anteriores, esto se debe a la mayor separación de ondas comentada anteriormente que provoca menos perturbaciones en los elementos.

Tras el impacto inicial, dónde se observa perfectamente las tensiones que sufren cada uno de los elementos, se produce el segundo impacto debido al giro del flyer que introduce una nueva onda y, por tanto, nuevas perturbaciones. Los elementos más perjudicados por esta nueva onda son el central y el superior, como indican los picos posteriores. A medida que avanza la onda, la tensiones en los elementos se estabilizan pudiéndose considerar que todos están sometidos a una tensión σ_{33} muy similar.

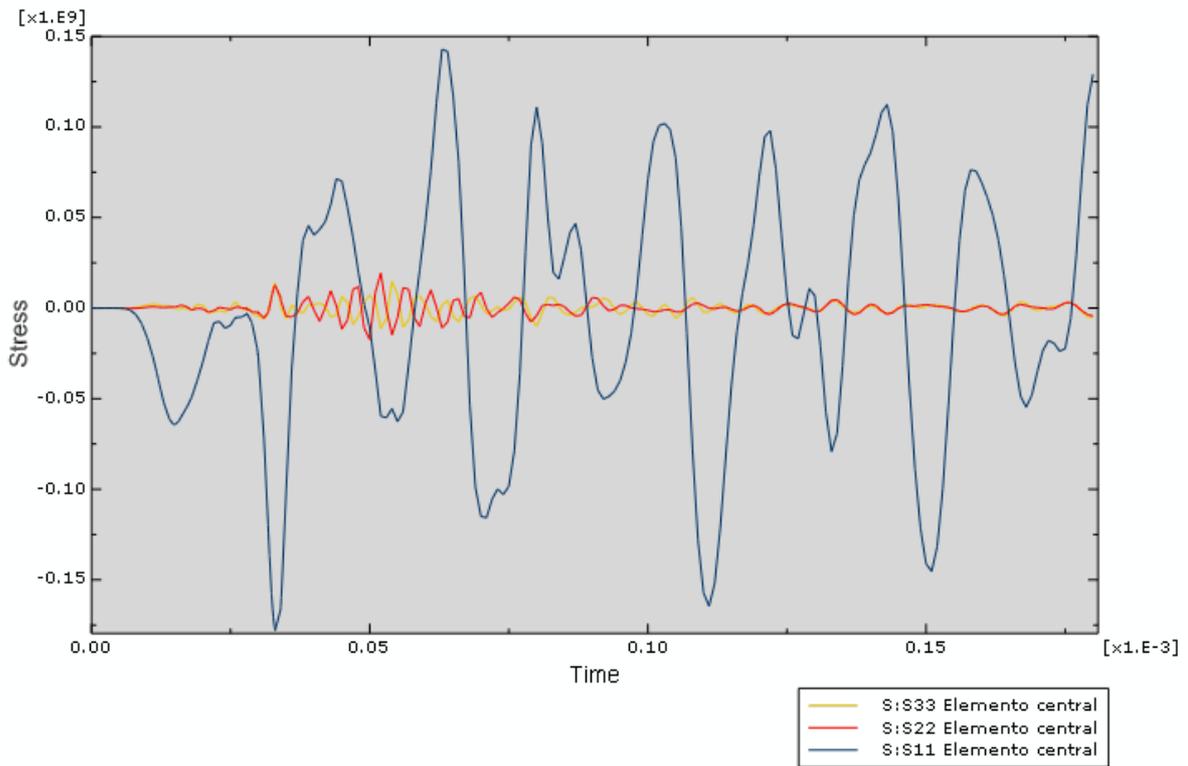


Figura 4.114 Tensiones del elemento central

La Figura 4.114 muestra la comparación de las tensiones en el elemento central obteniéndose una tensión media σ_{11} de 110Mpa aproximadamente que, como ya sucedía en los casos anteriores, es mucho mayor a las tensiones σ_{22} y σ_{33} . Aunque en la gráfica parece que las tensiones σ_{22} y σ_{33} son muy pequeñas, en realidad, tienen valores de 12 y 6MPa respectivamente, un valor considerable pero despreciable al compararlo con el valor de σ_{11} .

