

ANEXOS

En este apartado se muestran todas las gráficas de todos los ensayos realizados en cada uno de los planos.

1.1 Probetas de sección cuadrada

Con este tipo de ensayos se pretende estudiar si los resultados obtenidos en la simulación coinciden con los resultados teóricos y, si no es así, determinar las razones y en qué medida difieren dichos resultados con los teóricos.

Además, posteriormente se realizan ensayos con probetas de sección circular, con lo que se pretende obtener datos para poder determinar qué tipo de probetas son las más adecuadas en este tipo de ensayos.

Según la teoría expuesta en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 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:

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

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):

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

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

1.1.1 Probeta 50x10x10 mm. Flyer Ø22x5mm

1. Plano de choque

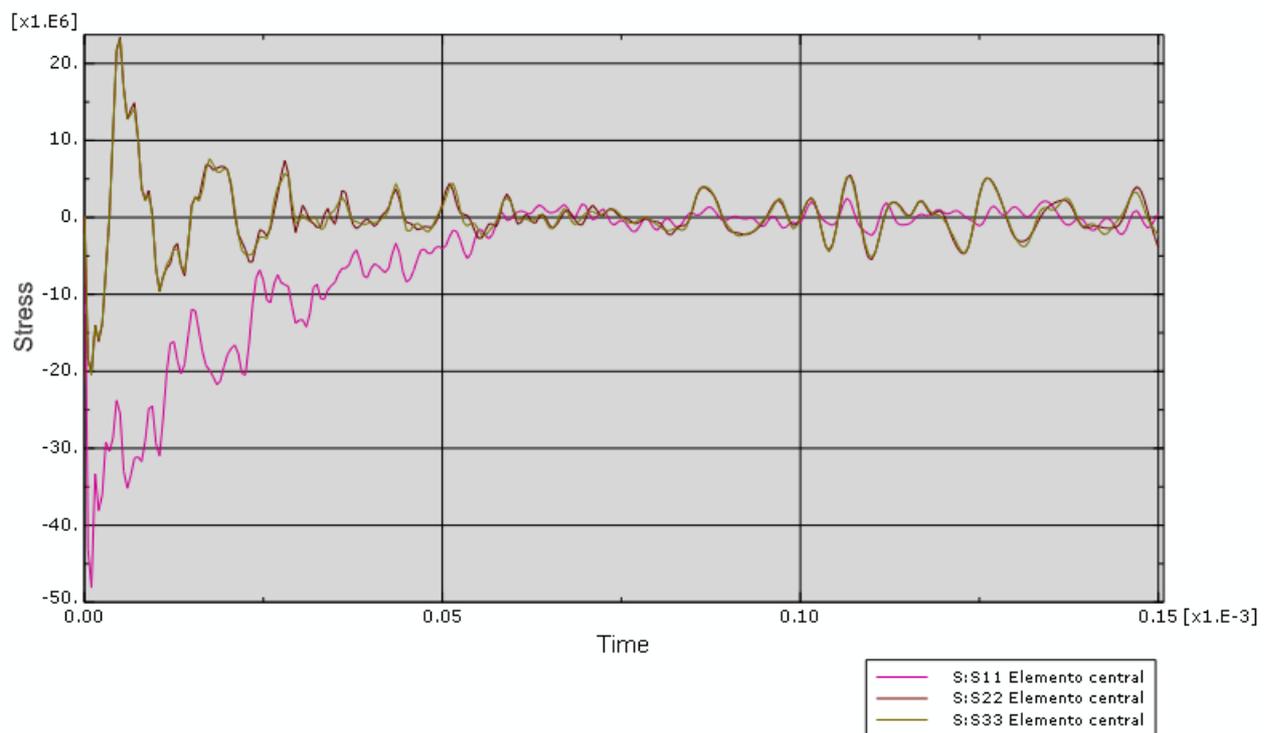


Figura 0.1 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Como se puede observar en la Figura 0.1, inicialmente se tiene una tensión de compresión predominante en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}). También se produce una pequeña compresión en las otras dos direcciones, pero debido al efecto Poisson, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor positivo convirtiéndose en tensiones de tracción de valor aproximado a la mitad del valor de compresión de σ_{11} .

A la vista de los resultados, se puede afirmar que el ensayo se ha realizado correctamente ya que la cara analizada es libre, con lo que su estado tensional debe ser nulo. Como se puede observar las tensiones adquieren cierto valor al principio debido al impacto, pero acaban por disiparse.

Únicamente con estos datos no se puede determinar si existe propagación unidimensional, con lo que será necesario analizar elementos más alejados del plano de choque.

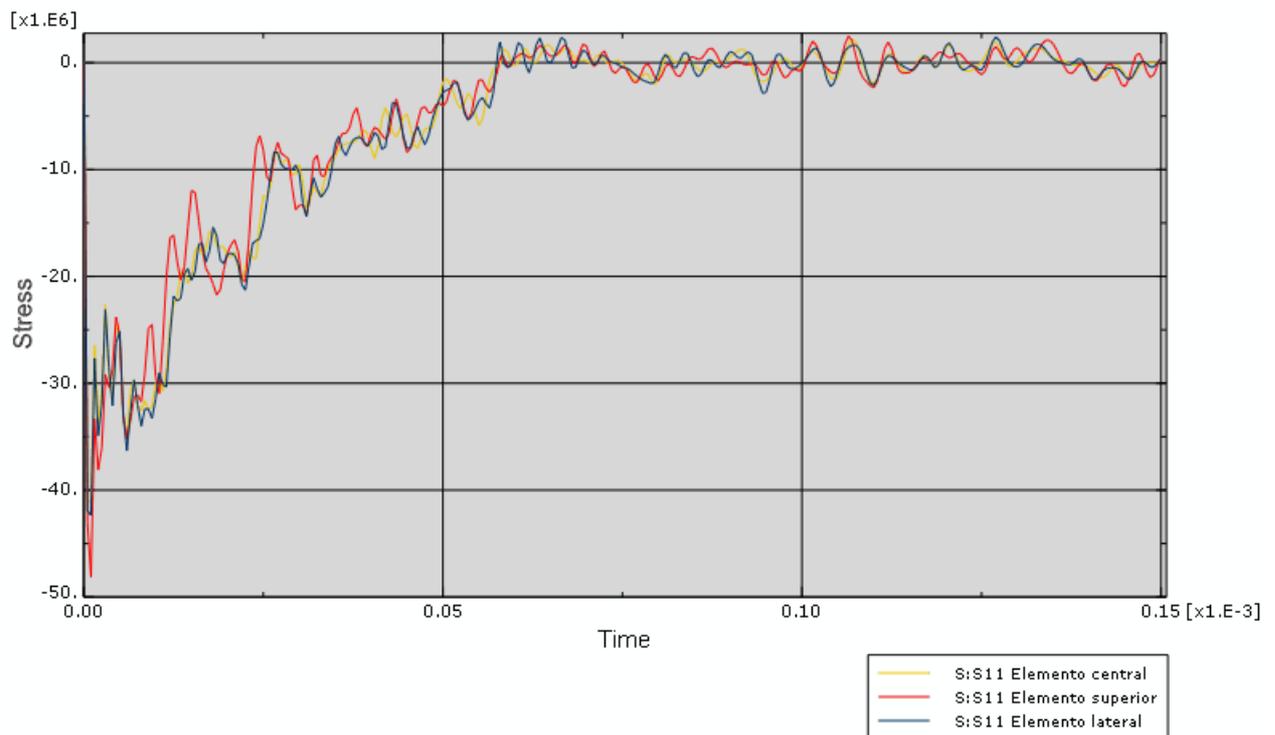


Figura 0.2 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

En la Figura 0.2 se analiza si existe tensión plana, para ello se estudia la tensión σ_{11} de los elementos central, superior y lateral del plano de choque. Como se puede comprobar, se produce prácticamente la misma tensión en todos ellos, con lo que se puede considerar que existe tensión plana y por tanto sería indiferente colocar las galgas extensométricas en el plano medio de la probeta o en las caras exteriores, ya que se registraría la misma tensión.

Teóricamente la tensión producida por el impacto debe ser de 36.5MPa, mientras que el valor medio de la tensión σ_{11} obtenido en la simulación es de aproximadamente 33MPa. La causa de esta desviación se explica en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, citado textualmente: *“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”*.

Es decir, la teoría evalúa un modelo perfecto en el que únicamente existe tensión en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}). Sin embargo, en el modelo existe una pequeña contribución de las tensiones en las otras dos

direcciones y, como la energía elástica debe conservarse, la tensión σ_{11} se ve ligeramente reducida.

La causa de que las tensiones σ_{22} y σ_{33} tengan un cierto valor se debe a la deformación que sufre el flyer durante el impacto. Al ser la sección del flyer mayor que la de la probeta, durante el impacto éste se combe y la “envuelve”, provocando así separación de la parte central del flyer con respecto a la probeta y aumentando la presión en las zonas externas de la misma. Este efecto será mayor cuanto más se deforme el flyer.

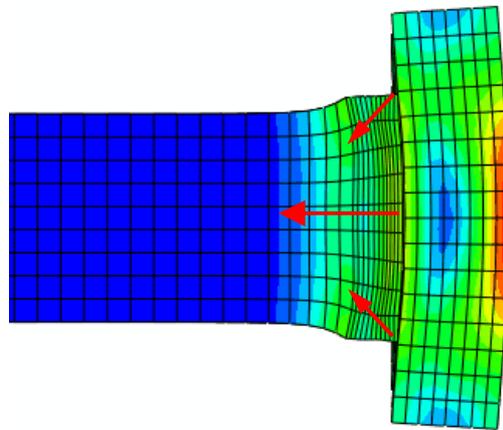


Figura 0.3 Deformación del flyer durante el impacto

Esta deformación, en mayor o menor medida, siempre va a existir, se debe determinar en qué casos puede asumirse la hipótesis de que σ_{22} y σ_{33} son despreciables produciéndose propagación unidimensional.

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

Una vez analizado el plano de choque y, aceptando que se cumplen las hipótesis de propagación unidimensional y tensión plana, se analizan los elementos situados a un 25% de la longitud de la probeta.

Como se ha mencionado en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, idealmente, la onda de compresión producida debería ser cuadrada y mantenerse constante a lo largo la probeta. Además, el pulso reflejado debe tener la misma longitud y magnitud que el de compresión

transmitido. Teóricamente la longitud del pulso para un flyer de 5mm debe de ser de:

$$t_p = 2 \frac{L}{c} = 2 \cdot \frac{5 \times 10^{-3} m}{5100 m/s} \approx 2 \mu s$$

En definitiva, el pulso teórico que el impacto de un flyer de aluminio de 5mm de espesor debe generar es de 2μs de longitud y 36.5MPa de magnitud.

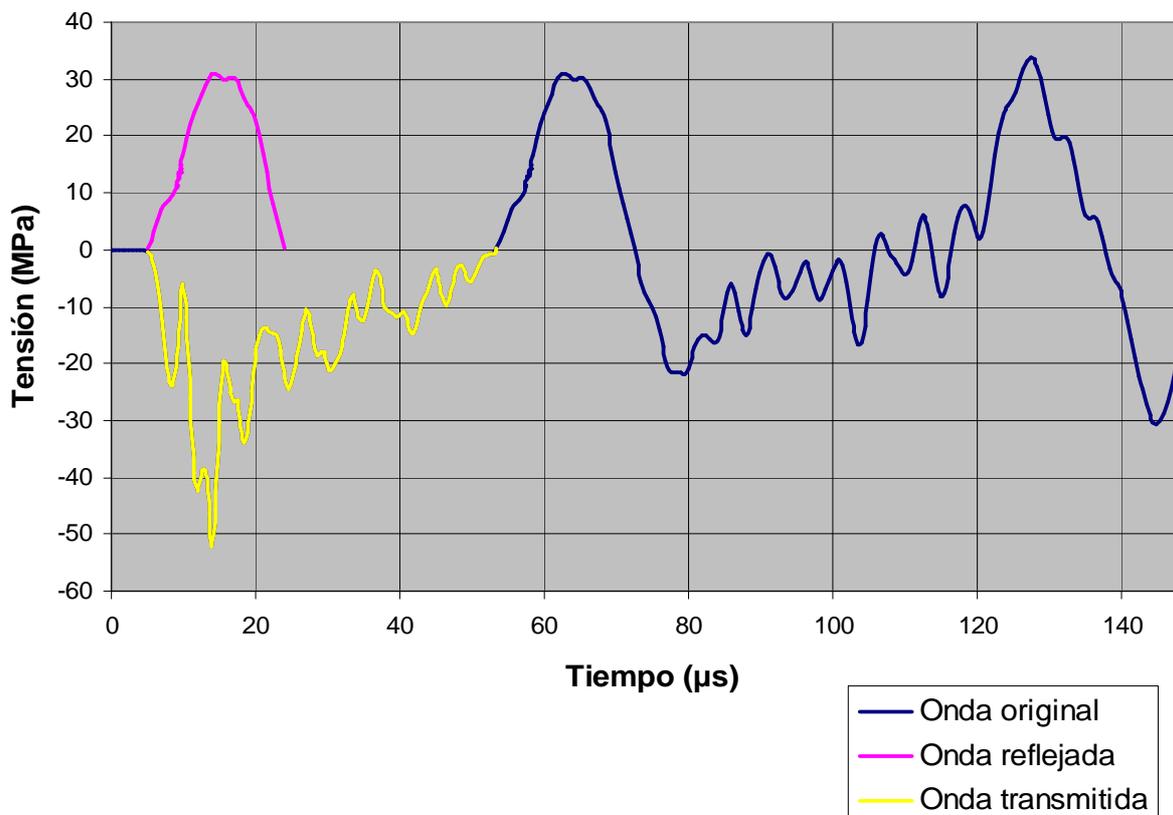


Figura 0.4 Tensión-Tiempo

En la Figura 0.4 se puede comprobar como el pulso medio registrado es de 33.8MPa de magnitud y 50μs de longitud, amén de no resultar una onda cuadrada.

Como se puede observar, la onda de compresión no ha terminado cuando empieza la de tracción, lo que significa que en este plano ya se ha producido el solapamiento de la onda transmitida (de compresión) con la reflejada (tracción), haciendo que esta probeta no sea válida para la realización del ensayo.

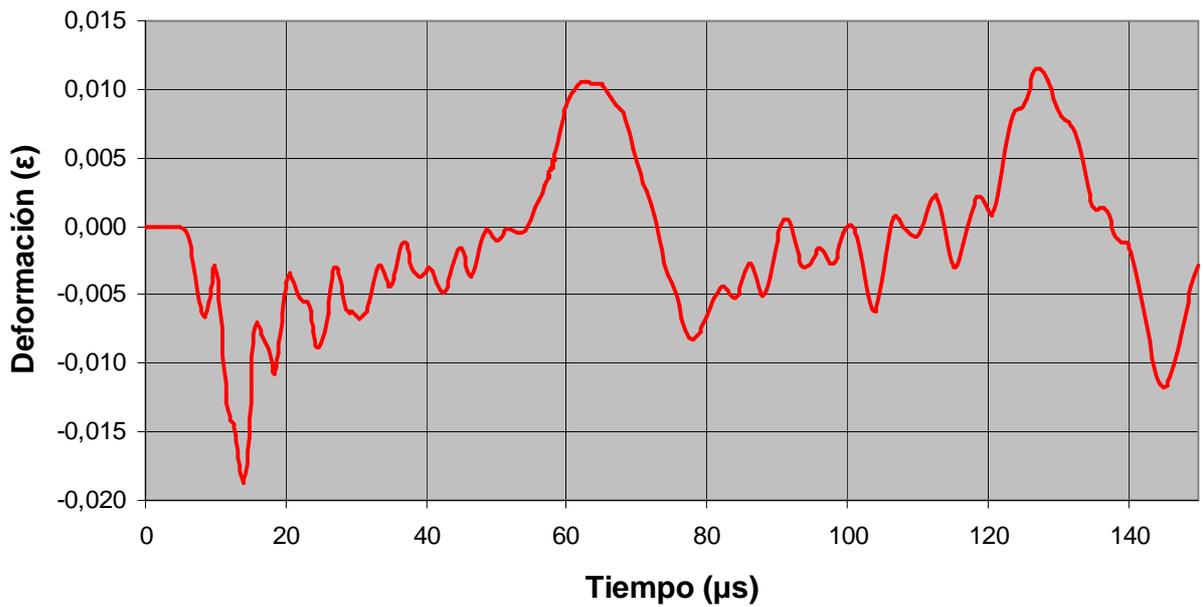


Figura 0.5 Deformación-Tiempo

En la Figura 0.5 se pueden observar las deformaciones que sufre la probeta a partir de las tensiones producidas por el impacto. Al igual que en la Figura 0.4, se puede observar que la probeta no es válida debido al solapamiento de los pulsos de tracción y compresión.

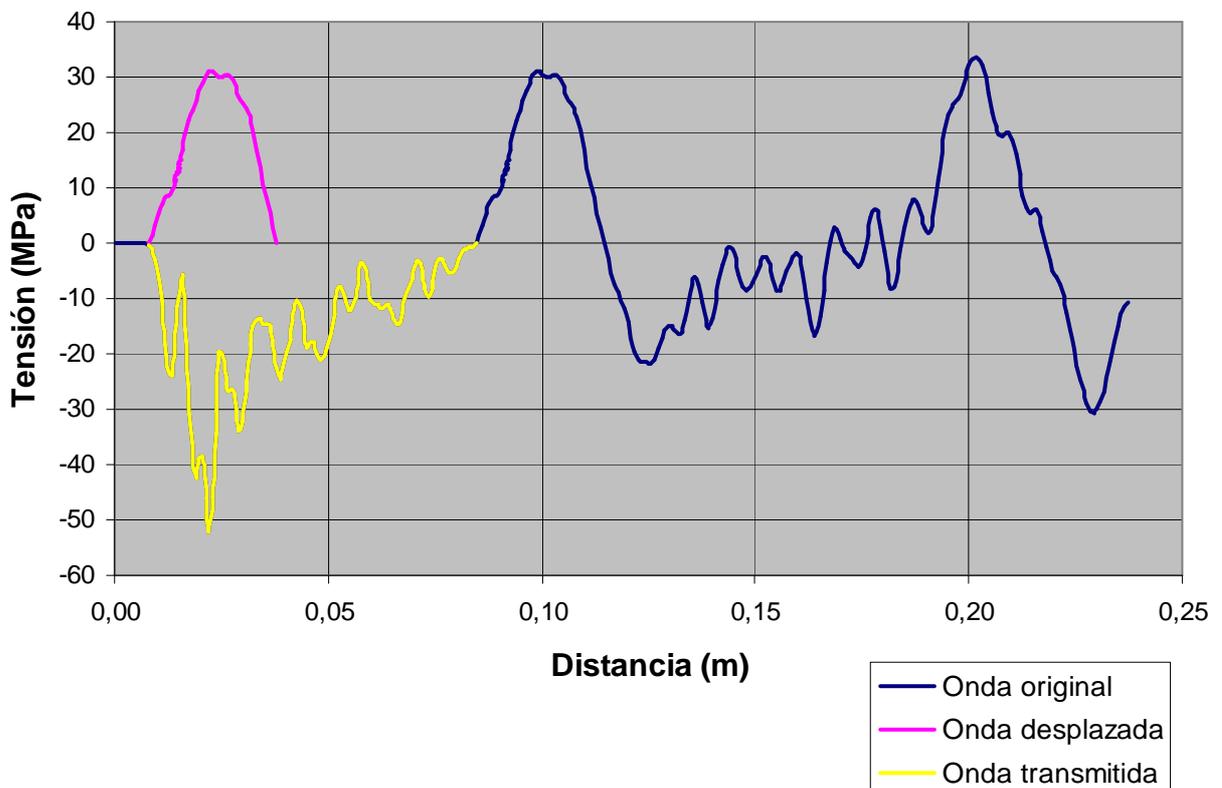


Figura 0.6 Tensión-Distancia

En la Figura 0.6 se representa la onda de tensión que sufre la probeta a lo largo de su longitud. Además, se ha señalado en amarillo la onda de compresión que se transmite en el impacto y se ha desplazado la onda de tracción (onda reflejada) haciéndola coincidir con el comienzo de la onda de compresión para poder compararlas mejor visualmente. En teoría, la magnitud y longitud de la onda transmitida debe ser igual que la reflejada.

No obstante, 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 transmisión unidimensional de ondas.

La energía que posee cada onda corresponde al área de cada curva. 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. Por lo que si la diferencia entre las áreas es menor del 10% de la mayor de ellas, se puede considerar que ambas curvas son iguales.