3. Plano 50%

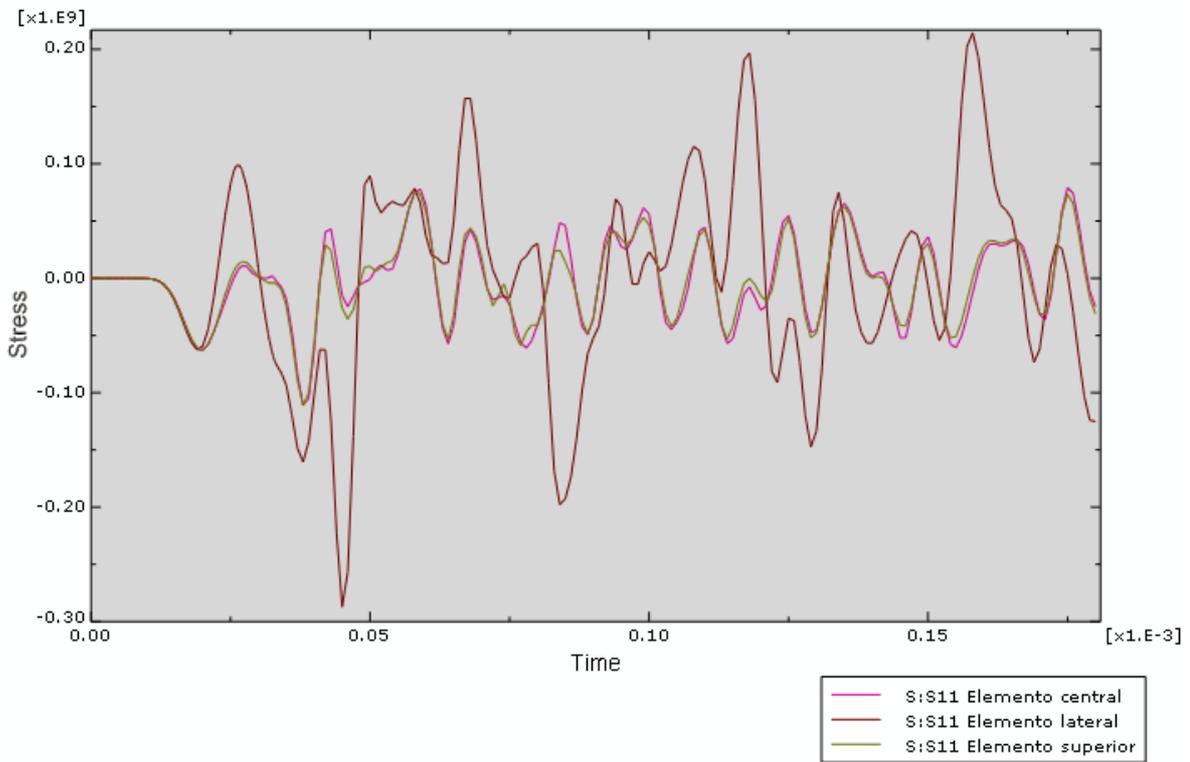


Figura 4.115 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

A diferencia de los casos anteriores, donde las tres ondas seguían un patrón similar, en este plano se observa que el elemento lateral sufre más perturbaciones que los otros dos desfasándose temporalmente con respecto a las otras dos. Esto se debe a que, debido al aumento del ángulo de impacto, es en este plano dónde conviven las dos ondas transmitidas y, por tanto, existen más perturbaciones.

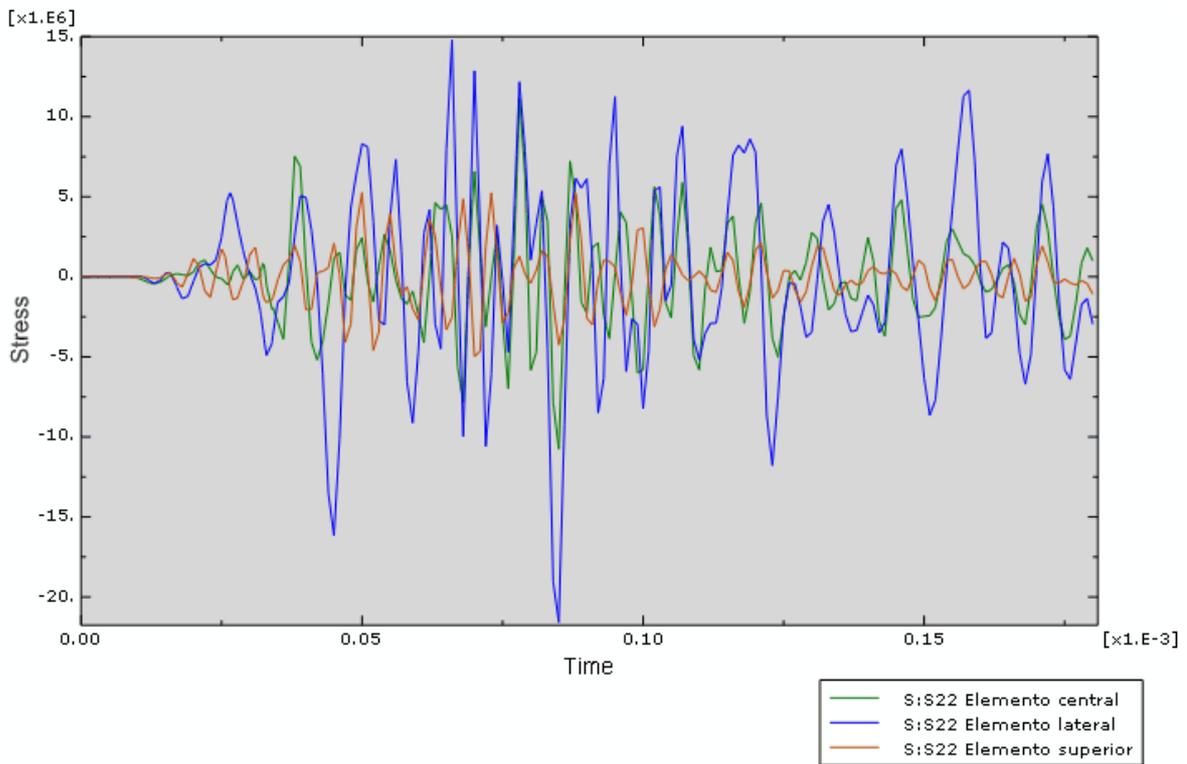


Figura 4.116 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

La Figura 4.116 muestra las mismas características que los planos anteriores, es decir, el elemento lateral está sometido a una menor tensión σ_{22} que los modelos con menor ángulo de inclinación y, en los elementos central y superior, se puede considerar que existe la misma tensión.