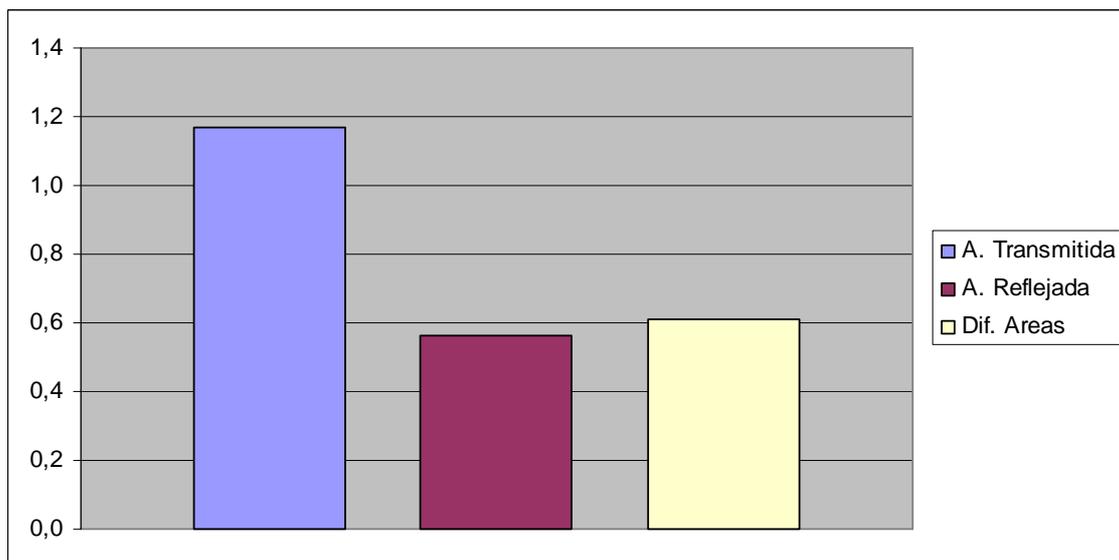


Figura 0.7 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
-1,1E+06	5,6E+05	6,1E+05	52,06

Aunque se ve claramente en las gráficas anteriores, los resultados numéricos también muestran que el área reflejada es mucho menor que la transmitida, concretamente un 52% menor.

1.1.2 Probeta 50x15x15 mm. Flyer Ø30x5mm

En este caso, aumentan tanto el área de la probeta como el área del flyer, por lo que el coeficiente de transmisión (C_T) variará haciendo que la tensión transmitida (σ_T) también varíe.

$$C_T = \frac{2A_1\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} = \frac{2 \cdot 353 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{353 \times 10^{-6} \cdot 2800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 5080 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 50 \times 10^{-6} \cdot 1200 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1580 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.261$$

$$\sigma_T = C_T \cdot \sigma_I = 0.261 \cdot 142.24 \text{MPa} = \boxed{37.2 \text{MPa}}$$

3. Plano de choque

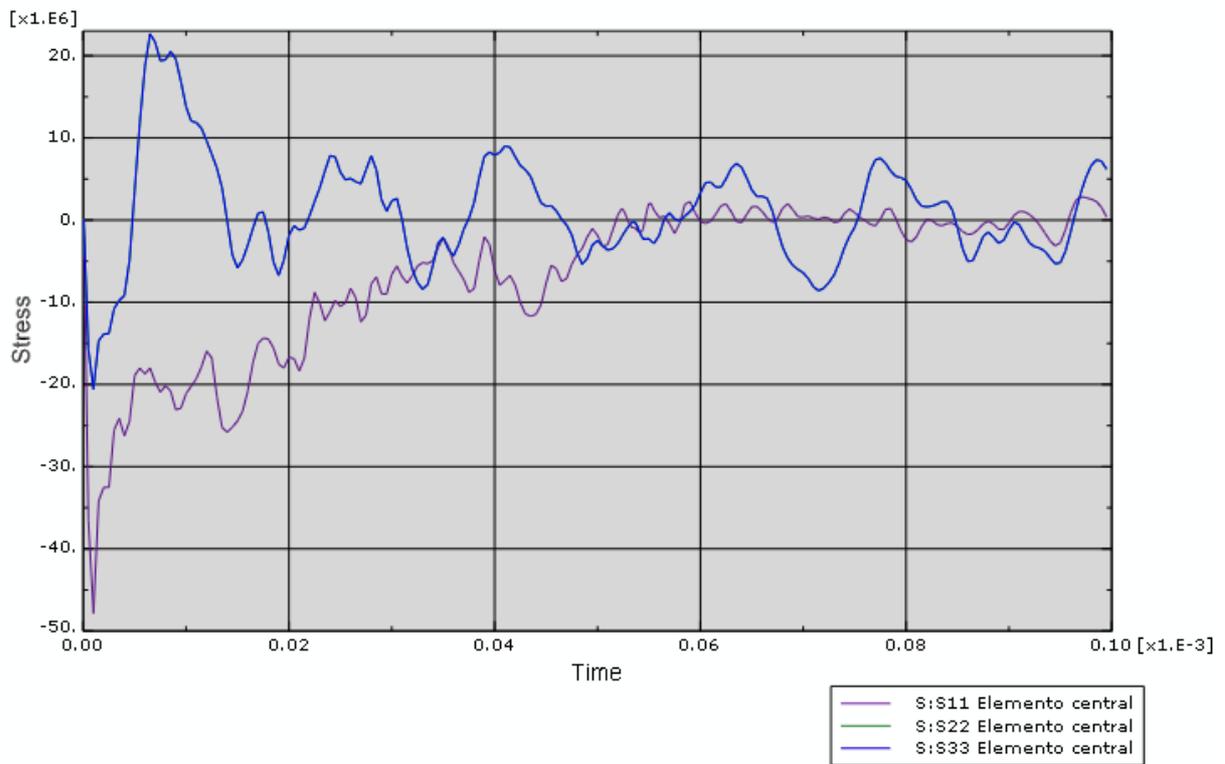


Figura 0.8 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

La Figura 0.8 muestra un perfil muy similar al de la simulación anterior, pero en este caso, las tensiones σ_{22} y σ_{33} no se disipan totalmente sino que continúan teniendo un valor apreciable lo que significa que no se produce propagación unidimensional.

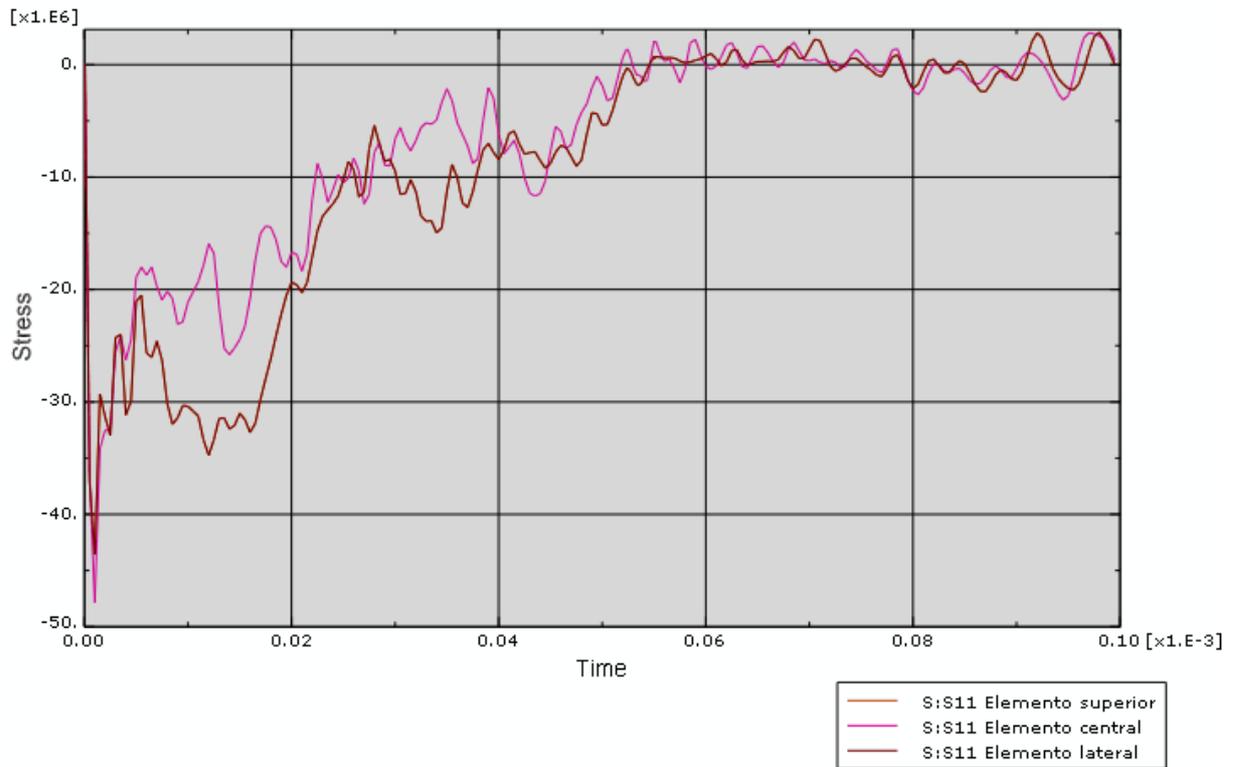


Figura 0.9 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Según se observa en la gráfica, existe un pico de tensión σ_{11} en los elementos superior y lateral que no sucede en el elemento central. Esto se debe a que en este caso el radio del flyer es mayor que en el caso anterior pero la velocidad con la que impacta es la misma, con lo la deformación del flyer comentada en la simulación anterior se acentúa provocando una disminución de la tensión σ_{11} y un aumento de las tensiones σ_{22} y σ_{33} . En este caso, el efecto “envolvente” del flyer sí es crítico e invalida el ensayo.

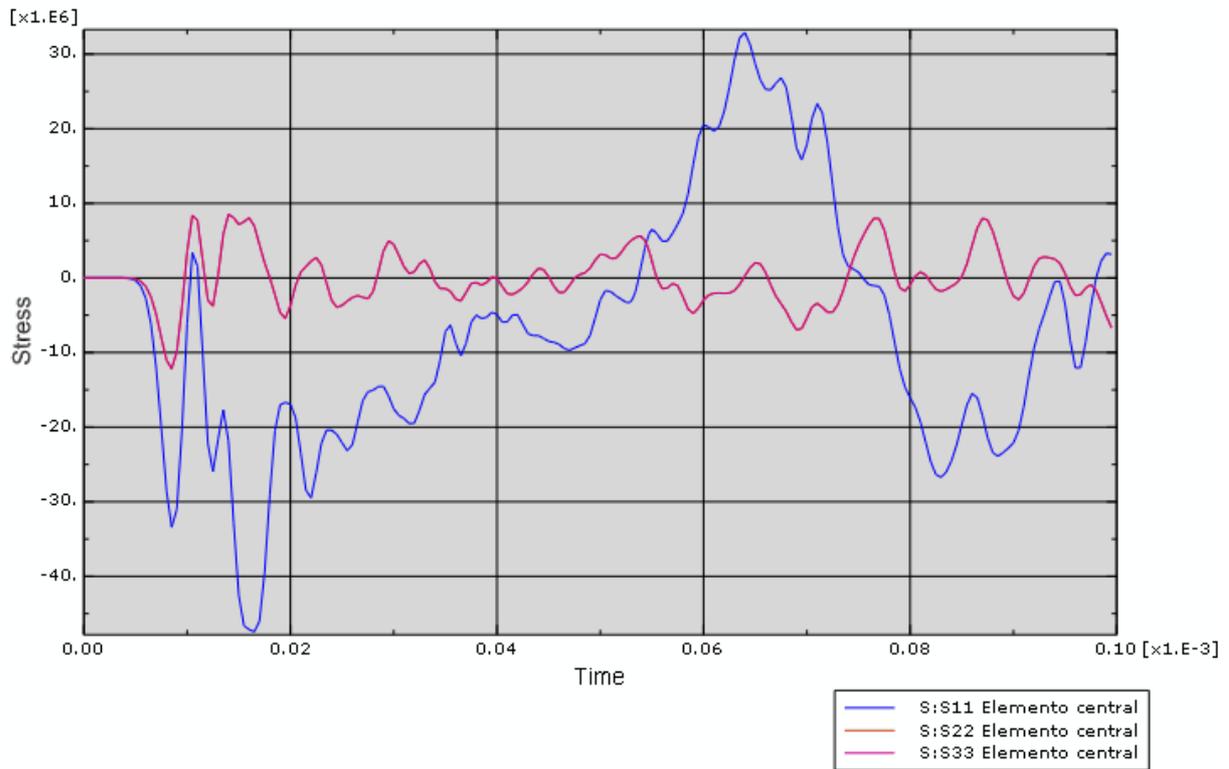


Figura 0.10 Tensiones producidas por el impacto en el plano 25% de la longitud de la probeta

Para corroborar que este hecho no sólo se produce en el plano de choque, en la Figura 0.10 se analiza el plano al 25% de la longitud de la probeta. Se comprueba que las tensiones σ_{22} y σ_{33} lejos de disiparse continúan teniendo valores cercanos a los 10MPa. Tras este análisis, se puede confirmar que esta probeta no es válida ya que no se cumple la hipótesis de propagación unidimensional.

1.1.3 Probeta 100x10x10 mm. Flyer Ø22x5mm

En este caso, la tensión transmitida es la misma que en el caso de la probeta de 50x10x10mm:

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

1. Plano de choque

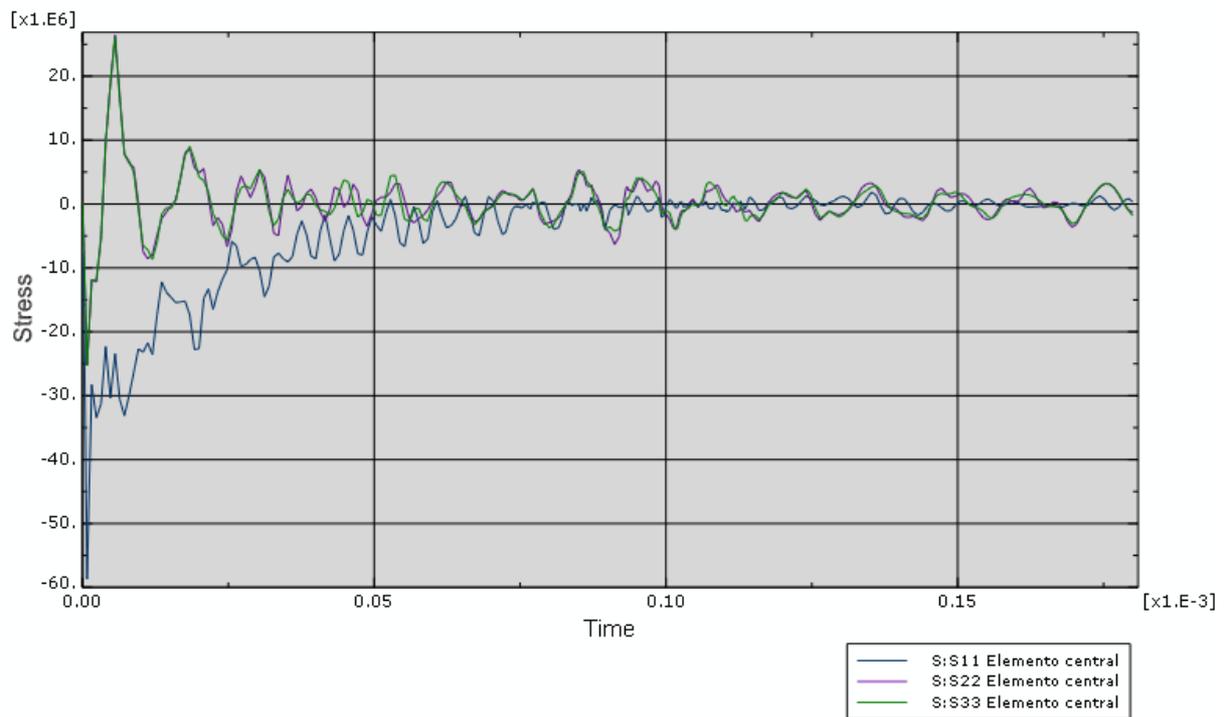


Figura 0.11 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Al igual que ocurre en las otras simulaciones, la Figura 0.11 muestra como inicialmente se produce una tensión compresión en las tres direcciones, pero predominante en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}). Posteriormente, debido al efecto Poisson, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor positivo convirtiéndose en tensiones de tracción que se disipan rápidamente, cumpliéndose las condiciones de estado tensional nulo en cara libre.

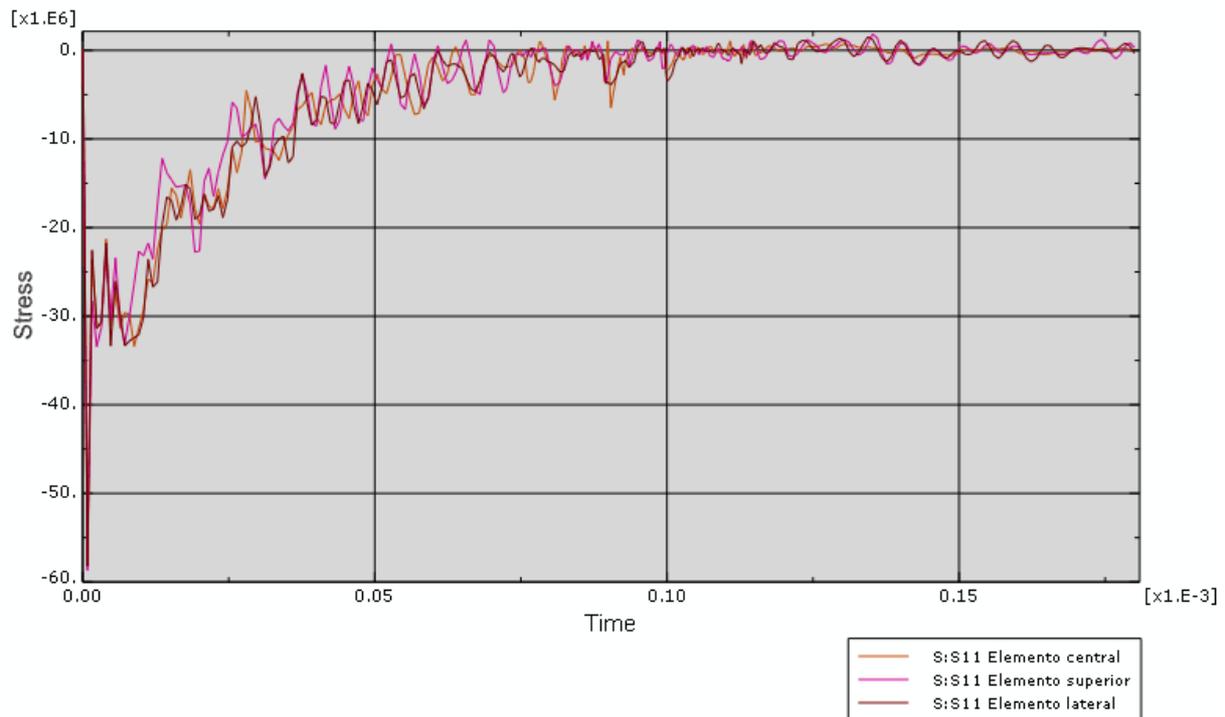


Figura 0.12 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

La Figura 0.12 muestra como los elementos central, superior y lateral de la cara de choque, se observa están sometidos prácticamente a la misma tensión en el eje longitudinal de la probeta (σ_{11}).

El valor medio de la tensión σ_{11} obtenida en la simulación es de aproximadamente 32.5MPa, mientras que el teórico es de 36.5MPa. Esta pequeña desviación es consecuencia de la contribución de las tensiones σ_{22} y σ_{33} así como de la deformación sufrida por el flyer explicada anteriormente.

Por todo ello, en una primera evaluación de estas gráficas, se puede considerar se cumplen las condiciones de propagación unidimensional y tensión plana haciendo la probeta válida para el ensayo.

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

Una vez comprobado que existe propagación unidimensional y tensión plana en el modelo, se analizan los elementos situados en un plano a una distancia del 25% de la longitud total de la probeta. En esta ocasión el pulso teórico debe de ser de 36.5MPa de magnitud y de 2 μ s de longitud.