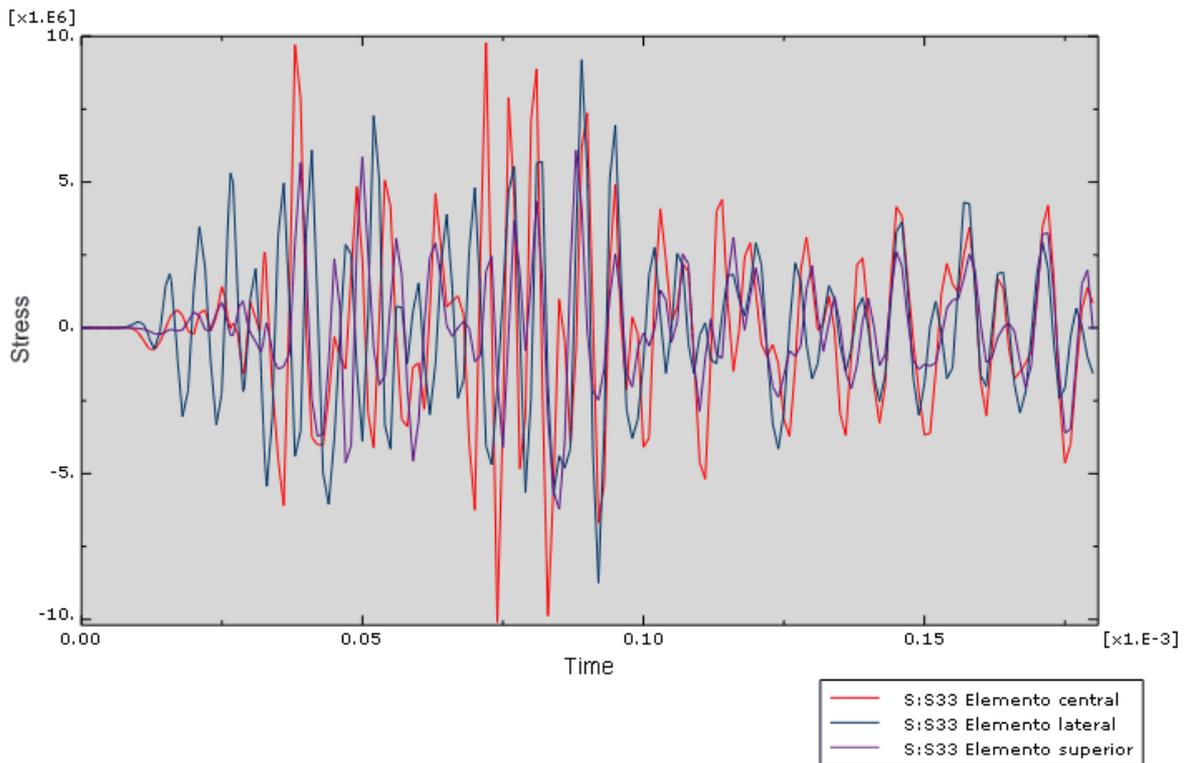


Figura 4.117 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Atendiendo a la Figura 4.117, se puede considerar que, excepto algunos picos del elemento central por no tener ninguna cara libre, la tensión σ_{33} de los elementos central y lateral se puede considerar la misma ya que ambos están en la línea de transmisión de esfuerzos. Por su parte, el elemento superior, que es el más alejado de ésta línea, es el que está sometido a una menor tensión.

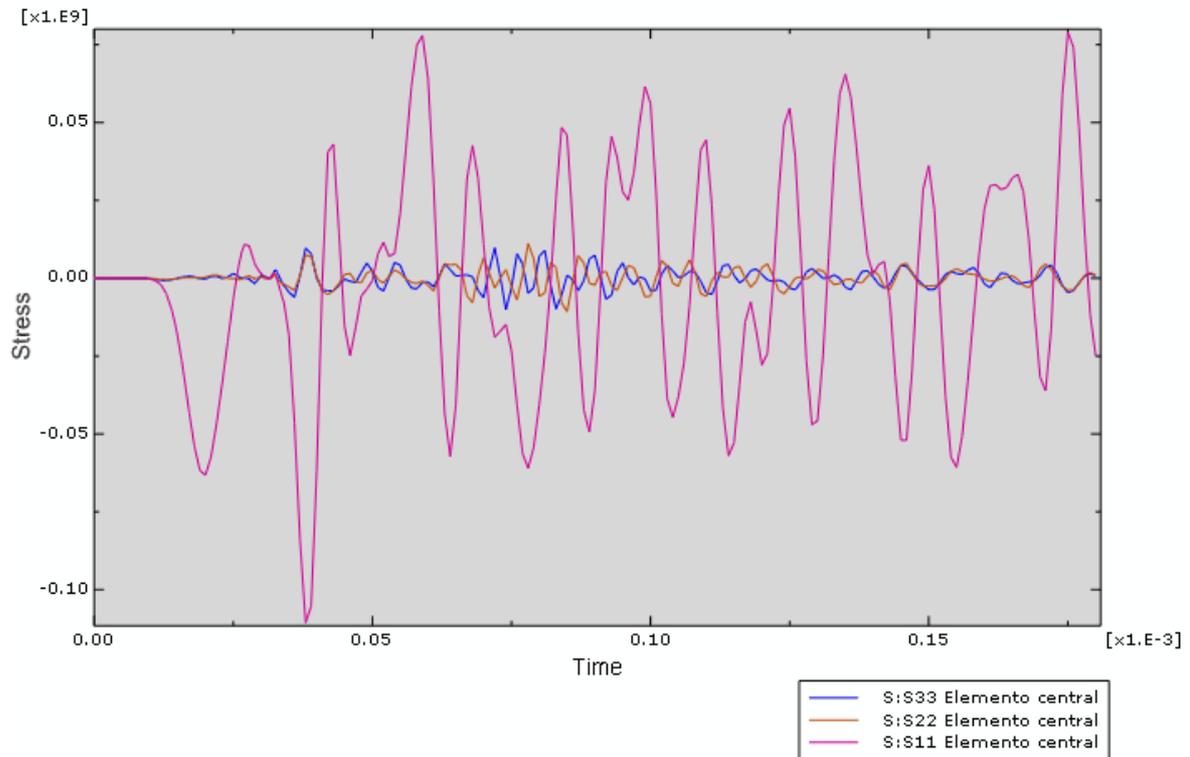


Figura 4.118 Tensiones del elemento central

Como sucede en todos los casos analizados, la tensión σ_{11} es mucho mayor que las tensiones σ_{22} y σ_{33} . Sin embargo, como ya se ha comentado, la magnitud de σ_{11} se ha visto reducida (de 80MPa a 55MPa) con respecto a los casos anteriores debido a la anulación que se produce entre σ_{11} y σ_{22} .

A diferencia de los casos anteriores, la reducción de σ_{11} y el aumento de σ_{22} y σ_{33} hace que éstas no puedan despreciarse y el ensayo no sea válido. Por lo tanto, no es necesario seguir analizando más planos.

4.5.4 Comparación ángulo de impacto

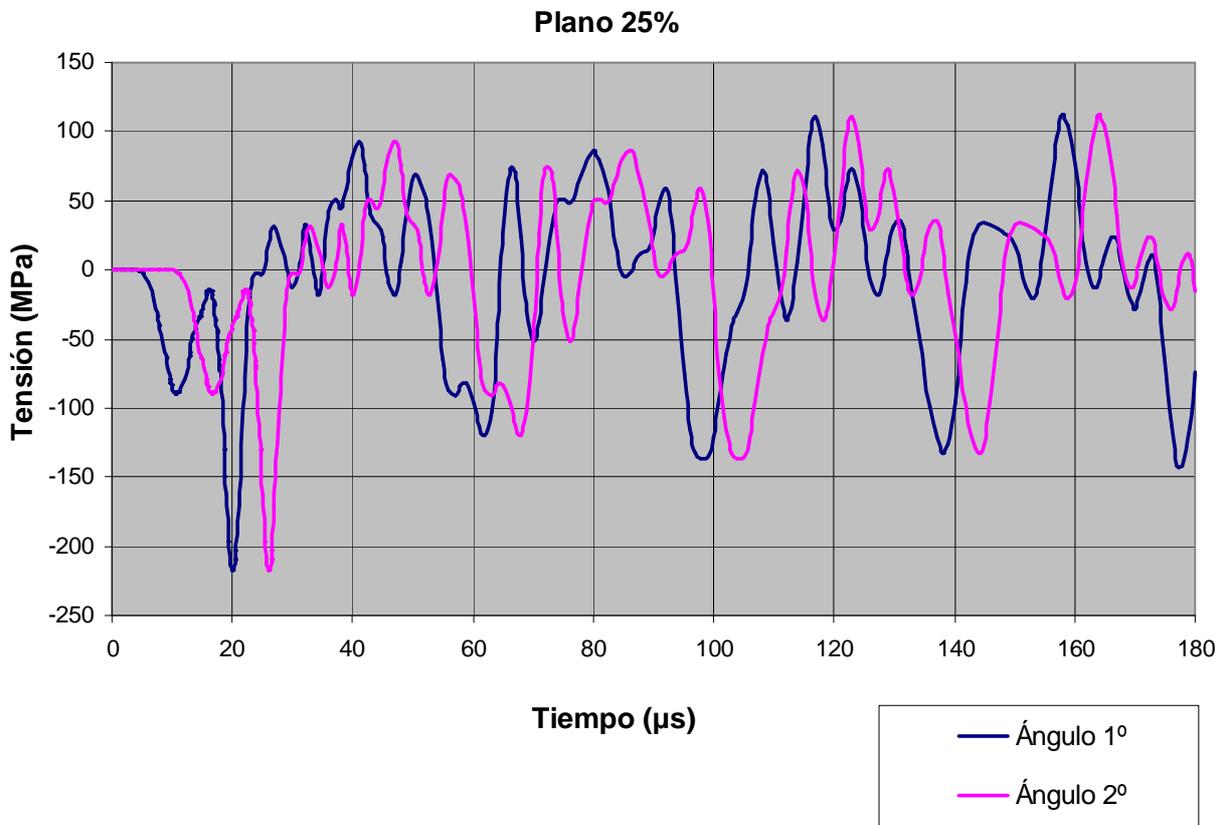


Figura 4.119 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1° y 2°. Plano 25%

Como se puede observar en la Figura 4.119, al variar la inclinación del flyer de 1° a 2° no se producen variaciones apreciables en los resultados. El desfase temporal entre las ondas se debe a que, al aumentar el grado de inclinación, en la simulación, el flyer debe alejarse más de la probeta para salvar la interferencia, por lo que el tiempo que tarda en impactar es mayor.

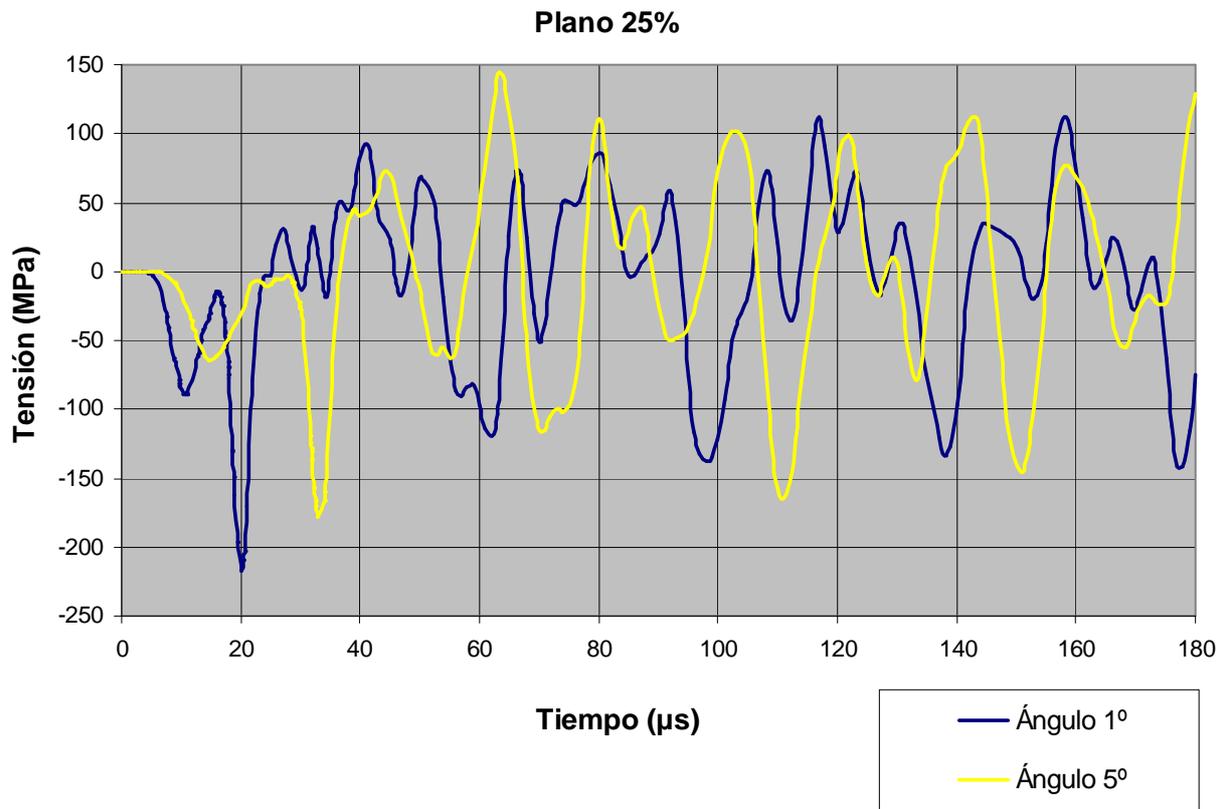


Figura 4.120 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1° y 5°. Plano 25%

La Figura 4.120 muestra la disminución de la magnitud del pulso transmitido debido a que al aumentar el ángulo de impacto, la magnitud de la onda en la dirección 22 aumenta, por lo que aumenta la magnitud de σ_{22} de compresión y, por efecto Poisson, el valor de σ_{11} de tracción. Por otro lado, la magnitud de la onda en la dirección 11 disminuye e introduce una σ_{11} de compresión y una σ_{22} de tracción menores dando como resultado el aumento de σ_{22} y σ_{33} y una disminución de σ_{11} .