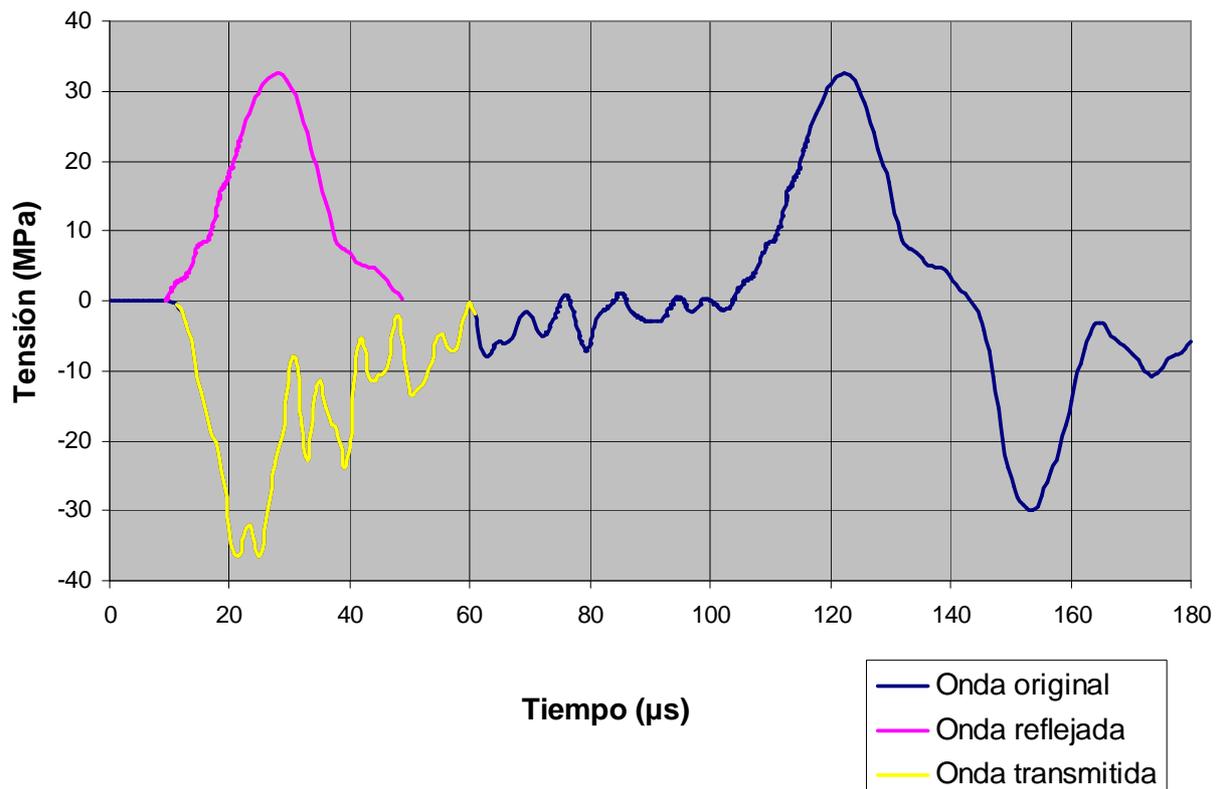


Figura 0.13 Tensión-Tiempo

Los datos mostrados en la Figura 0.13 muestran que el valor máximo del pulso de compresión generado coincide con el teórico (36.5MPa), pero se debe tomar como referencia el valor medio, que es de 34.5MPa. Sin embargo, como se puede comprobar, la longitud del pulso transmitido es de 50μs, mucho mayor que los 2μs teóricos.

El hecho de que la longitud de onda sea tan grande es porque el frente de ondas necesita de un tiempo (o una distancia) para estabilizarse y, en este plano es tan cercano al de choque, aún no lo ha hecho. Como puede observarse, el pulso reflejado, que ha recorrido una distancia mayor, es un pulso mucho más estable que el transmitido tanto en magnitud como en longitud. Por ello, se deben analizar planos más alejados para obtener una onda estable y poder comparar sus parámetros con los teóricos.

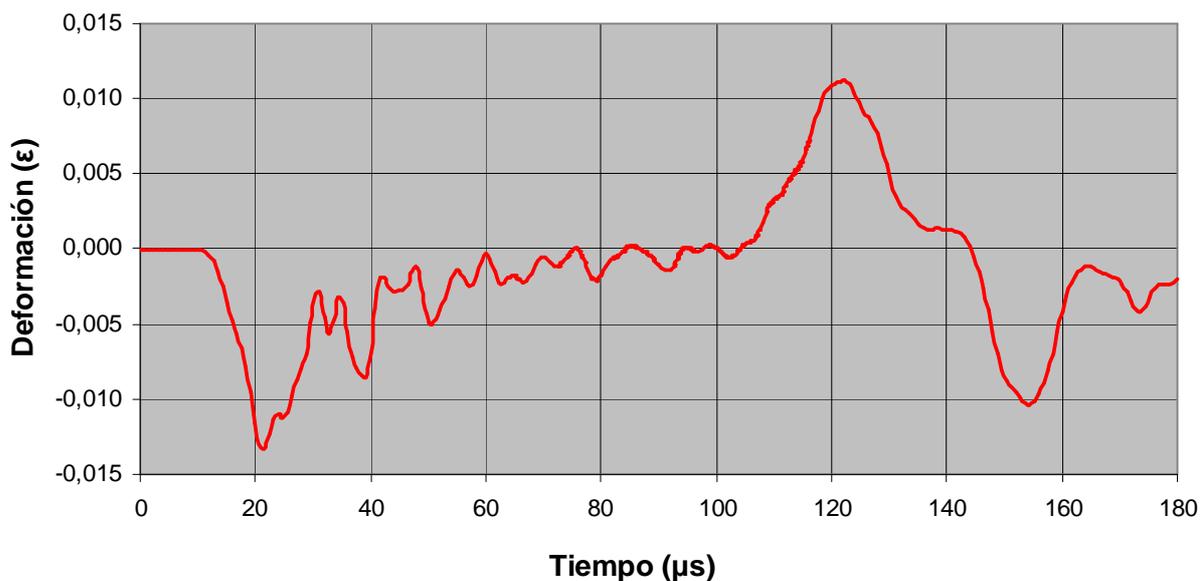


Figura 0.14 Deformación-Tiempo

La Figura 0.14 muestra la deformación que sufre la probeta a partir de las tensiones producidas por el impacto. Al igual que en la gráfica anterior, se puede observar como la onda aún no es estable y también que aún no se ha producido el cruce de la onda transmitida con la reflejada.

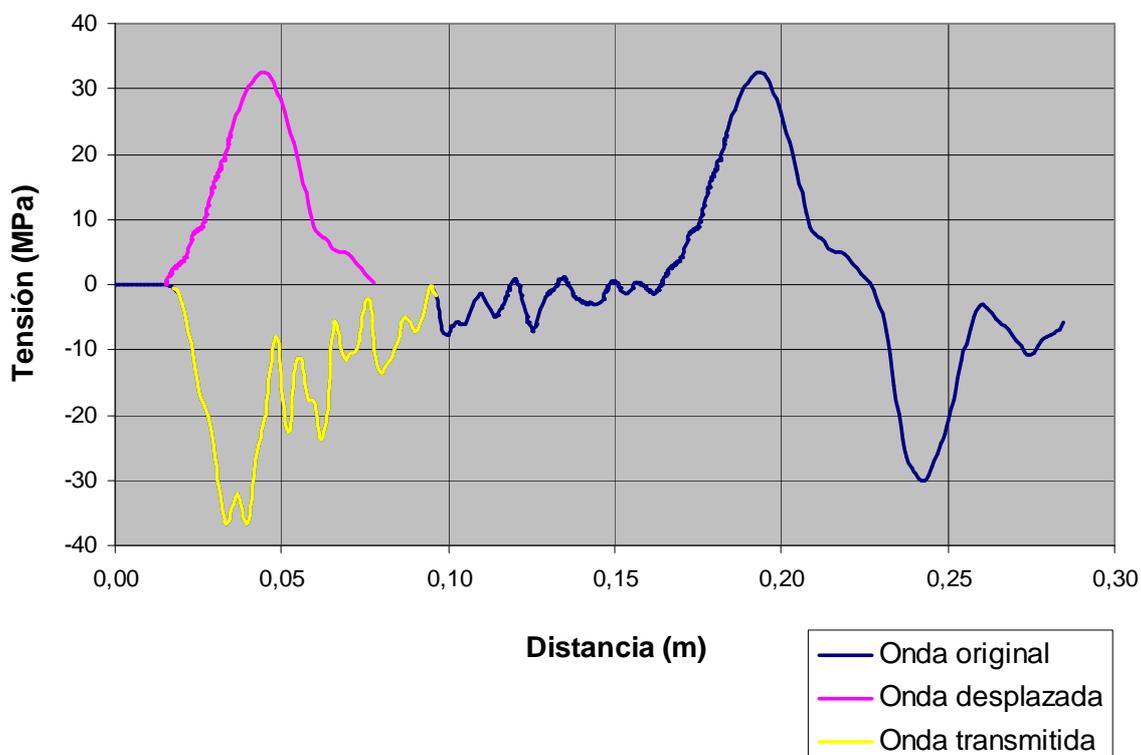


Figura 0.15 Tensión-Distancia

En la Figura 0.15 se representa la onda de tensión que recorre la probeta a lo largo de la longitud de ésta. Además, para facilitar la comparación entre la onda transmitida y la reflejada, se han acoplado en el mismo instante de tiempo y resaltado con diferentes colores.

En teoría, la onda de tracción reflejada debe de ser igual a la de compresión transmitida. Como ya se ha mencionado, para comprobar si las ondas son iguales, no se deben comparar su magnitud ni longitud si no su energía, que es el área debajo de cada curva.

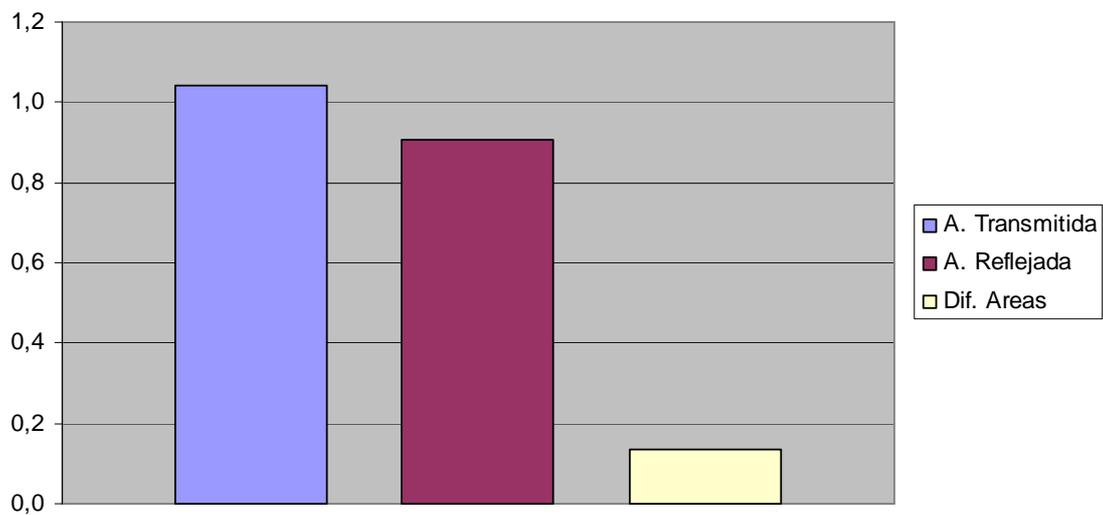


Figura 0.16 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
-1,04E+06	9,07E+05	1,34E+05	12,9

Los resultados revelan que las áreas de cada curva son similares, pero no se pueden considerar iguales ya que superan el límite impuesto de diferencia inferior al 10%. No obstante, es un resultado satisfactorio en comparación con los anteriores para seguir investigando en esta línea.

3. Plano medio (plano límite)

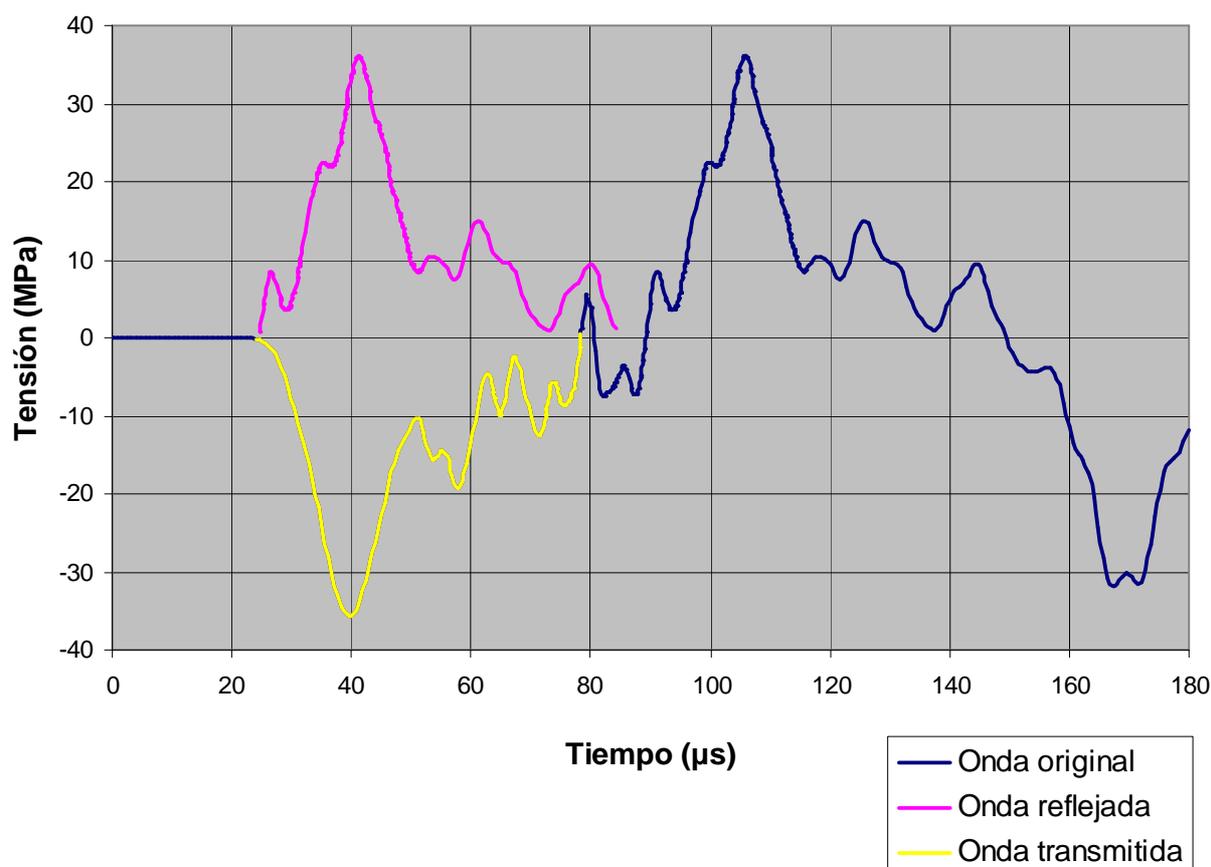


Figura 0.17 Tensión-Tiempo

La Figura 0.17 muestra como el pulso de compresión registrado es más tardío ya que la toma de datos se produce en un plano más alejado del plano de impacto. Se puede observar como el pulso transmitido y reflejado tienen un aspecto mucho más similar entre ellos que en el plano anterior.

El valor de la magnitud del pulso en este caso es de 35,6MPa, valor más próximo al teórico de 36,5MPa que el anterior. Esto se debe a que la onda es más estable en este plano. Sin embargo, la longitud del pulso sigue siendo del orden de 50µs.

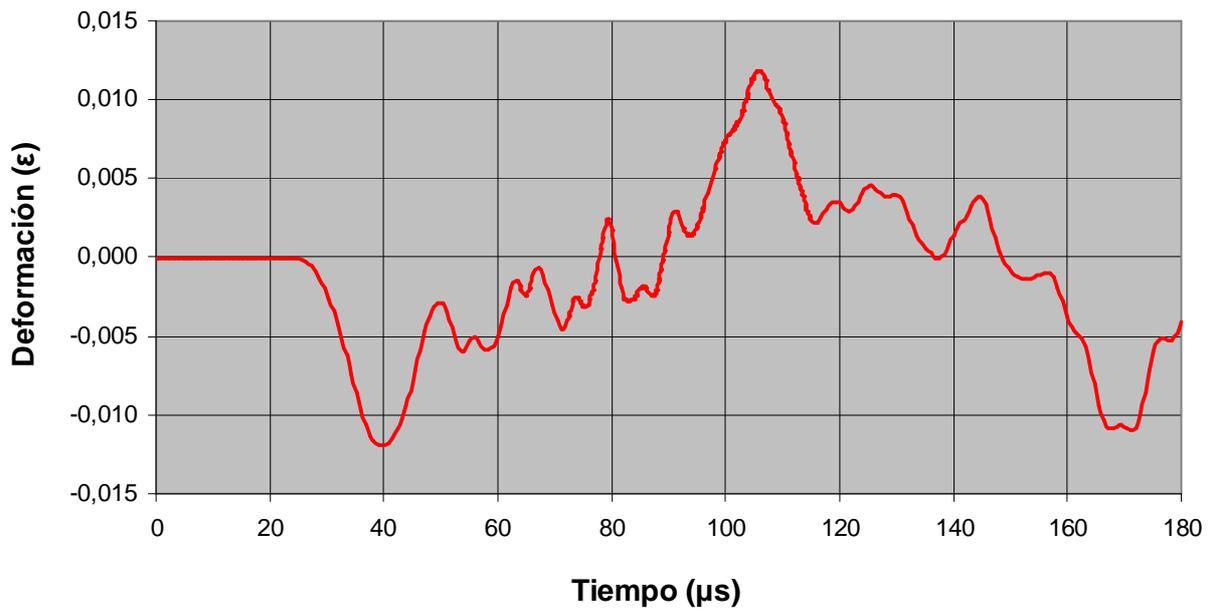


Figura 0.18 Deformación-Tiempo

Tanto la curva σ -t como la ϵ -t se puede comprobar como aún no se ha producido el cruce de ondas. No obstante, dicho cruce se producirá en un plano muy próximo a éste, concretamente en un plano a 51,8mm del plano de choque. Por lo que, con el fin de disponer de ciertas tolerancias a la hora posicionar las galgas extensométricas, se define este plano como plano límite para la para poder asegurar que los datos registrado por las galgas no están falseados.

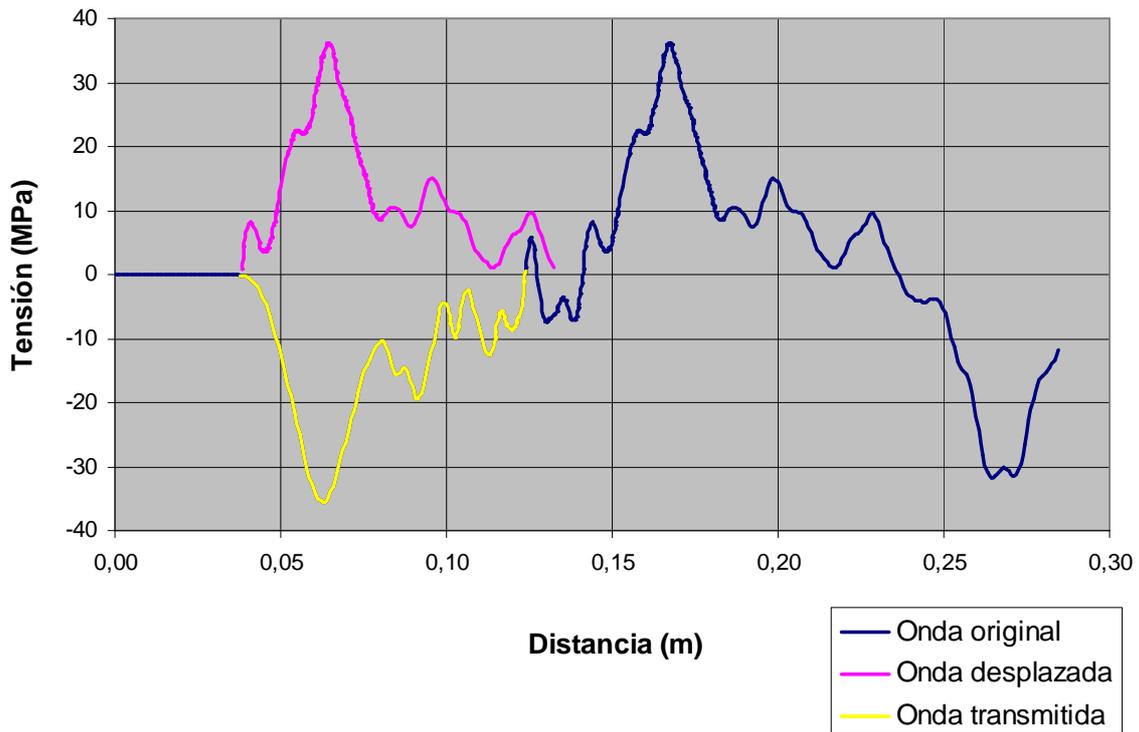


Figura 0.19 Tensión-Distancia

En la Figura 0.19, en la que se ha acoplado la onda reflejada a la transmitida para poder compararlas mejor, se observa como tienen prácticamente la misma longitud y una forma similar, pero como en los casos anteriores, para poder determinar si se pueden considerar iguales, se ha de determinar el área tiene cada una.