En esta gráfica también se produce un desfase temporal entre las ondas por los motivos mencionados en el caso anterior⁵.

⁵ No se va a realizar la comparación entre las ondas de 2° y 5° ya que la onda transmitida de 1° resulta ser idéntica a la de 2°, por lo que la comparación para el plano 25% sería la misma que la de la Figura 4.120. Y para el plano 50%, los resultados coincidirían con los de la Figura 4.122.

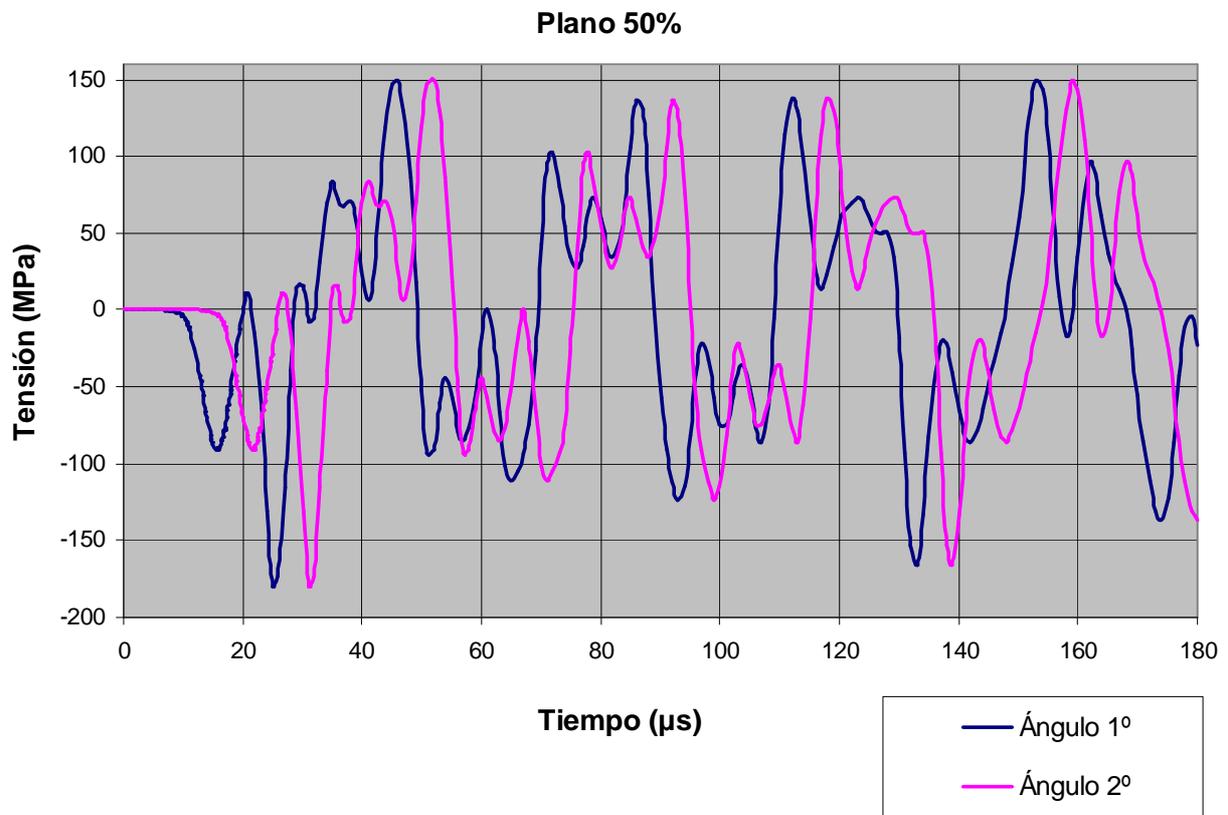


Figura 4.121 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1° y 2°. Plano 50%

Al igual que ocurría en la Figura 4.119, las ondas registradas en este caso son idénticas, la única diferencia es el desfase temporal entre ellas debido a la mayor separación del flyer con respecto a la probeta que provoca un impacto más tardío.