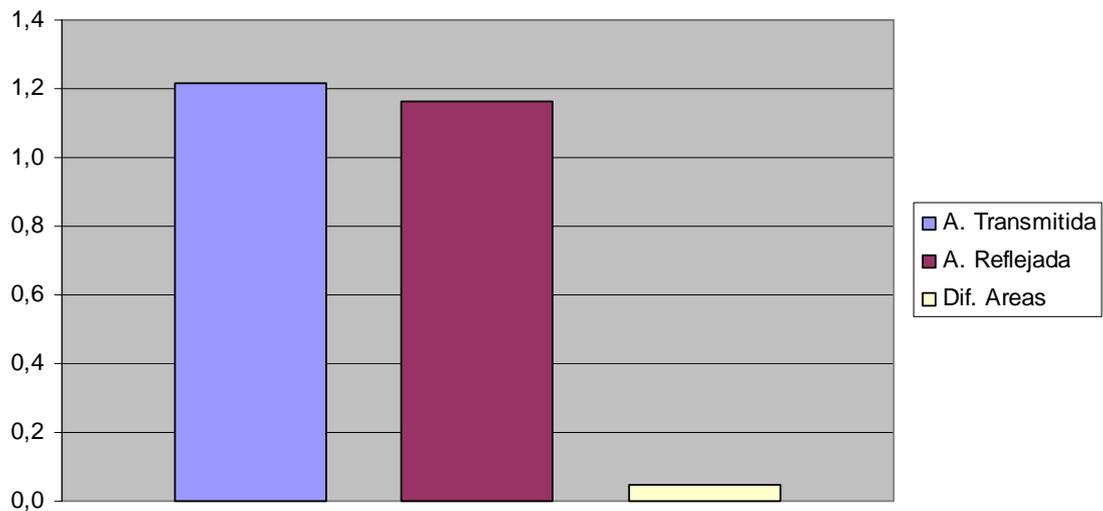


Figura 0.20 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
-1,21E+06	1,16E+06	4,93+04	4,06

A la vista de los resultados, las curvas pueden considerarse iguales ya que existe una diferencia de sólo un 4% entre ellas.

En teoría, esta diferencia de áreas se debería mantener hasta que se produjese el cruce de ondas, momento en el que la magnitud y longitud de las ondas se verían alteradas al anularse éstas entre sí. Por ello, todos los planos posteriores a éste y anteriores al plano límite son válidos para colocar las galgas extensométricas.

Aunque en este caso se ha decidido que éste plano es el límite, esta conjetura puede aplicarse a todos los planos comprendidos entre el plano en el que se cumpla que la diferencia de áreas es menor del 10% hasta el plano límite.

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

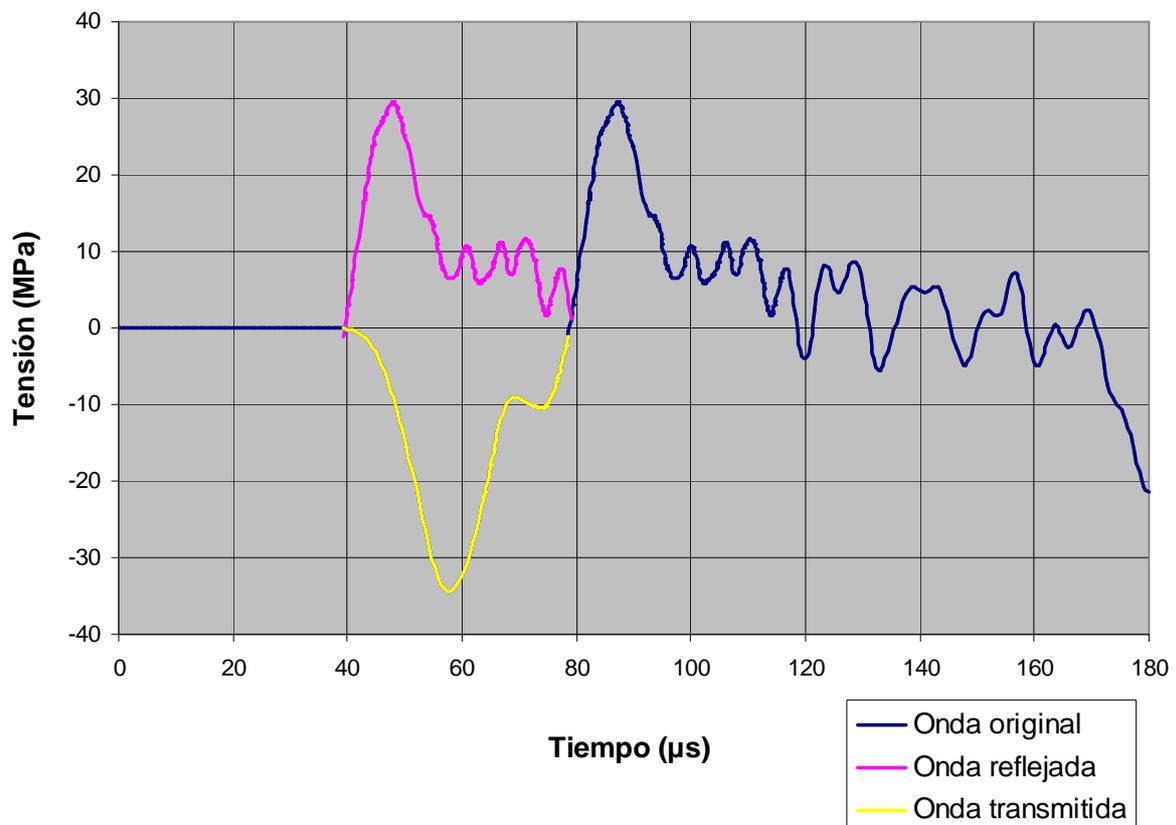


Figura 0.21 Tensión-Tiempo

La Figura 0.21 muestra como en este plano sí se produce el cruce de ondas corroborando lo expuesto en el apartado anterior. Como se puede observar, al producirse el cruce, las ondas se anulan entre sí provocando que su longitud y su magnitud se vean modificadas. En esta ocasión la onda registrada es de 32MPa de magnitud y de 39μs de longitud. Por ello, este plano no sería válido para la colocación de las galgas ya que la toma de datos resultaría falseada por este fenómeno.

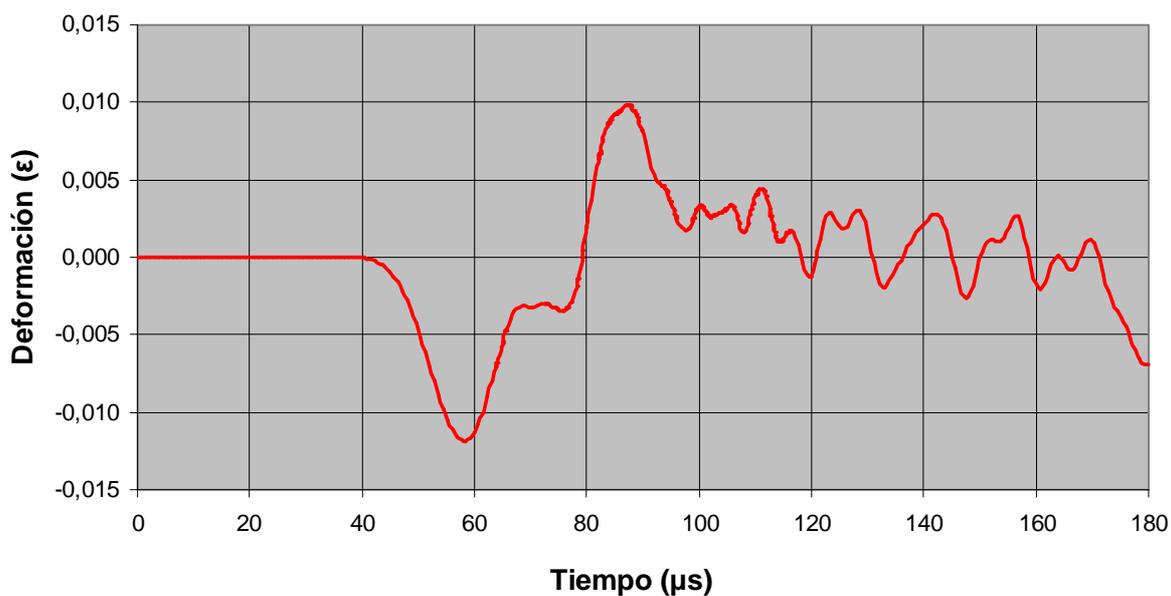


Figura 0.22 Deformación-Tiempo

En esta gráfica también se puede apreciar el cruce de ondas al verse reducida la magnitud y longitud de las ondas al anularse entre sí.

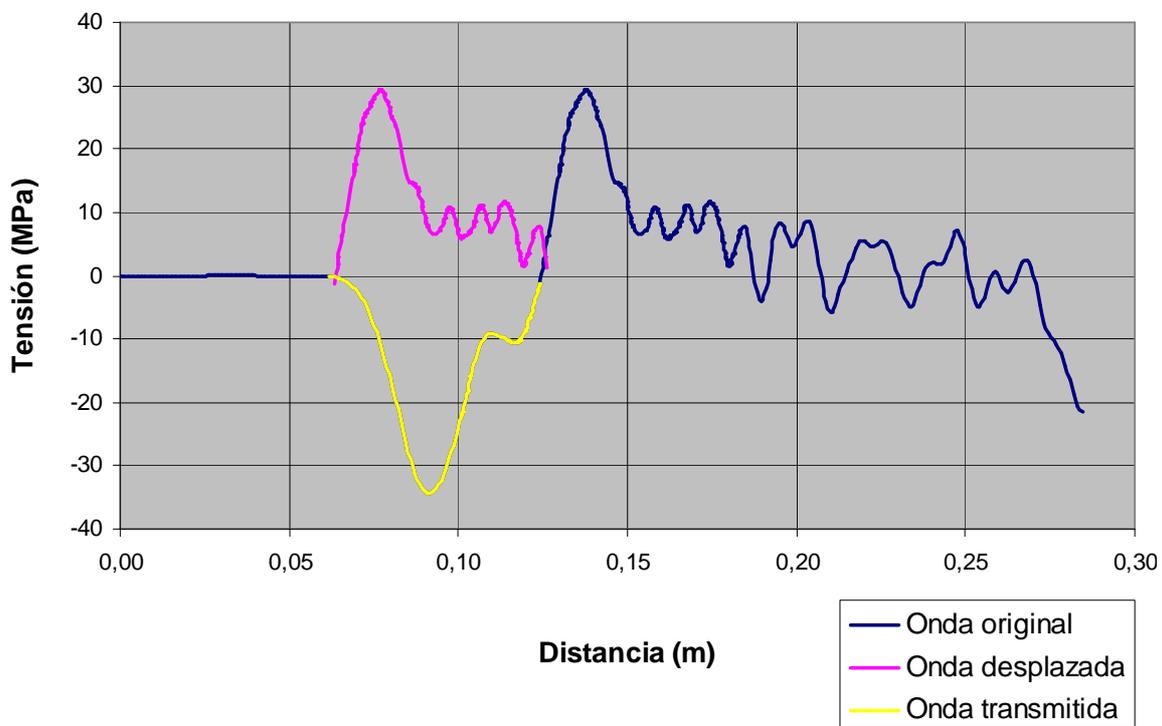


Figura 0.23 Tensión-Distancia

La Figura 0.23 muestra la onda de tracción a lo largo de la longitud de la probeta, como en los planos anteriores, se ha acoplado la onda transmitida a la

reflejada para poder compararlas mejor. En una primera impresión, al ser las ondas en magnitud, longitud y forma muy similares se podría afirmar que pueden considerarse iguales. Sin embargo, como en los casos anteriores, hay que recurrir al método de diferencia de áreas para poder confirmarlo.

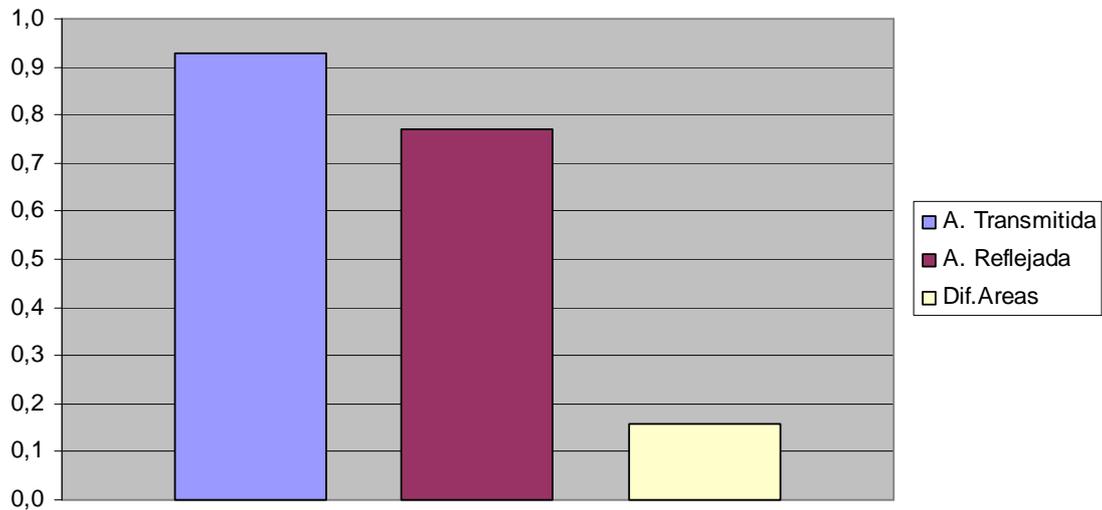


Figura 0.24 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
-9,29E+05	7,71E+05	1,58E+05	17

Aún cuando las ondas son tan parecidas, no se pueden considerar iguales ya que existe una diferencia de áreas mayor del 10% entre ellas. Este hecho corrobora lo expuesto en el plano anterior de que la diferencia de áreas se mantiene hasta que se produce el cruce de ondas.

1.1.4 Probeta 100x10x10 mm. Flyer Ø22x2mm

En este caso, la magnitud teórica de la onda obtenida debe ser la misma que en el caso anterior, pero la longitud debe ser de $0.78\mu\text{s}$ ya que se utiliza un flyer de menor espesor.

1. Plano de choque

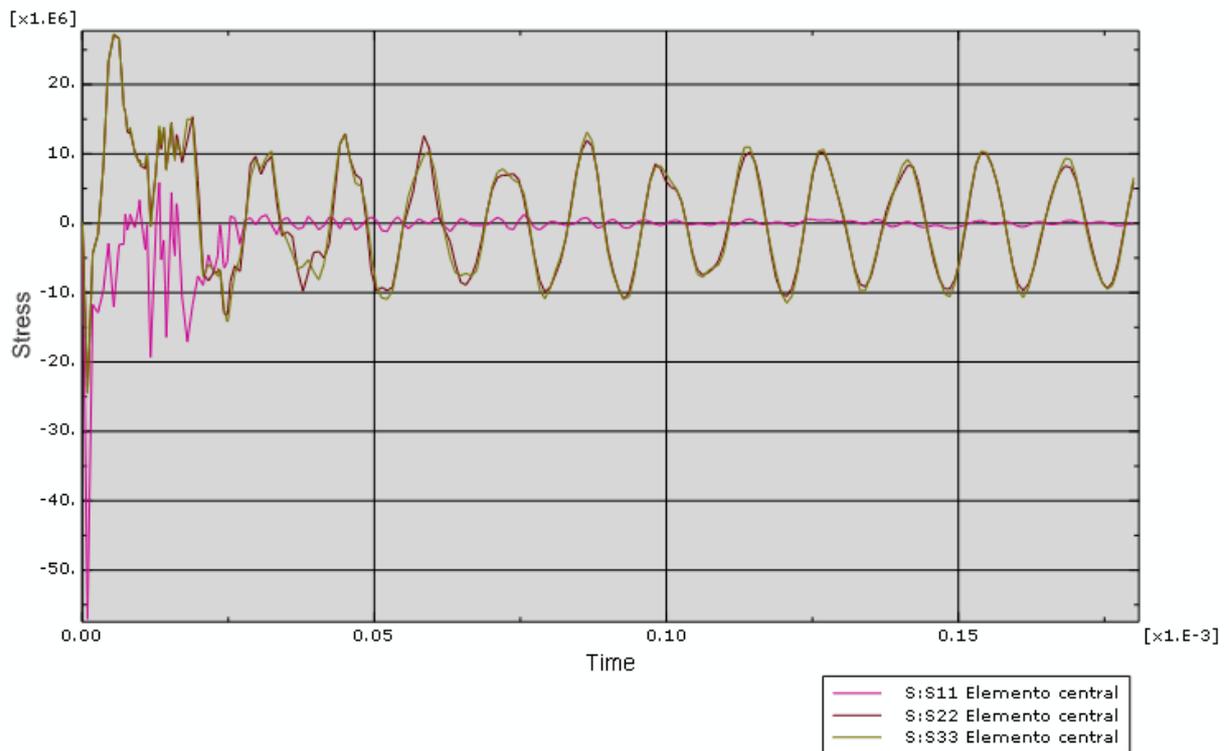


Figura 0.25 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Como se puede observar en la Figura 0.25, 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 de ondas 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. Al igual que sucede en ensayos anteriores, la sección del flyer es mayor que la de la probeta por lo que durante el impacto éste se deforma “envolviendo” a la probeta. Este efecto provoca la separación de la parte central del flyer de la probeta y, a su vez, la presión en las zonas externas aumenta (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esta deformación provoca un tipo de contacto que hace que cobren importancia las tensiones σ_{22} y σ_{33} . En casos anteriores, al ser el flyer de mayor espesor, su deformación era menor y este efecto no cobraba tanta importancia.

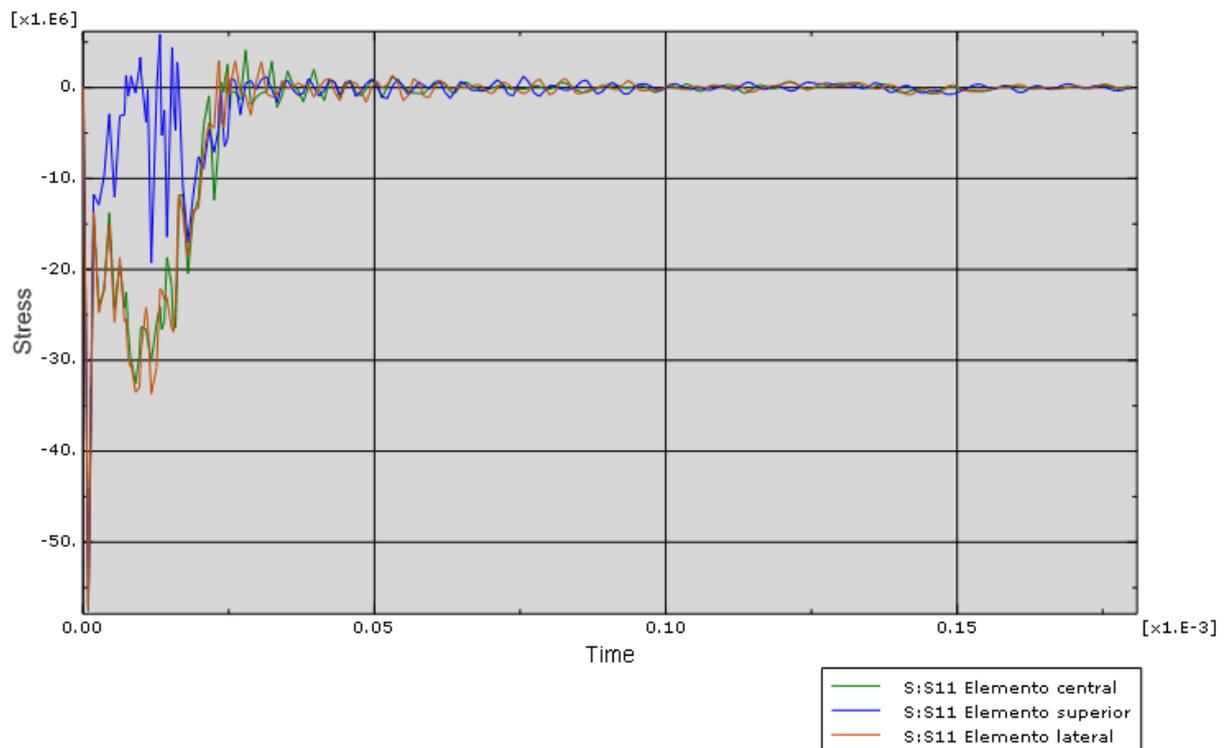


Figura 0.26 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

En la Figura 0.26 se observa 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. En este caso, tienen más importancia las tensiones σ_{22} y σ_{33} . Como se explica en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:** “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”.

1.1.5 Probeta 150x10x10 mm. Flyer Ø22x5mm

El pulso teórico en este caso es el mismo que en el caso 1.1.3, ya que únicamente varía la longitud de la probeta, y este parámetro no influye en el pulso transmitido. No obstante, se realiza este ensayo para estudiar en qué medida

influye la longitud de la probeta en la estabilización de la onda y poder así seleccionar una longitud adecuada para la realización de los ensayos.

1. Plano de choque

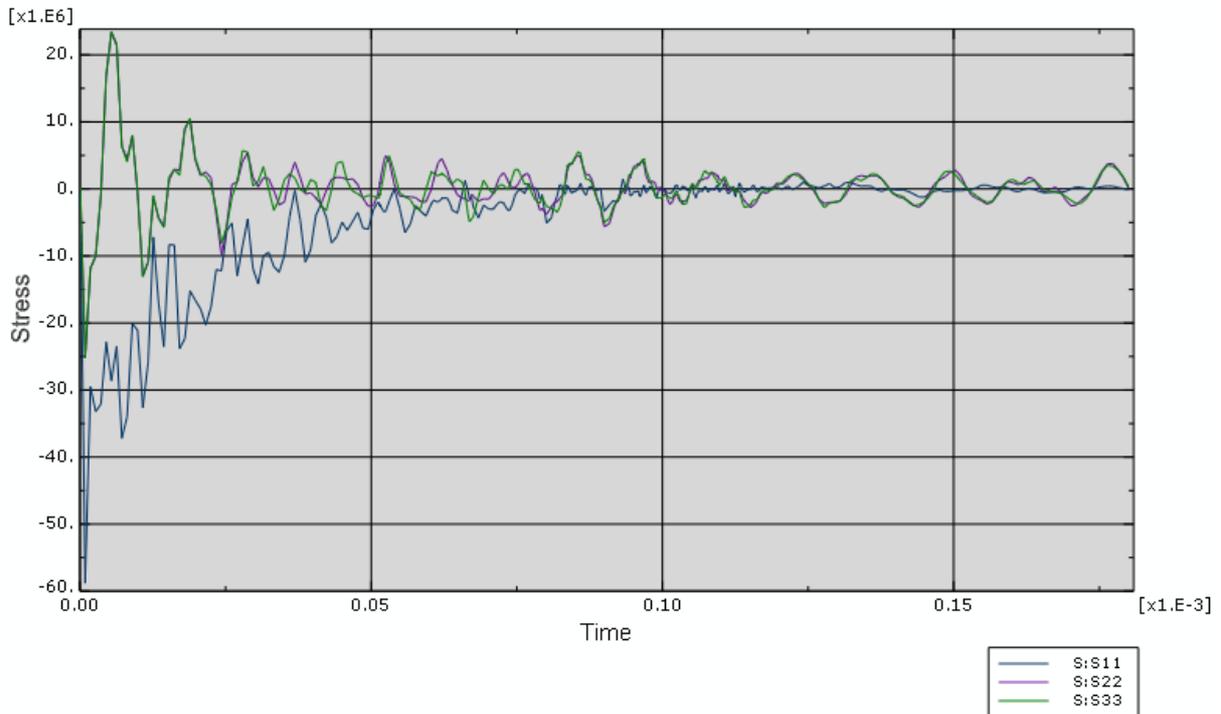


Figura 0.27 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Como se ha comentado y era de esperar, las tensiones producidas en el impacto son las mismas que en el caso 1.1.3. Se produce una tensión de compresión en la dirección longitudinal de la probeta (σ_{11}) y, por efecto Poisson, se producen tensiones de tracción en las direcciones perpendiculares al eje de la probeta (σ_{22} y σ_{33}). Al tratarse de una cara libre, las tensiones se disipan rápidamente quedando libre de tensiones.

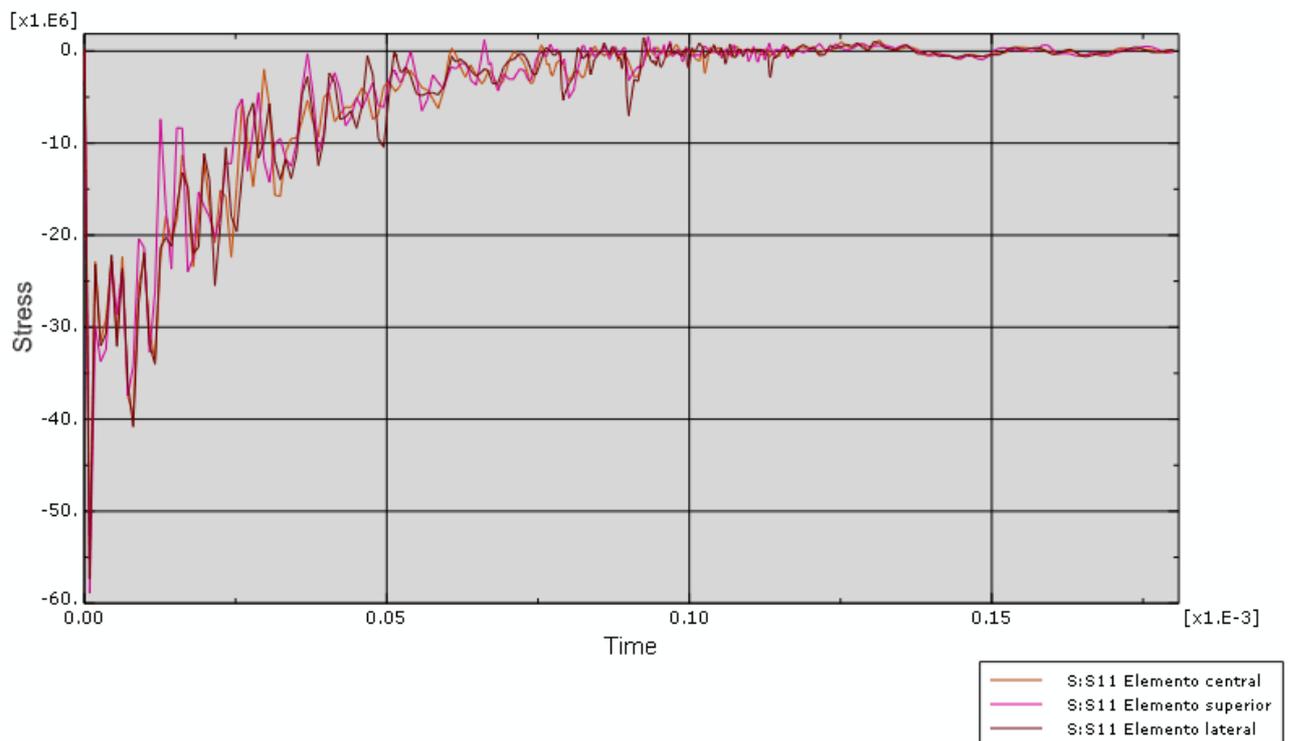


Figura 0.28 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

En la Figura 0.28 se observa que la tensión σ_{11} de los elementos central, superior y lateral es prácticamente la misma con lo que se puede afirmar que existe tensión plana.

Al igual que en la simulación 1.1.3, el valor medio de la tensión σ_{11} es de aproximadamente 32.5MPa, mientras que el teórico es de 36.5MPa. Esta pequeña desviación se debe a la contribución de las tensiones σ_{22} y σ_{33} así como de la deformación sufrida por el flyer explicada anteriormente.

Al cumplirse todos los requisitos descritos inicialmente de propagación unidimensional y tensión plana, se puede considerar a esta probeta apta para el ensayo.

2. Plano 25%

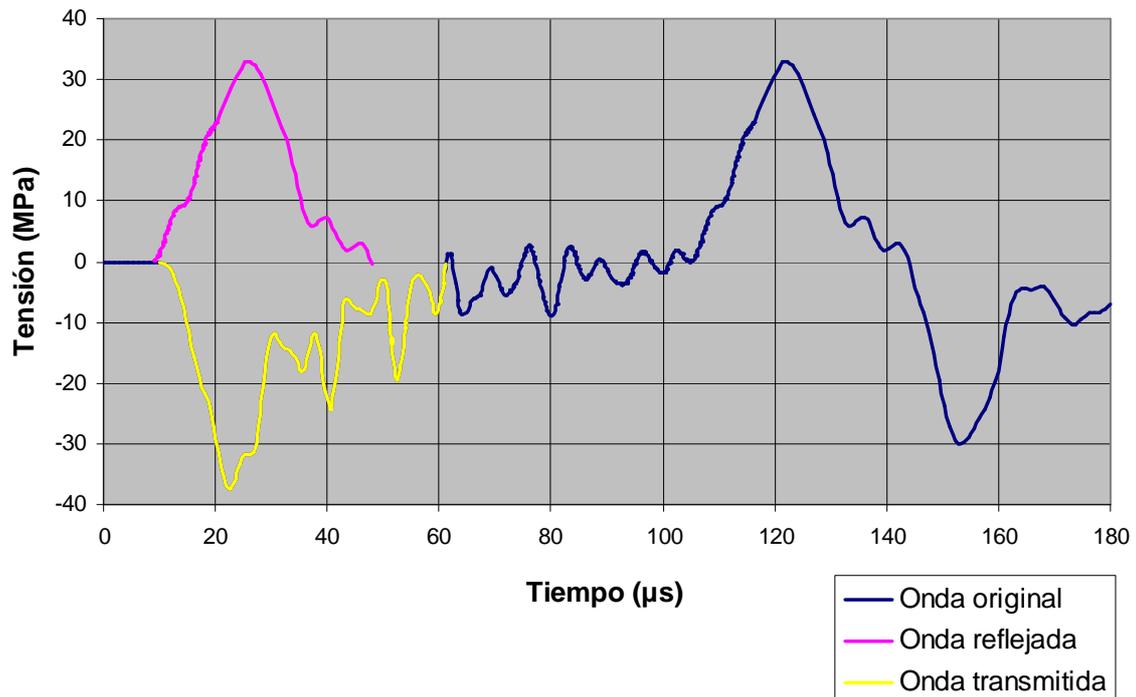


Figura 0.29 Tensión-Tiempo

La Figura 0.29 muestra como el valor máximo de la tensión coincide con el teórico de 36,5MPa. Sin embargo, no se debe tener en cuenta la tensión máxima y sí la media, en este caso la media es de aproximadamente 33MPa.

Como esta probeta es más larga, el 25% de la longitud corresponde a un plano más alejado del plano de choque, con lo que se espera que el frente de ondas sea más estable que el del plano del 25% de la probeta de 100x10x10mm. Efectivamente, mientras en el caso mencionado la longitud de onda es de aproximadamente 55µs, en éste, es de 50µs, lo que significa que la onda va adquiriendo la longitud que tendrá cuando esté totalmente estabilizada.

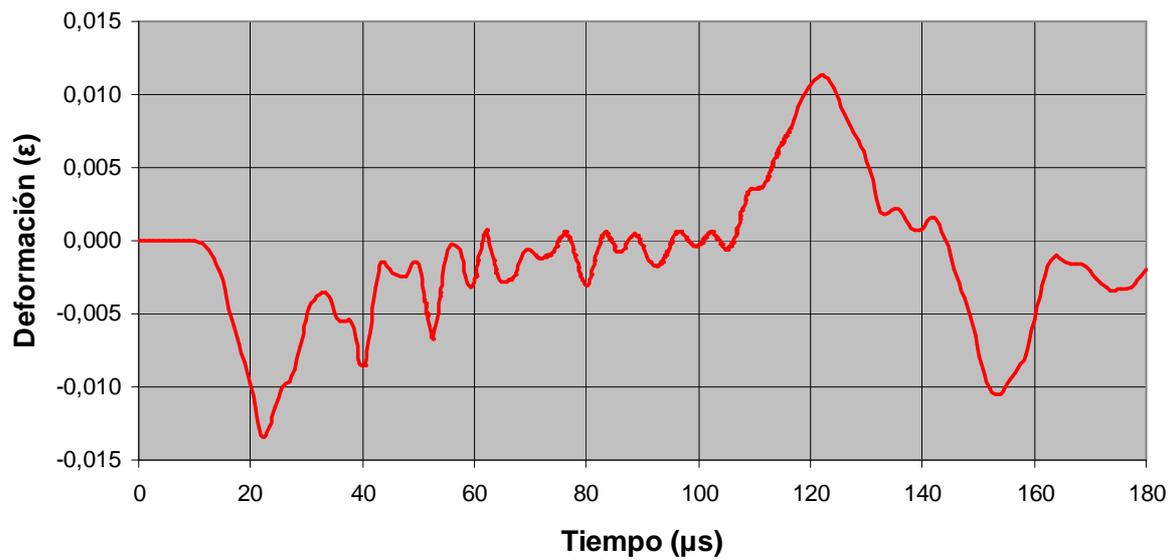


Figura 0.30 Deformación-Tiempo

Tanto en la Figura 0.30 como en la anterior se puede comprobar que aún no se ha producido el cruce de ondas. Además, si se comparan estas gráficas con sus homónimas de la probeta 100x10x10mm se puede comprobar cómo la onda transmitida y reflejada están más alejadas entre sí debido a la mayor longitud de la probeta.

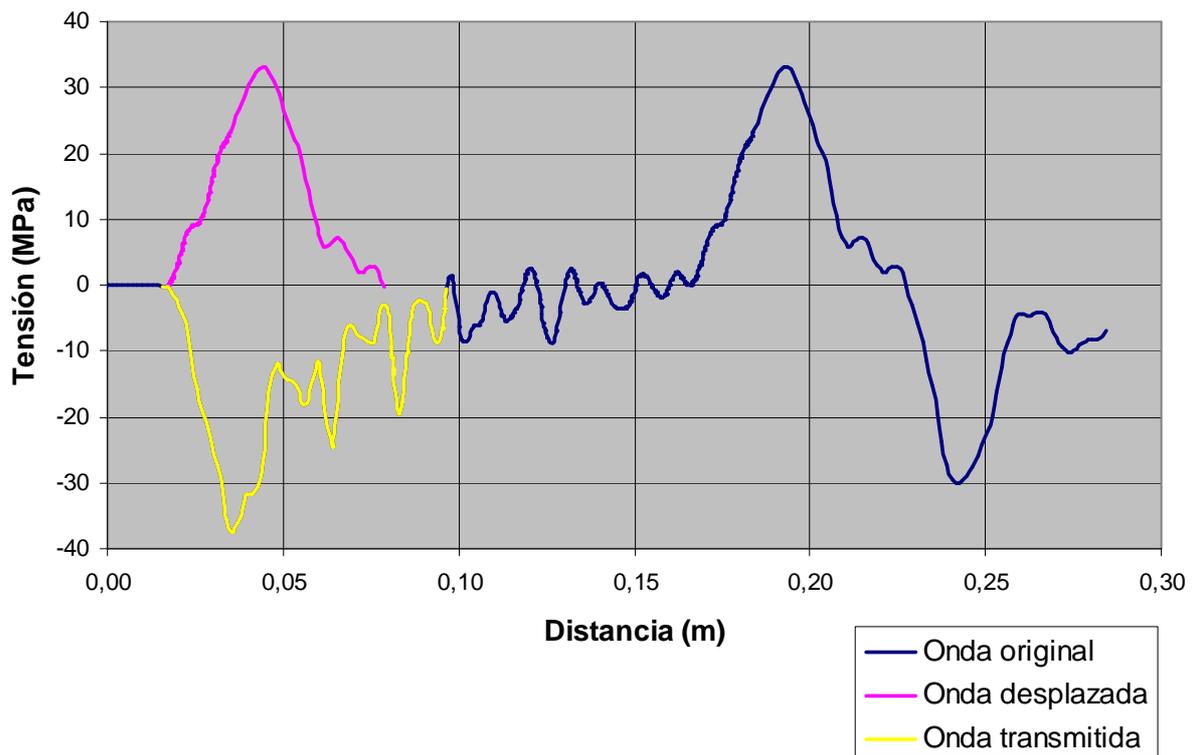


Figura 0.31 Tensión-Distancia

En la Figura 0.31 se han acoplado las ondas transmitida y reflejada en el mismo instante temporal para poder compararlas mejor. Aunque visualmente se aprecia la diferencia existente entre las ondas tanto en forma como en longitud, es necesario recurrir al cálculo de de áreas para saber si pueden considerarse ondas iguales.

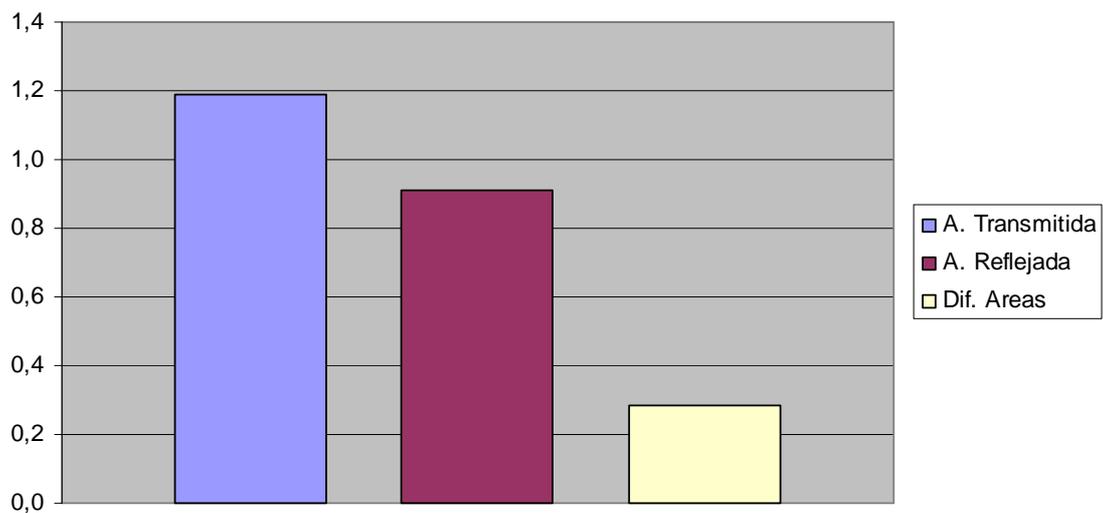


Figura 0.32 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
-1,19 E+06	9,09 E+05	2,81E+05	23,6

Aunque se podía observa claramente la diferencia en las gráficas, el cálculo de diferencia de áreas permite afirmar que las ondas no se pueden considerar iguales al ser su diferencia mayor del 10%.

3. Plano medio

En este caso, el plano prácticamente coincide con el plano límite, por lo que se asumirá que el plano medio es el límite y así tener cierta tolerancia de posición.