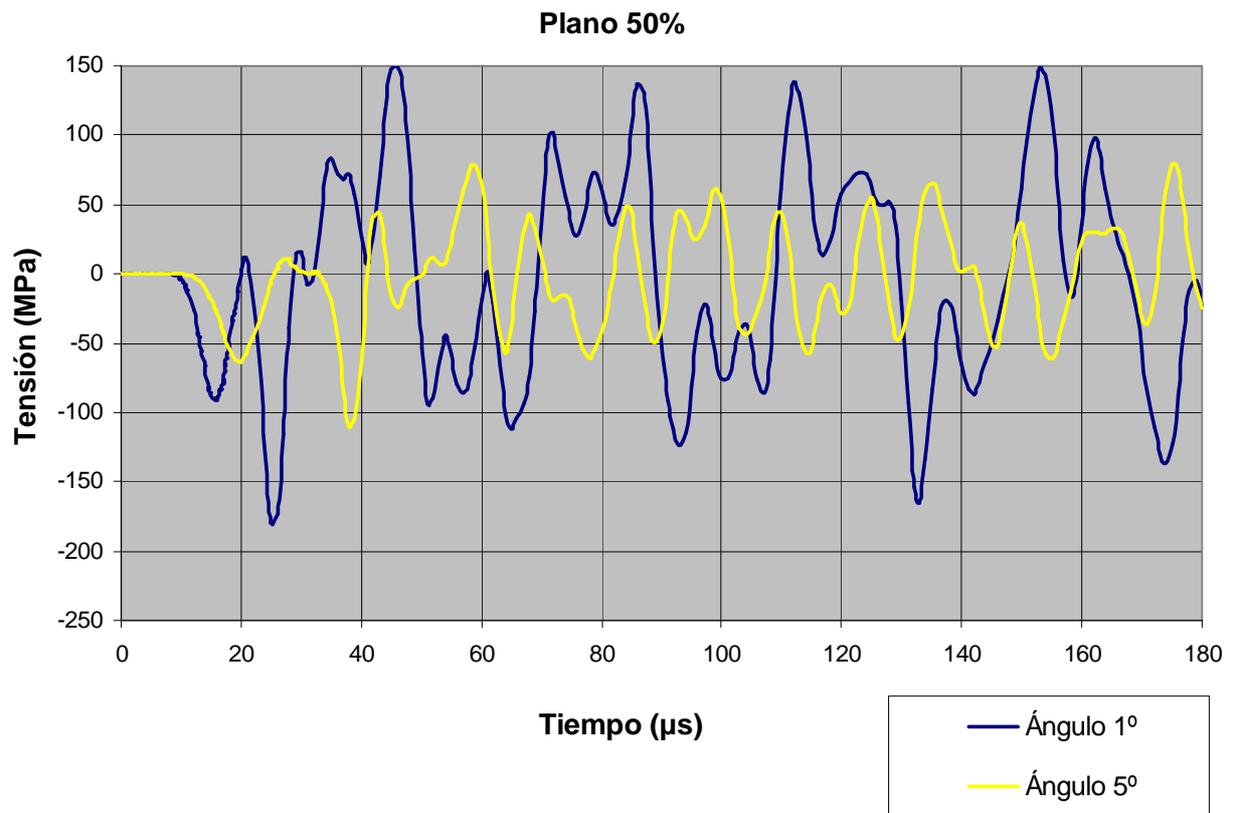


Figura 4.122 Comparación de la tensión σ_{11} producida por el impacto oblicuo de flyers 1° y 5°. Plano 50%

En la Figura 4.122 se puede observar lo comentado en la Figura 4.120 pero de manera más acentuada ya que al ser un plano más alejado de la cara de impacto, existen menos perturbaciones y las ondas son más estables.

4.5.5 Conclusión

Como puede observarse en la Imagen 2, la inclinación del flyer provoca que toda la fuerza del impacto sea absorbida por, en el peor de los casos, un único elemento en vez de repartirse por toda una superficie. Inmediatamente después de este primer impacto el flyer girará impactando sobre el resto de la superficie de la probeta. Lógicamente, el elemento donde se produce el primer impacto es dónde se localizarán las mayores tensiones. En realidad, dicho elemento y unos cuantos a su alrededor plastificarán debido al impacto, introduciendo así un nuevo parámetro que no tiene en cuenta la teoría y distorsionará aún más los resultados obtenidos con los teóricos.

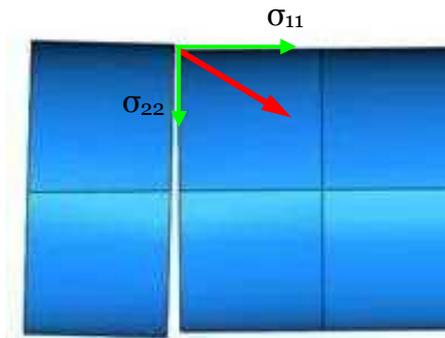


Imagen 2 Descomposición de tensiones

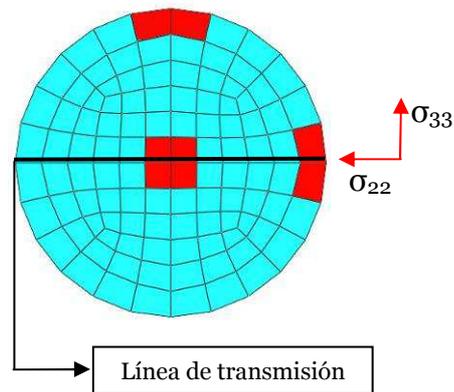


Imagen 3 Línea de transmisión

Por lo tanto, la onda que introduce el impacto oblicuo recorrerá la probeta como se muestra en la Imagen 4:

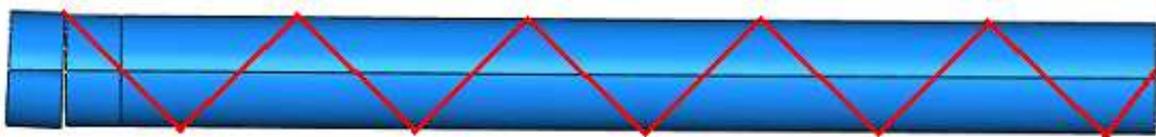


Imagen 4 Transcurso de la onda transmitida

En el impacto plano se transmite una onda perpendicular a la cara de impacto que únicamente se refleja en la cara opuesta, es decir, se produce una única reflexión por cada vez que la onda recorre la probeta. En cambio, en el impacto oblicuo, la onda va reflejándose en las paredes de la probeta introduciéndose muchas más perturbaciones en los elementos. De ahí que las gráficas obtenidas en este caso tengan tantos picos.

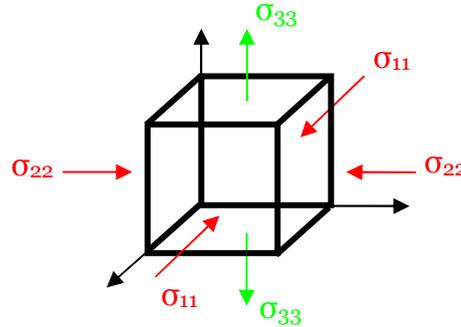
El impacto oblicuo introduce por acción directa del choque:

- Tensión σ_{11} de **compresión**.
- Tensión σ_{22} de **compresión**.

Por otro lado:

- Debido al efecto Poisson provocado por σ_{11} de impacto, se producen σ_{22} y σ_{33} de **tracción**.

- Debido al efecto Poisson provocado por σ_{22} de impacto, se producen σ_{11} y σ_{33} de **tracción**.



Comparando las tensiones en cada caso se obtiene:

Tensiones Impacto Oblicuo	Tensiones Impacto Plano
$\sigma_{11} = \sigma_{11IMPACTO} - \nu \cdot \sigma_{22IMPACTO}$	$\sigma_{11} = \sigma_{11IMPACTO}$
$\sigma_{22} = \sigma_{22IMPACTO} - \nu \cdot \sigma_{11IMPACTO}$	$\sigma_{22} = \nu \cdot \sigma_{11IMPACTO}$
$\sigma_{33} = \nu \cdot \sigma_{11IMPACTO} + \nu \cdot \sigma_{22IMPACTO}$	$\sigma_{33} = \nu \cdot \sigma_{11IMPACTO}$

Tras el análisis realizado se observa que la inclinación de tan sólo 1º provoca que las tensiones σ_{22} y σ_{33} dupliquen su magnitud (de 3MPa a 6MPa) con respecto a las obtenidas en los casos de impacto plano. También aumenta la tensión σ_{11} , de 35MPa a 80MPa, debido a la reducción del área de impacto ya explicada.

Así pues, como se ha podido comprobar en los resultados obtenidos, la inclinación de 1º y 2º del flyer con respecto a la probeta transmite ondas que pueden considerarse válidas en cuanto magnitud, ya que σ_{22} y σ_{33} representan menos del 10% de σ_{11} , que es el límite considerado en el caso de impacto plano.

Sin embargo, el caso de inclinación de 5º resulta no ser válido ya que se introduce directamente una σ_{22} de mayor magnitud, esto provoca una reducción de σ_{11} como puede deducirse de las ecuaciones anteriores ya que:

- Por el principio de conservación de energía, si σ_{22} aumenta, alguna de las otras componentes (o ambas) deben disminuir para que la energía total se

conserva. Por lo que la magnitud del primer término de la ecuación disminuye.

- Si σ_{22} aumenta, el término negativo de la ecuación aumenta su valor.

Debido a esta reducción el valor de σ_{11} se reduce a 55MPa, y σ_{22} y σ_{33} aumentan hasta los 7MPa y 10MPa respectivamente, representando más del 10% del valor de σ_{11} invalidando así el ensayo.

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Una vez analizadas todas las simulaciones realizadas se han extraído las siguientes conclusiones:

1. La utilización de probetas de sección circular favorece a obtener resultados más próximos a los teóricos debido a que el flyer se deforma de una manera más uniforme e impacta por igual en todos los elementos de la cara al contrario que en probetas de sección cuadrada, dónde los elementos de los vértices estaba sometidos a mayores tensiones. Además, la utilización de probetas de sección cuadrada requiere de flyers de mayor diámetro para que toda la superficie de la probeta reciba el impacto lo que favorece la aparición del efecto envolvente que invalida el ensayo. Por lo tanto, **se utilizarán probetas de sección circular.**
2. El espesor del flyer influye directamente en la longitud de la onda transmitida e indirectamente en la magnitud de la misma, ya que un flyer de mayor espesor sufrirá menores deformaciones minimizando el efecto envolvente. Sin embargo, flyers de mayor espesor transmiten ondas que tardan más tiempo en estabilizarse. Esto no es deseable ya que existe menor separación entre la onda transmitida y la reflejada y el cruce de ondas puede producirse si la probeta no es lo suficientemente larga, haciendo que se registren datos falseados por este fenómeno. Por lo tanto, **se utilizarán flyers de poco espesor.**
3. Al igual que el espesor, el material utilizado en el flyer también influye directamente en la longitud de la onda transmitida, ya que la velocidad de transmisión de ondas depende del material ($V_{ACERO} > V_{ALUMINIO}$) e indirectamente en la magnitud, ya que un material más resistente se deformará menos durante el impacto reduciendo así el efecto envolvente. La utilización de materiales más resistentes permite reducir el espesor del flyer para obtener ondas más estables y, gracias a la menor deformación, se minimiza el efecto envolvente. En este estudio se han comprado flyers de

aluminio y de acero, obteniéndose mejores resultados con éste último. Por lo tanto, **se utilizarán flyers de acero.**

4. La utilización de un flyer de diámetro mucho mayor que la sección de la probeta provoca una mayor deformación de éste durante el impacto haciendo que el efecto envolvente cobre más importancia. Así pues, las tensiones en direcciones perpendiculares al eje longitudinal de la probeta aumentan su valor invalidando la hipótesis de propagación unidimensional. Idealmente, la mejor solución sería utilizar flyers del mismo diámetro de la probeta, pero en cuanto haya un pequeño desalineamiento el flyer no impactará con la totalidad de la superficie de la probeta. Por lo tanto, **se utilizarán flyers de diámetro ligeramente superior a la sección de la probeta** para asegurar que, en caso de desalineamiento, se produzca contacto en la totalidad de la superficie de ésta y evitar en la mayor medida posible el efecto envolvente.
5. Una ventaja añadida de utilizar probetas de sección circular es que, gracias a su simetría axial, la inclinación angular con la que impacte el flyer afectará del mismo modo sea cual sea el eje de rotación. Se ha comprobado que pequeños desalineamientos angulares, de 1° o 2° , producen resultados válidos. En cambio, un desalineamiento de 5° produce una tensión en una de las direcciones perpendiculares a la probeta que invalida el ensayo. Por lo tanto, se debe **controlar que las caras de probeta y flyer durante el impacto sean lo más paralelas posible.**
6. Otra de las conclusiones extraídas de este trabajo (que ya ha sido comentada durante el mismo) es que, por muy ideales que sean las condiciones del ensayo, jamás se cumplirán las condiciones que dicta la teoría y por ello no se podrán obtener los mismos resultados. El reto consiste en conseguir enunciar hipótesis para obtener modelos dónde realizar ensayos Spalling válidos.

5.2 Trabajo futuro

Se han realizado múltiples simulaciones con varios tipos de probetas y flyers, gracias a este trabajo, no es necesario realizar ensayos reales de todos y cada uno de los modelos analizados ya que, gracias a la simulación de numérica, se ha comprobado que algunos de los modelos no son válidos. Sin embargo, además del modelo que ha resultado ser válido, sería interesante realizar ensayos reales de algunos de los modelos no válidos para comprobar la desviación existente entre los datos de las simulaciones y los datos registrados en el laboratorio. Se propone realizar ensayos de los siguientes modelos:

- Probeta 100x10x10mm. Flyer Aluminio Ø20x5mm.
- Probeta Ø10x100mm. Flyer Aluminio Ø10x5mm.
- Probeta Ø10x100mm. Flyer Acero Ø10x5mm.