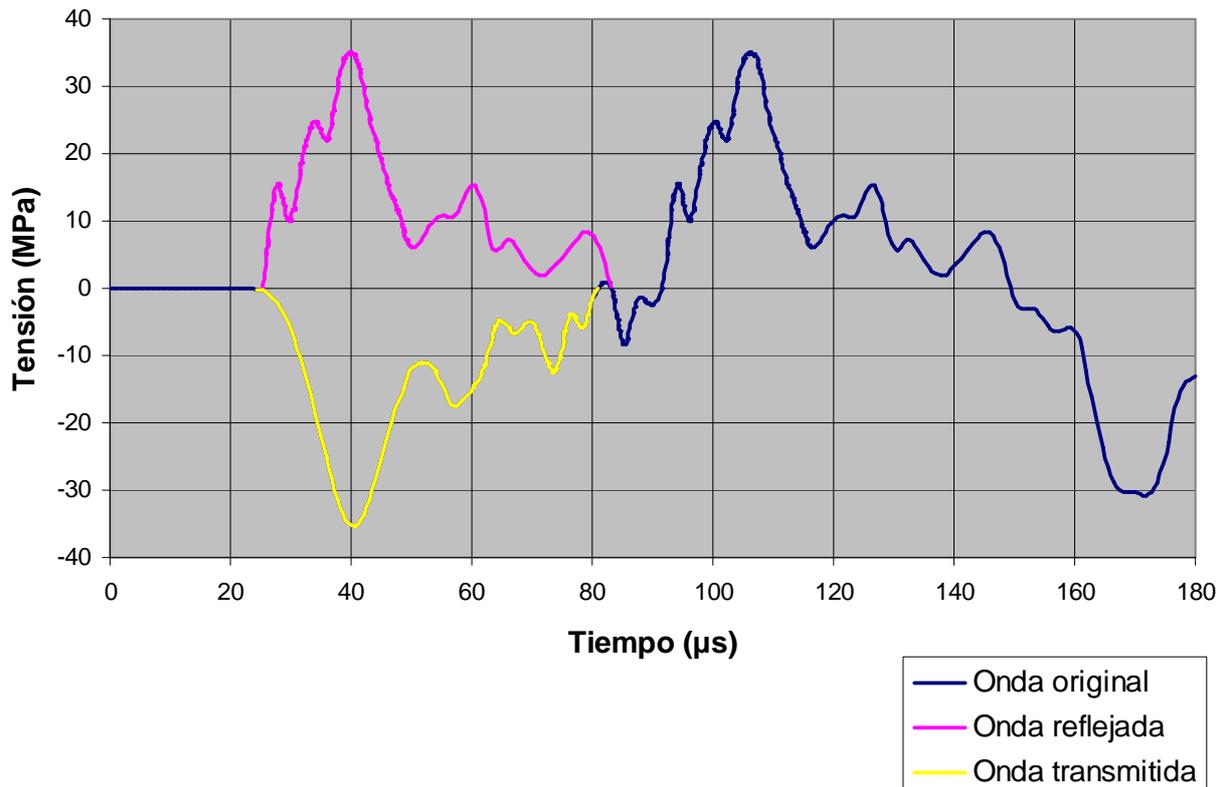


Figura 0.33 Tensión-Tiempo

La Figura 0.33 muestra un pulso con una magnitud de 33MPa y una longitud de 50µs. Aunque la longitud del pulso no ha variado con respecto a la del plano anterior (continúan siendo de 50µs), se observa una onda más estable.

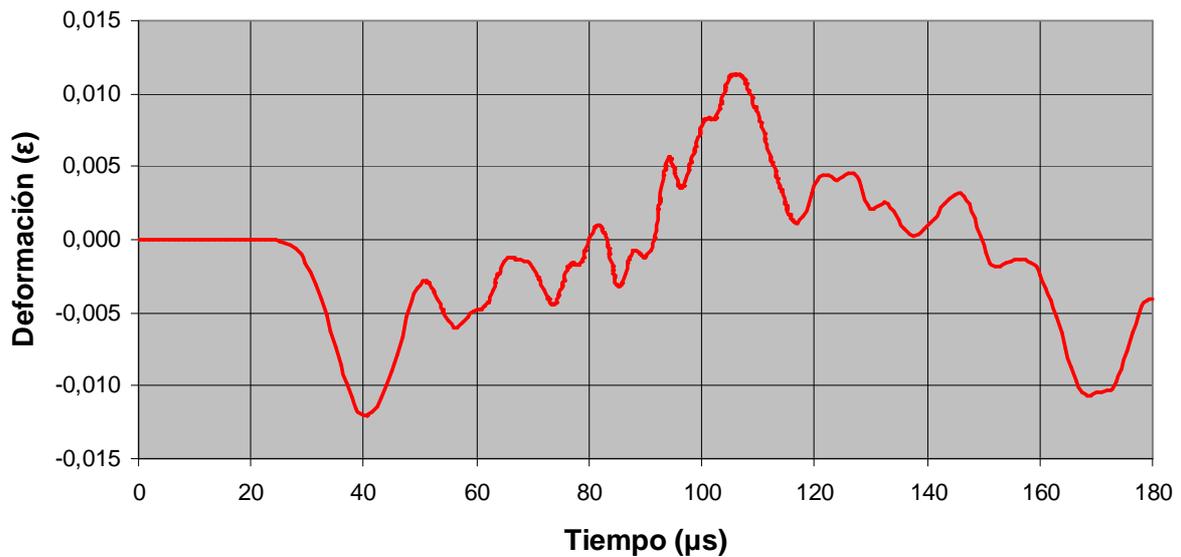


Figura 0.34 Deformación-Tiempo

En la Figura 0.34 se puede comprobar como está a punto de producirse el cruce de ondas. El hecho de que la onda obtenida en el ensayo sea diferente en cuanto a longitud y forma de la onda teórica es porque entran en juego las tensiones en las direcciones perpendiculares al eje de la probeta, además de otro tipo de parámetros como defectos internos del material, desalineamiento y caras no paralelas en el impacto...

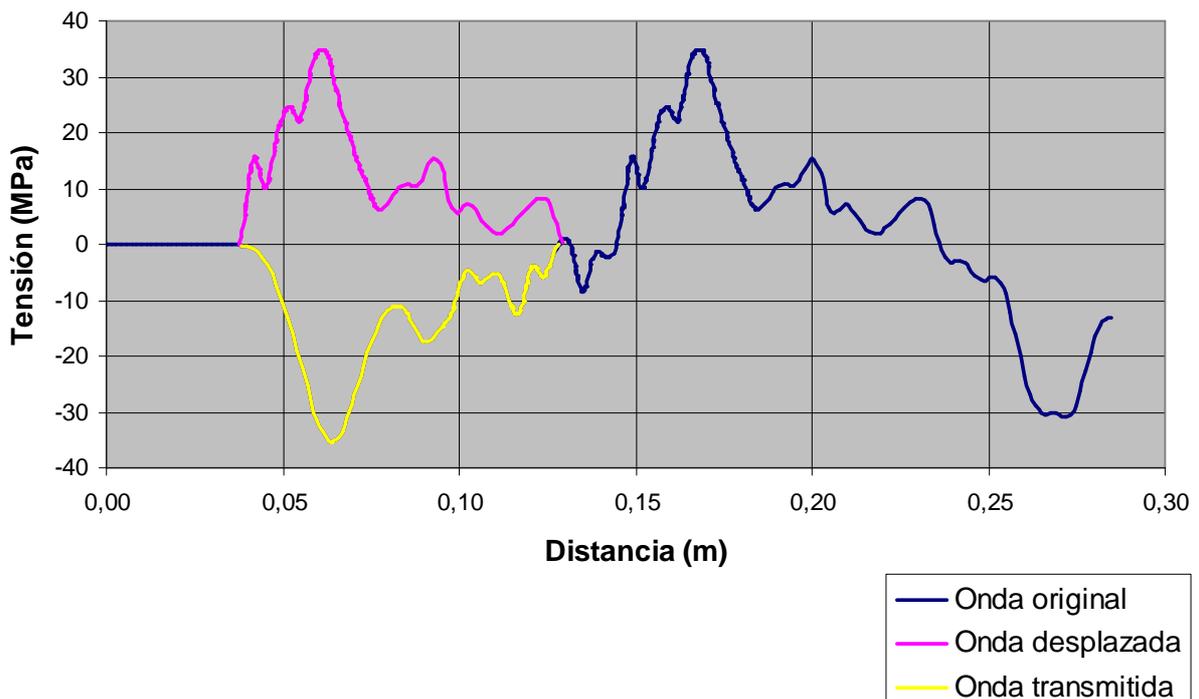


Figura 0.35 Tensión-Distancia

En la Figura 0.35 se han acoplado las ondas transmitida y reflejada para compararlas mejor. Se aprecia una similitud considerable entre la onda transmitida y la reflejada, pero es necesario recurrir al cálculo de áreas para saber si se pueden considerar iguales.

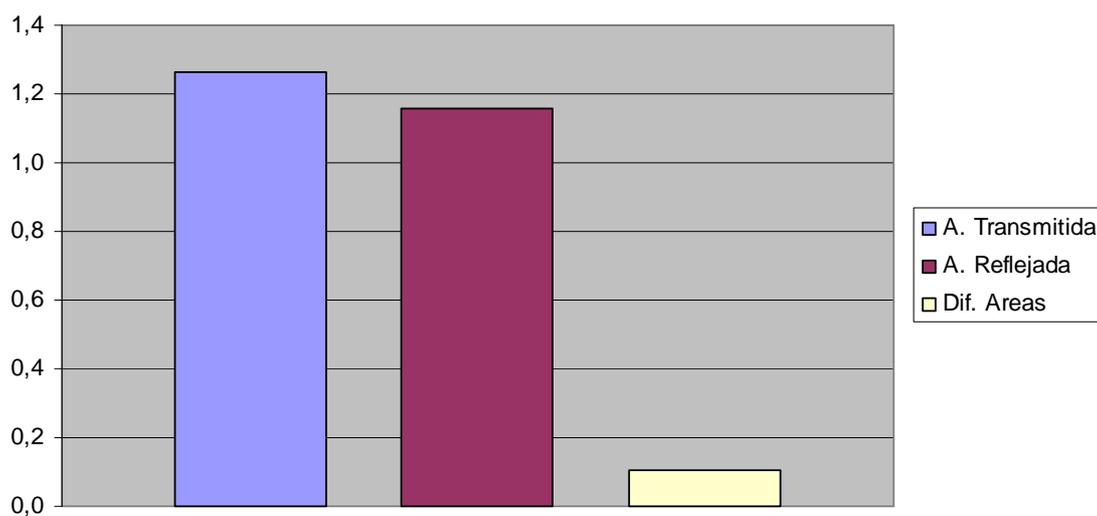


Figura 0.36 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
-1,26 E+06	1,15 E+06	1,024 E+05	8,25

Como se intuía al observar las gráficas, el cálculo de diferencia de áreas corrobora que las ondas pueden considerarse iguales al ser su diferencia menor del 10%.

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

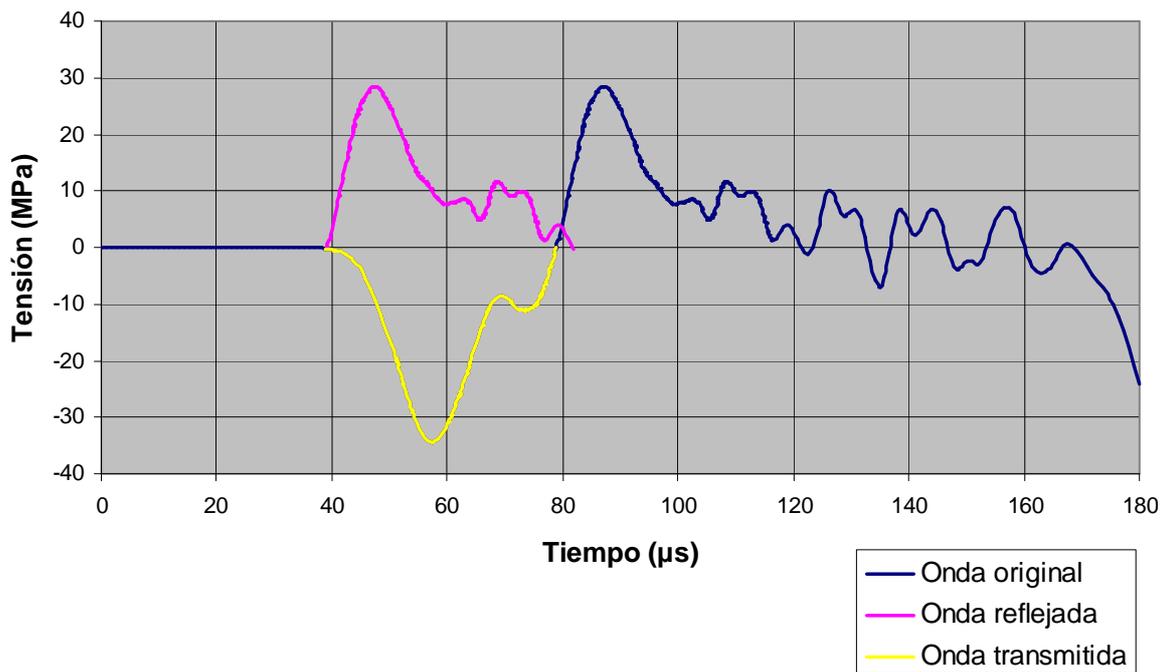


Figura 0.37 Tensión-Tiempo

Si el plano anterior era el plano límite, en este plano se debería haber producido el cruce de ondas, y así lo muestra la Figura 0.37, donde se observa una reducción de la longitud de onda de $10\mu\text{s}$ aproximadamente.

Además, puede observarse como la magnitud de la onda reflejada se ha visto disminuida debido a que la parte de la onda transmitida con la que se ha cruzado la anula restándole valor. La máxima magnitud de la onda transmitida permanece igual debido a que la onda reflejada aún no ha llegado hasta esa zona.

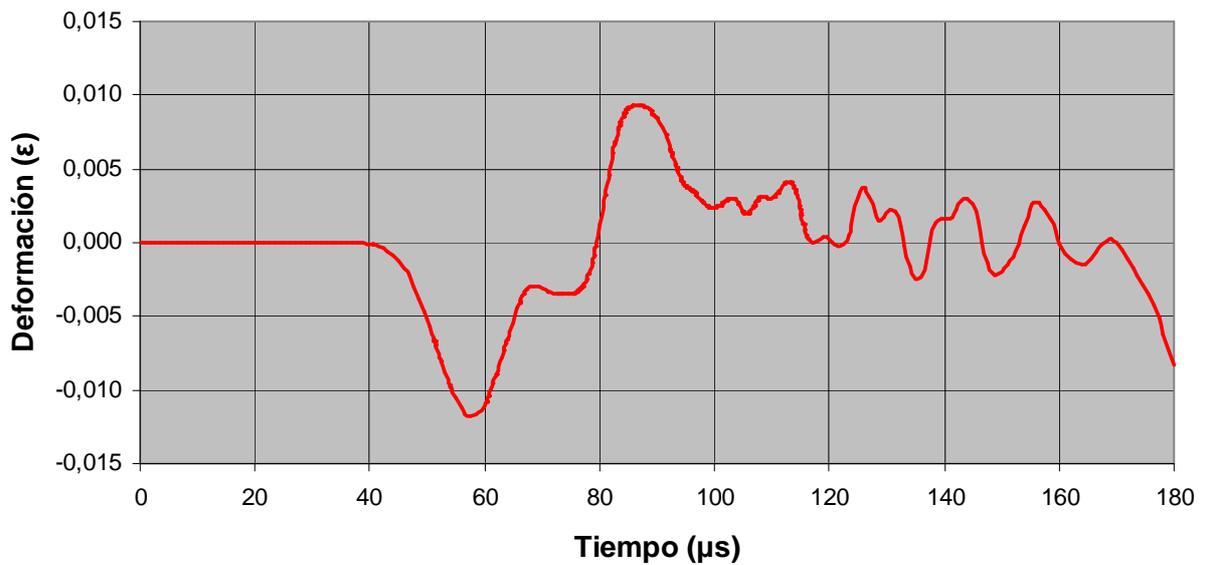


Figura 0.38 Deformación-Tiempo

También puede apreciarse el cruce de ondas y la consiguiente disminución de la longitud y magnitud en la Figura 0.38.

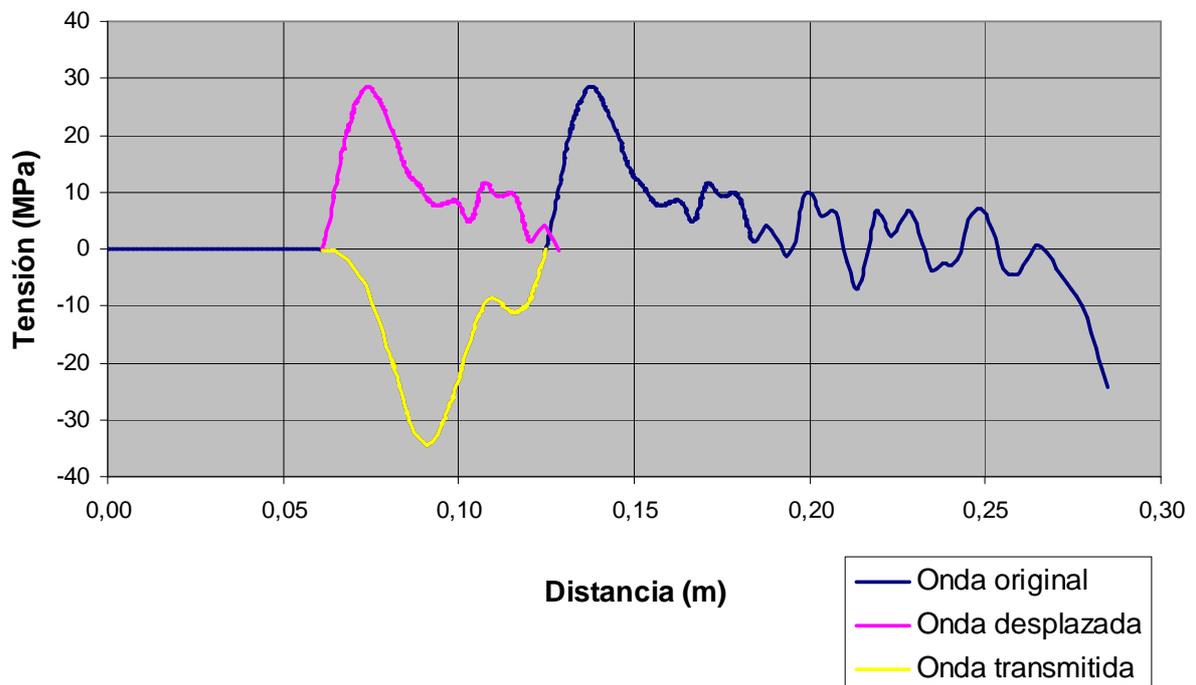


Figura 0.39 Tensión-Distancia

Visualmente la onda transmitida y reflejada son muy similares en cuanto a longitud y forma, pero se debe acudir a los resultados numéricos para evaluar si pueden considerarse iguales.

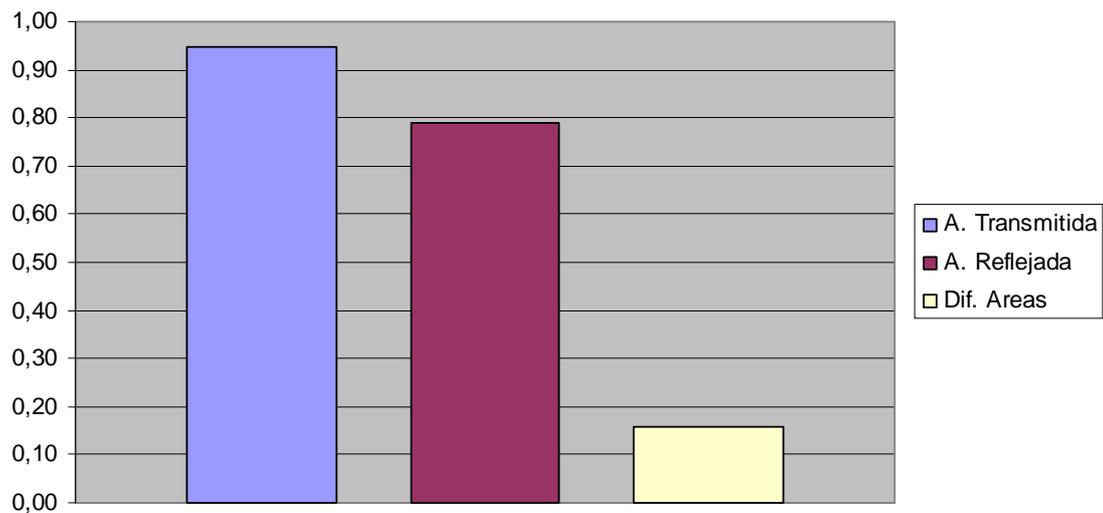


Figura 0.40 Diferencia de áreas

Los resultados numéricos obtenidos son:

Área Transmitida	Área Reflejada	Diferencia de Áreas	% Diferencia de Áreas
-9,74 E+05	7,89 E+05	1,57 E+05	16,6

A la vista de los resultados, se considera que las ondas no son iguales al ser su diferencia mayor del 10%. No obstante, aunque la diferencia hubiera sido menor del 10% este plano no sería válido para la colocación de las galgas extensométricas ya que, al haberse producido el cruce de ondas, la magnitud registrada sería menor de la real y los resultados obtenidos estarían falseados.

1.2 Probetas de sección cilíndrica

Con este tipo de probeta se busca comprobar las posibles ventajas e inconvenientes de utilizar probetas de sección circular frente a la cuadrada. Las dimensiones utilizadas en el estudio de probetas cilíndricas (100xØ10mm) son resultado inmediato de las conclusiones obtenidas tras el estudio de las probetas de sección cuadrada.

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:

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

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

1.2.1 Probeta 100xØ10 mm. Flyer Ø22x5mm

1. Plano de choque

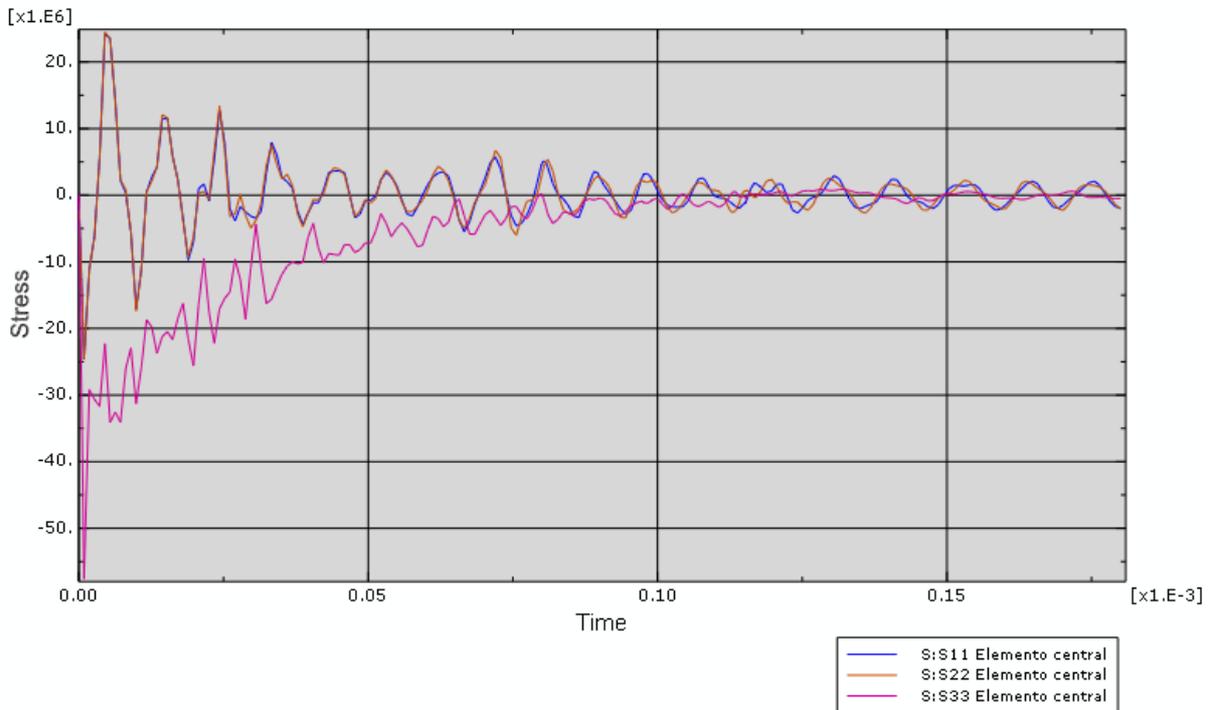


Figura 0.41 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Como se puede observar en la Figura 0.41, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante y disminuyen progresivamente quedando la cara libre de tensiones. Por ello, se puede afirmar que existe propagación unidimensional.

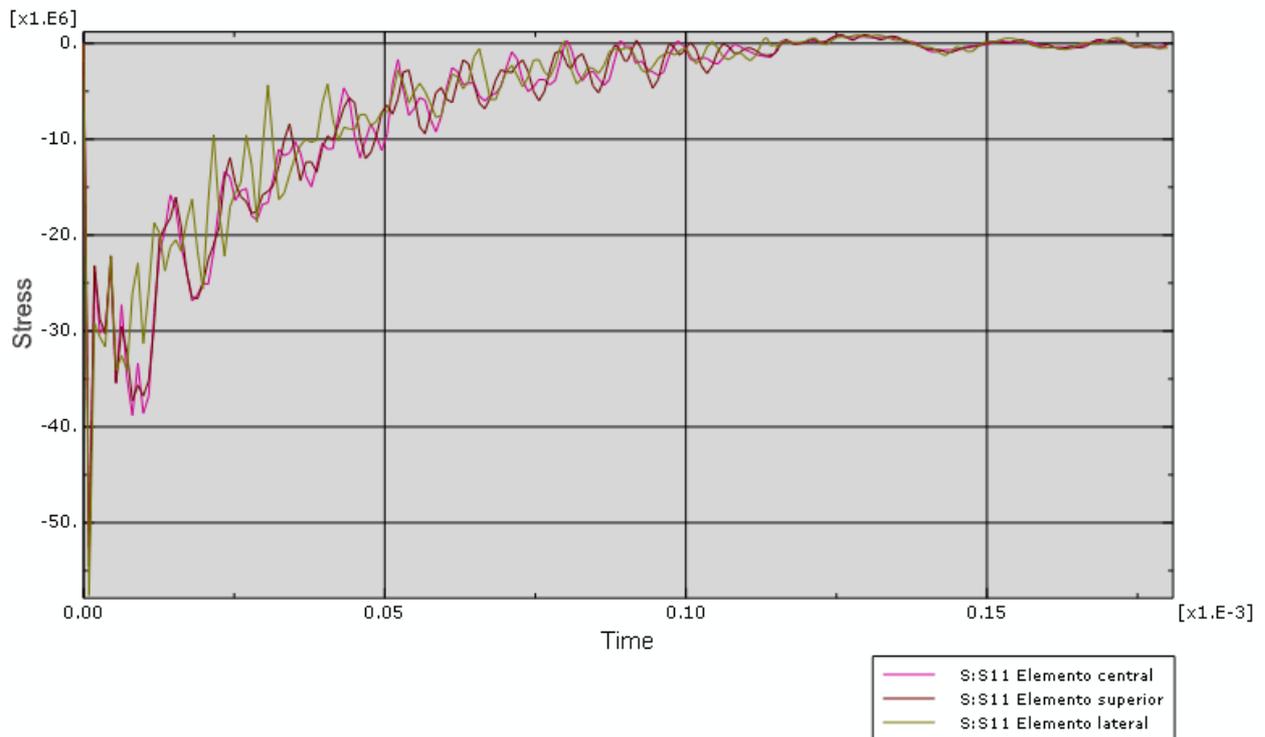


Figura 0.42 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

El valor medio de la tensión obtenido en este plano es de aproximadamente 35MPa, mientras que el teórico es de 36,8MPa. Además, se observa como en la tensión de los elementos superior y lateral existe un pequeño pico de tensión mayor que no se produce en el elemento central. Estos datos, permiten deducir que se produce una pequeña deformación del flyer durante el impacto que hace que no se produzca el contacto total en la parte central entre probeta y flyer (como ocurría en los casos anteriores de probetas de sección cuadrada), produciendo una disminución de la tensión en esta zona y aumentándola en las zonas exteriores.

No obstante, la disminución de la tensión producida en el elemento central con respecto a los elementos superior y lateral es muy pequeña, con lo que se puede considerar que existe tensión plana.

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

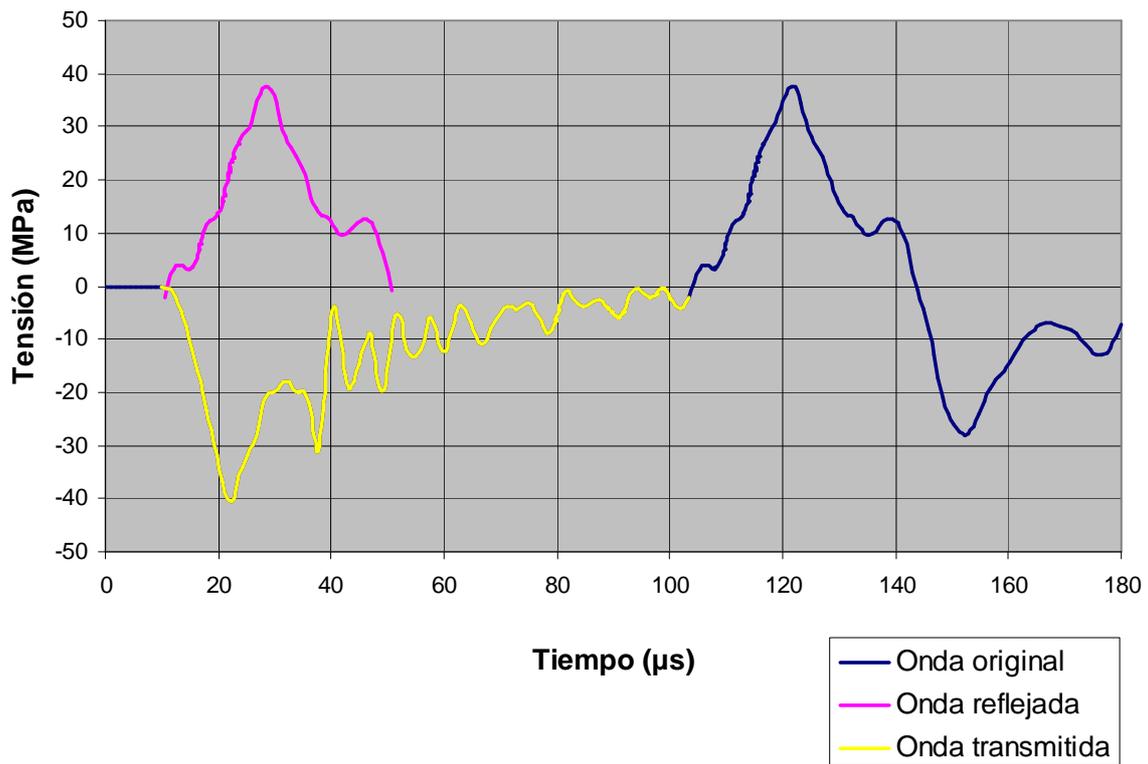


Figura 0.43 Tensión-Tiempo

La Figura 0.43 muestra como el valor máximo de la tensión de la onda reflejada es 37,9MPa pero, como se ha mencionado anteriormente, el valor que hay que tener en cuenta es el medio, que en este caso, coincide exactamente con el teórico (36,8MPa). Con lo que se obtiene una mejora de los resultados con este tipo de probetas con respecto a las de sección cuadrada.

En cuanto a la longitud de onda, al igual que ocurre en las simulaciones de probetas de sección cuadrada, en este plano la onda aún no está estabilizada, con lo que no se puede evaluar la mejora o empeoramiento de los resultados obtenidos.

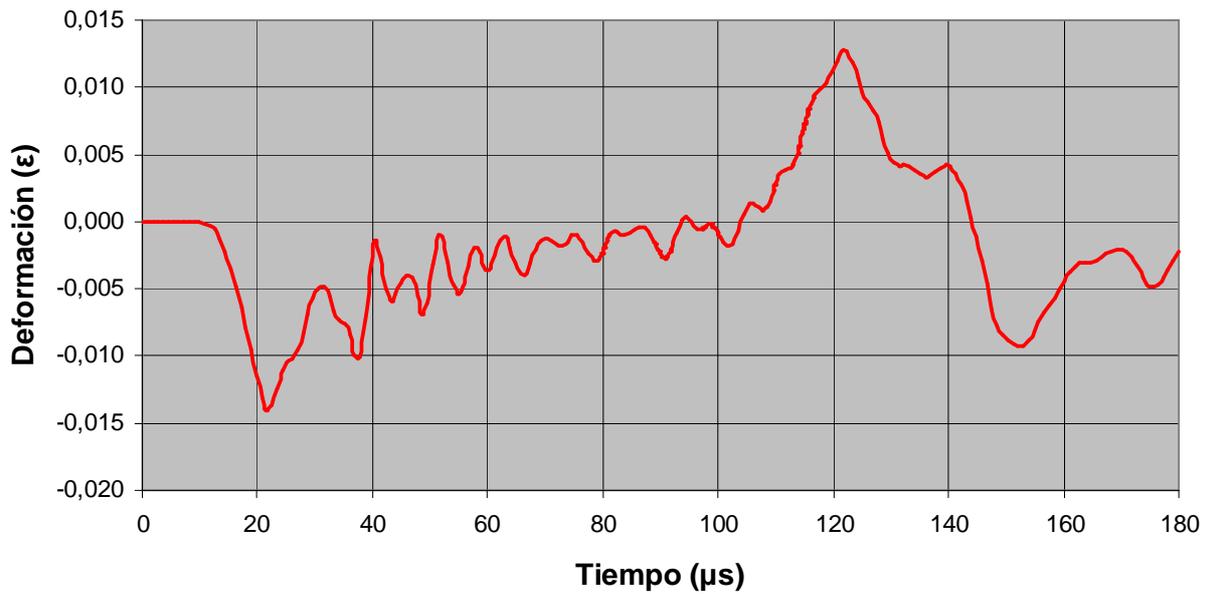


Figura 0.44 Deformación-Tiempo

En esta figura puede apreciarse también como los resultados obtenidos con este tipo de probetas se aproximan más a los teóricos, ya que el valor medio de la deformación es de 0.012ϵ y el teórico es 0.0122ϵ , mientras que en el ensayo análogo con probeta de sección cuadrada es de 0.0109ϵ .

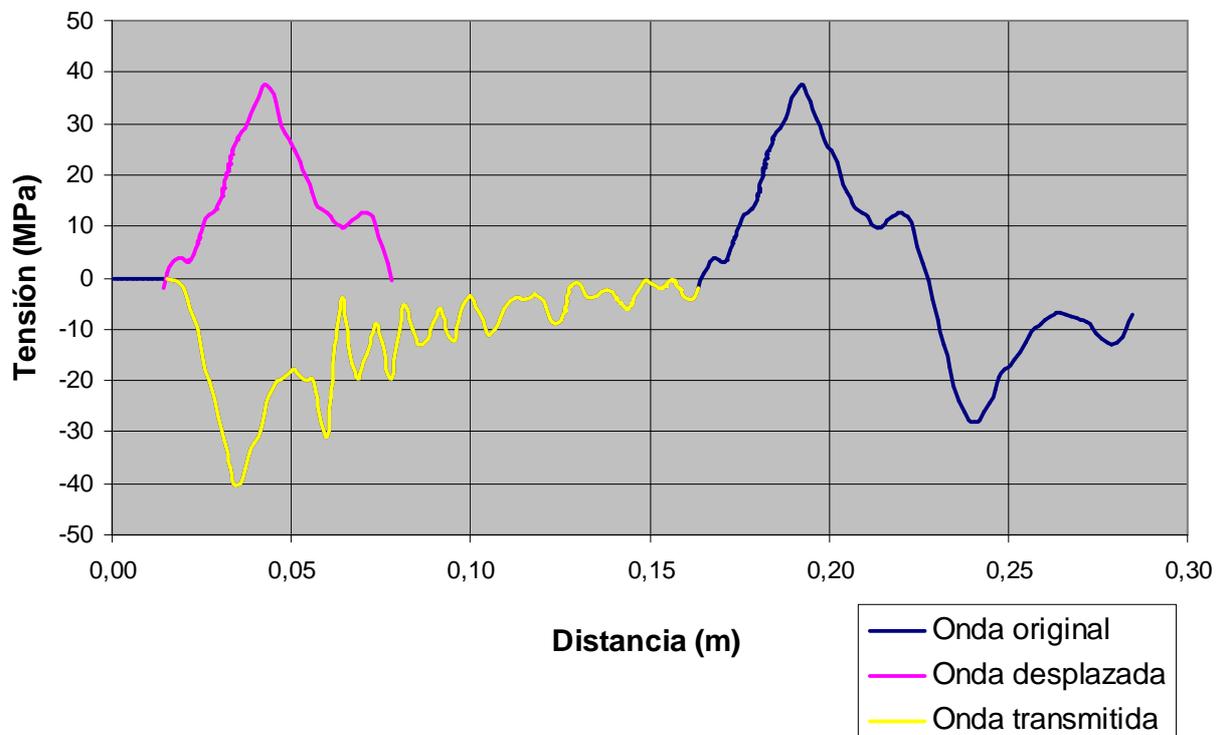


Figura 0.45 Tensión-Distancia

En la Figura 0.45, se compara la tensión producida en la probeta en función de la distancia al plano de choque. Además, se ha acoplado la onda reflejada con la transmitida para poder comprarlas mejor visualmente; se observa una gran diferencia en cuanto a la longitud de la onda reflejada y transmitida debido a la inestabilidad ya mencionada.

Para poder determinar si la onda transmitida y reflejada se pueden considerar iguales, se ha de recurrir al cálculo de áreas bajo cada curva.

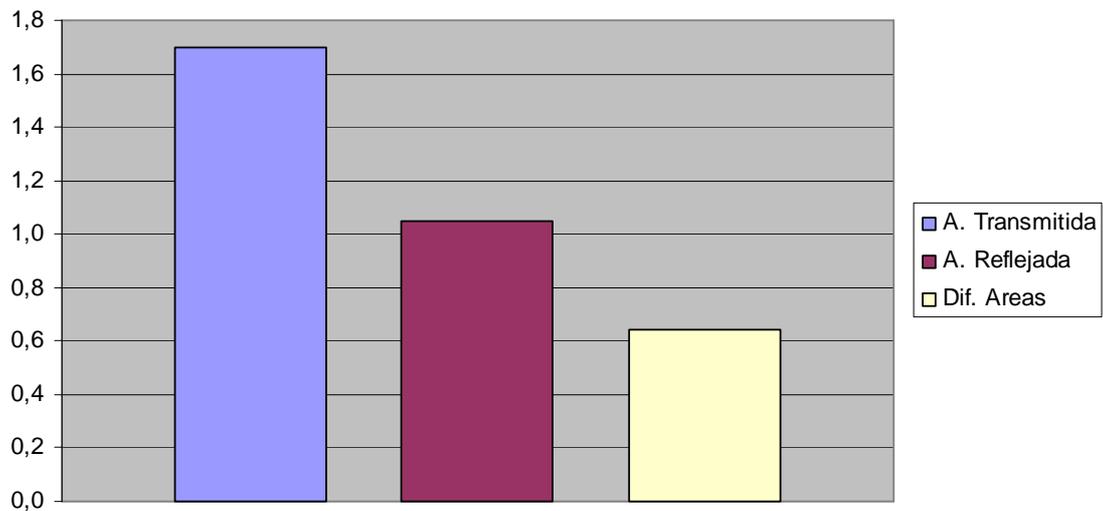


Figura 0.46 Diferencia de áreas

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

A la vista de los resultados, 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)

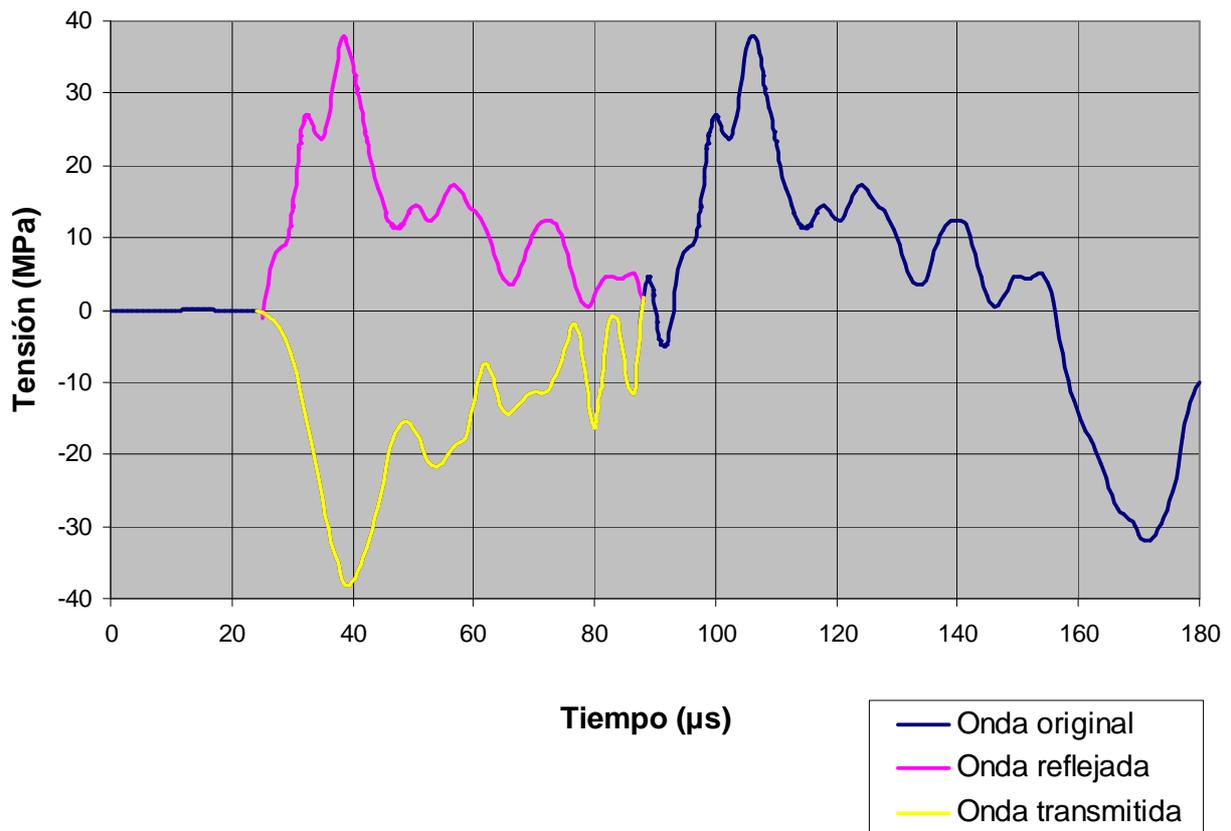


Figura 0.47 Tensión-Tiempo

La Figura 0.47 muestra una onda mucho más estable que la del plano anterior, manteniendo la misma magnitud de tensión. Sin embargo, la longitud del pulso (55μs aproximadamente) sigue siendo mucho mayor que la teórica.