Tras el análisis en el laboratorio se conocerá lo que sucede realmente en el ensayo y, con los nuevos datos obtenidos, se podrán mejorar las simulaciones con el fin de obtener resultados más realistas. Hay que trabajar mucho en esta dirección ya que, como se ha mencionado, las condiciones que se han introducido en el modelo de elementos finitos son muy ideales ya que se han obviado otros parámetros importantes bien por asumir ciertas hipótesis o bien por su desconocimiento. El objetivo de este proyecto es realizar un estudio para conocer cómo reacciona el modelo al ensayo Spalling y tener un punto de partida para comenzar a trabajar en el laboratorio.

Por otro lado, como ya se comentó en el capítulo 3.6, en los ensayos reales existe el sabot pero se ha obviado en las simulaciones para simplificarlas, por lo que los resultados obtenidos, por muy precisos que sean, van a diferir con los reales. Sería interesante realizar simulaciones con modelos que incluyan el sabot y comparar los resultados con los de las simulaciones sin sabot además de con los ensayos de laboratorio.

6 BIBLIOGRAFÍA

Aurora Hay Sun Blunt. "Measuring Very High Rate Fracture Toughness of Plastics". Ed. Imperial College London , 2004.

Bathe K.J. "Finite element procedures in engineering analysis". Ed. Prentice-Hall. London, 1982.

"Análisis de problemas de choque e impacto entre sólidos deformables por el método de los elementos finitos: proyecto SIMPACT". Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1995.

Francisco Gálvez Díaz-Rubio. "Caracterización mecánica de materiales cerámicos avanzados a altas velocidad de deformación". 1999.

L. Aretxabaleta, M. Mateos, J. Aurrekoetxea, I. Urrutibeascoa, G. Castillo. "Simulación de ensayos de impacto tracción sobre probetas de plástico mediante el método de elementos finitos". 2007.

L. Aretxabaleta, M. Mateos, J. Aurrekoetxea, A. Ispizua, G. Castillo, I. Urrutibeascoa, I. López. "Simulación del comportamiento a impacto de un componente de material compuesto para automoción". 2009.

Fried I. "Numerical solutions of differential equations". Academic Press. New York, 1967.

Gorham, D.A. "Measurements of stress-strain properties of strong metals at very high rates of strain". Mechanical properties at high rates of strain. Ins. Phys. Conf., Ser. No. 47, 1. 1979.

Harding J., Wood E.D., Campbell J.D. "Tensile testing of materials at impact rates of strain". J. Mech. Engng. Sci., Vol. 2, pp. 1-9, 1960.

Hopkinson B. "A method of measuring the pressure produced in the detonation of explosives or by the impact of bullets". Phil. Trans. A., Vol.213, P.437, 1913.

J.A. Loya. "Technical report. Version 1", 2006.

- Johnson, W. "Impact Strength of Materials". Ed. Arnold, London, 1972
- Johnson G. R., Holmquist T. J. "A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates and high pressures". Shock Wave and High Strain Rate Phenomena in Materials. pp 1075-1081. M.A. Meyers, L.W. Murr and K.P. Staudhammer (eds.). Marcel Dekker, 1992.
- Kolsky H. "An investigation of the mechanical properties of materials at very high strain rates". Proc. Royal Soc. B. Vol.62 p.676, 1949.
- Kolsky H. "Stress waves in solids". Dover Publications Inc. New York, 1963.
- Lindholm U.S., Yeakley L.M. "High strain rate testing: Tension and compression". Exp. Mech., Vol. 8, pp. 1-9, 1968.
- Lindholm U. S. "High strain rate tests". Techniques of metals research. Capítulo 5, apéndice A. Vol. 5, Pt. 1 Ed. R. F. Bunshah., John Willey & Sons, 1971.
- Louro, L. H. L., Meyers M. A. "Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics". J. Mat. Sci. 24, pp 2516-2532, 1989.
- Maiden, C. J. Green S. J. "Compressive strain rate test on six selected materials at strain rates from 10⁻² to 10¹ in/in/sec". J. Of Appl. Mech., 33, 496, 1966.
- Meyers M.A. "Dynamic failure: mechanical and microstructural aspects". Colloque C8 Supplément au Journal de Physique III, n^o4, pp.597-621 septembre 1994.
- Nicholas "Dynamic tensile testing of structural materials using a Split Hopkinson Bar apparatus". Technical report AFWAL-TR-80-4053. 1980.

Rafael Avilés y M. B Goizalde Ajuria. “Análisis dinámico mediante elementos finitos”. Ed. Universidad del País Vasco, Departamento de Ingeniería Mecánica, 1995.

Restrepo Botero, Victo Hugo. “Implementación de una solución para el fenómeno de propagación unidimensional de ondas en pilotes y su adaptación para la interpretación de resultados de la prueba de integridad de pilotes (PIT)”. Ed. Universidad Pontificia Javeriana. Bogotá DC. Departamento de Ingeniería Civil, 2005.

Quinn G.D. “Strength and proof testing”. Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.

Rinehart J. S. "Stress transients in solids". Ed. HyperDynamics. Santa Fe, New Mexico, 1975.

Timoshenko S., Goodier J. N. "Teoría de la elasticidad" Ed. Urmo. Bilbao, 1972.

Wulf, G.L. “Dynamic stress-strain measurements at large strains”. Mechanical properties at high rates of strain. Ins. Phys. Conf., Ser. No. 21, London. 1974.

Yaziv D. “Shock fracture and recompaction of ceramics”, Ph. D. Thesis, University of Dayton Research Institute, Ohio. 1985.

Zienkiewicz, O.C. “El método de los elementos finitos”. Ed. CIMNE, 2004

Zukas J.A. “High Velocity Impact Dynamics” Ed. John Willey and Sons, 1990

Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D.R. “Impact Dynamics” Ed. John Willey and Sons, 1982.