Al igual que ocurre en el caso de homónimo de probetas de sección cuadrada, a este plano, aunque no lo sea, se le considerará plano límite ya que está muy próximo a él y así se obtiene una tolerancia de posición a la hora de colocar las galgas extensométricas. Este hecho era de esperar ya que los parámetros que gobiernan la transmisión de ondas (materiales, velocidad de impacto y longitudes, tanto de probeta como de flyer) son los mismos.

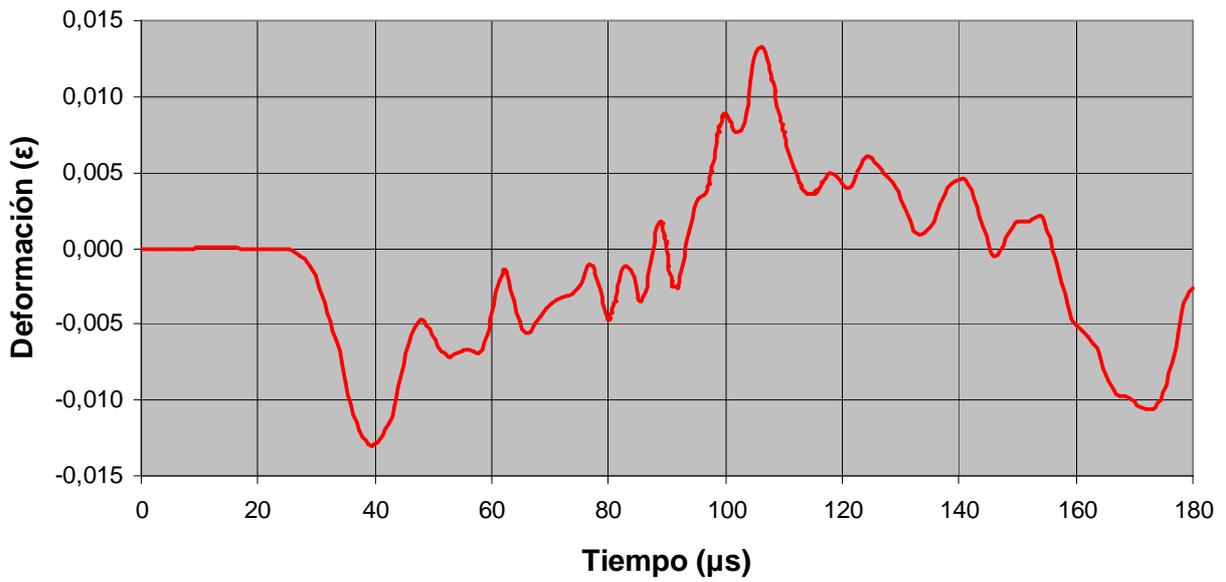


Figura 0.48 Deformación-Tiempo

También puede comprobarse en la gráfica de la deformación como el cruce de ondas está a punto de producirse. Del mismo modo que la tensión, los valores se mantienen constantes con respecto al plano anterior.

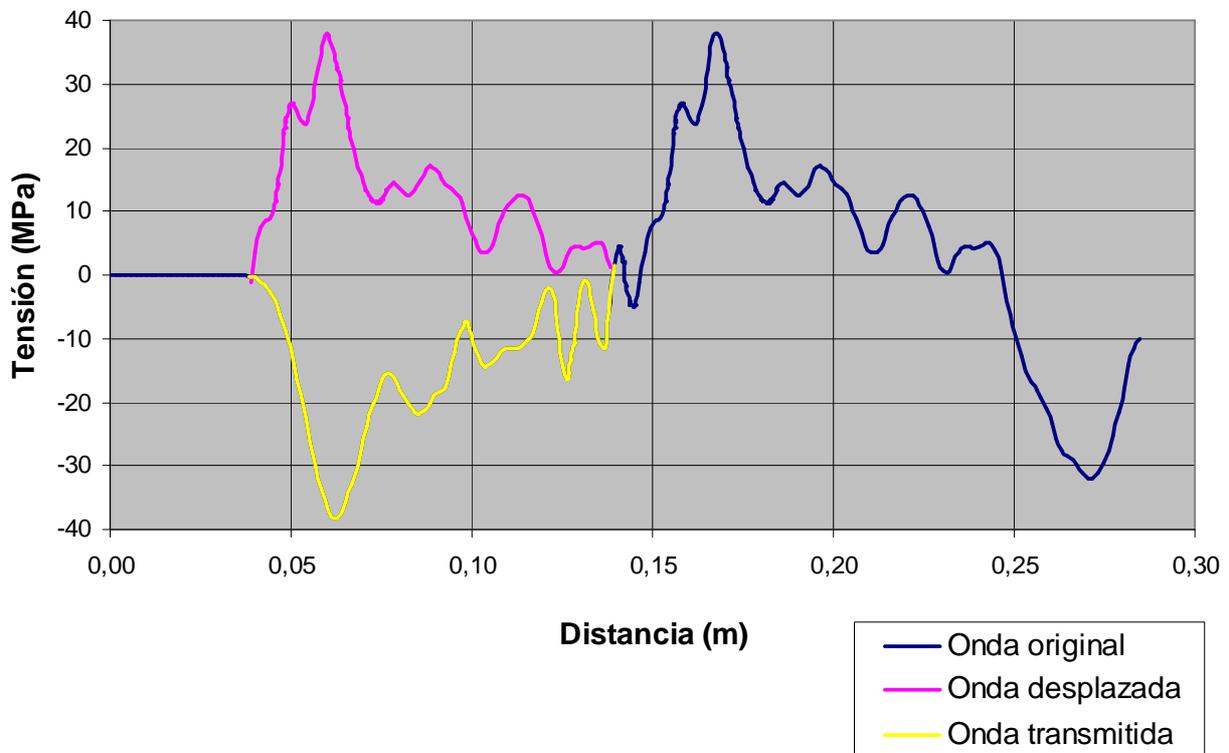


Figura 0.49 Tensión-Distancia

En la Figura 0.49, en la que se ha acoplado la onda transmitida con la reflejada, 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.

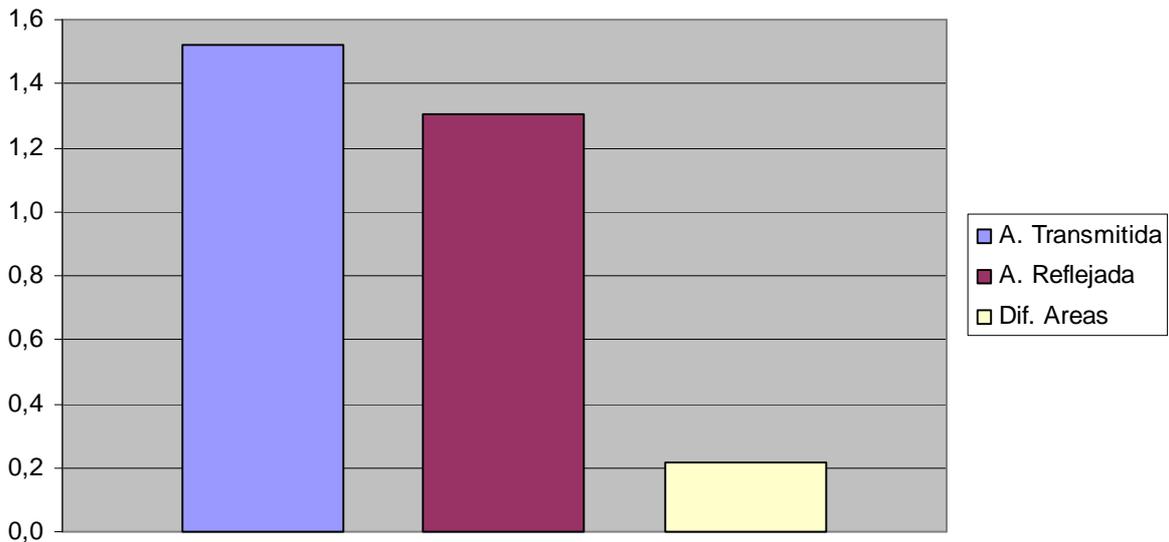


Figura 0.50 Diferencia de áreas

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

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

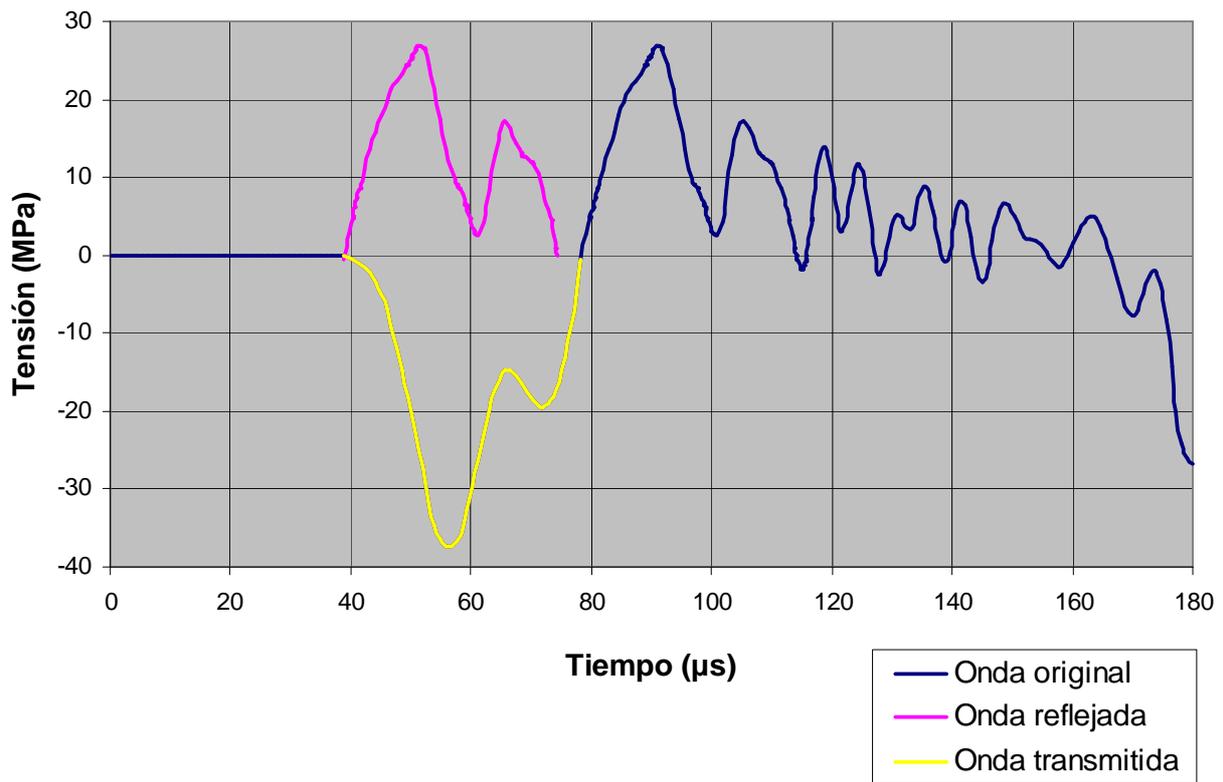


Figura 0.51 Tensión-Tiempo

A diferencia que en la Figura 0.47, la Figura 0.51 evidencia los efectos del cruce de ondas al ser un plano más alejado del plano límite. Se aprecia una disminución considerable en la magnitud de la tensión de la onda reflejada y una reducción en las longitudes de ambas ondas debido a la anulación que se producen entre ellas al ser de signos opuestos.

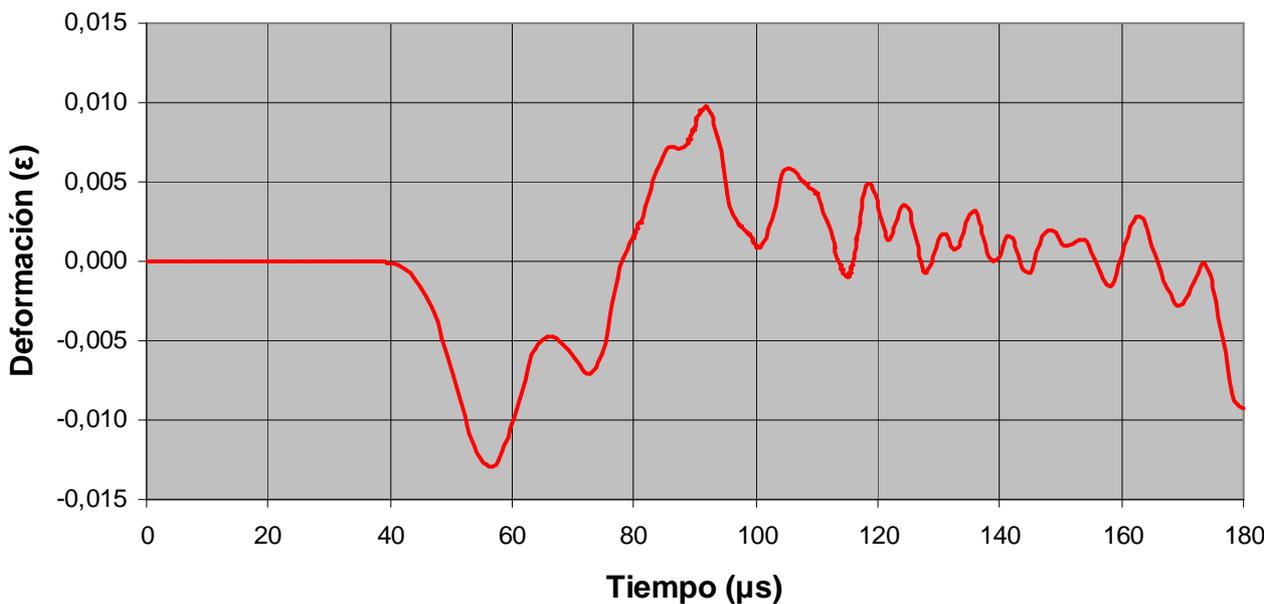


Figura 0.52 Deformación-Tiempo

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

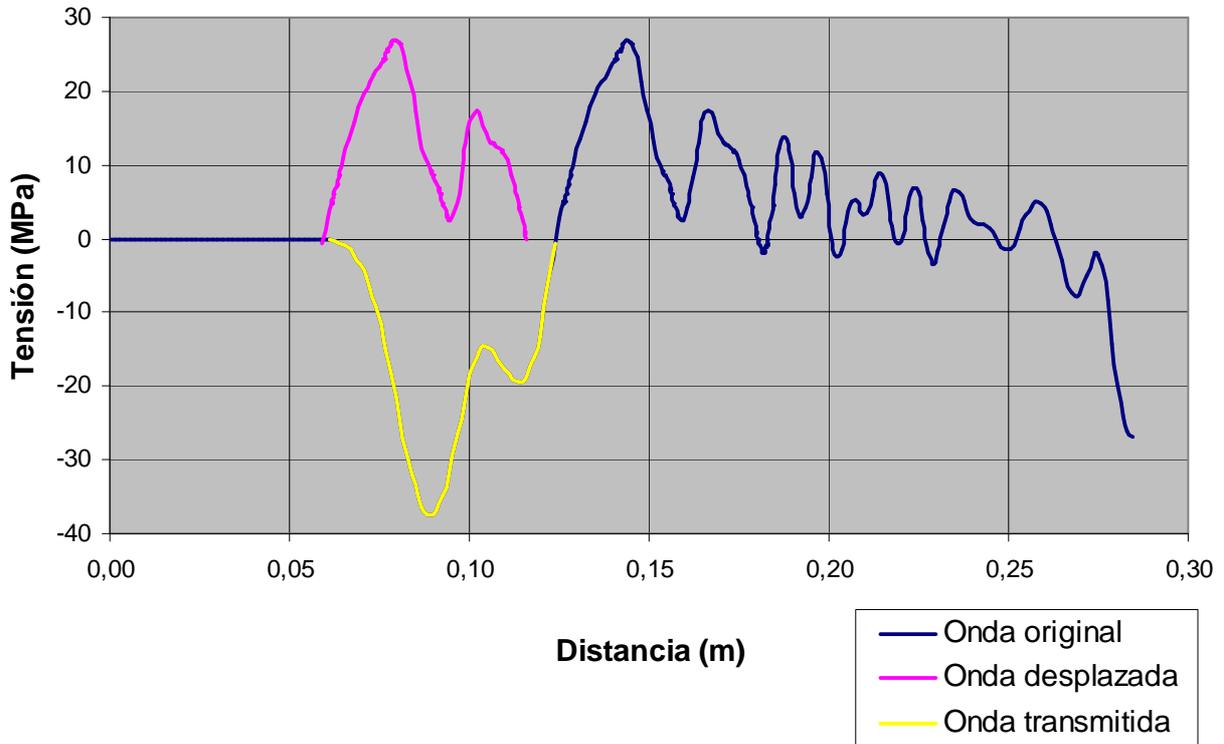


Figura 0.53 Tensión-Distancia

En la Figura 0.53 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.

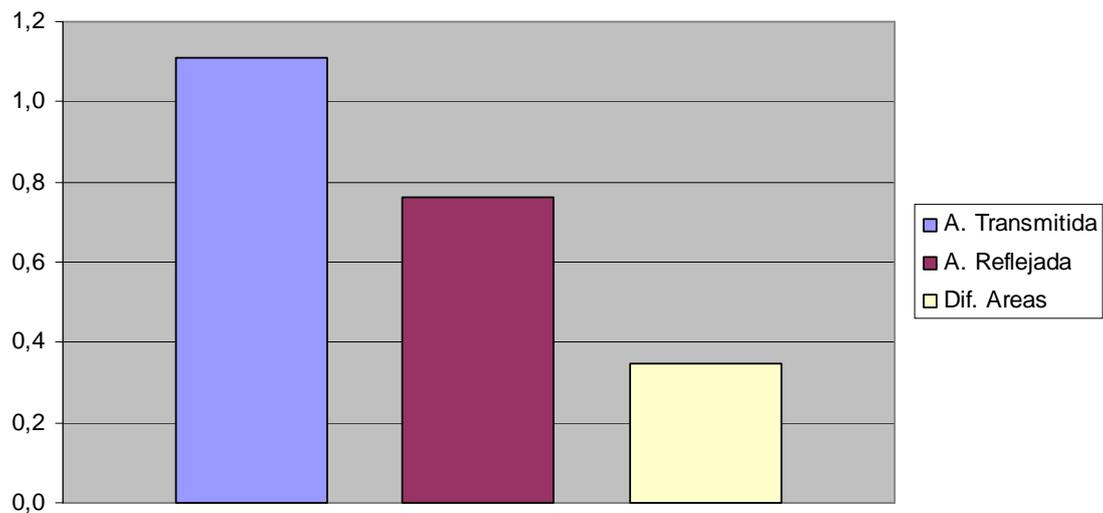


Figura 0.54 Diferencia de áreas

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%.

1.2.2 Probeta 100xØ10 mm. Flyer Ø22x2mm

Se estudia ahora el mismo caso que el anterior pero con un flyer de 2mm, por lo que se espera una mayor deformación del flyer, como ocurría en el caso homólogo de probeta de sección cuadrada. Con esta simulación se pretende estudiar la influencia de la sección de la probeta en la deformación del flyer comparando los resultados con los obtenidos en el apartado 1.1.4.

El pulso teórico debe tener la misma magnitud que el caso anterior (36,8MPa) y una longitud de 0,78µs.

1. Plano de choque

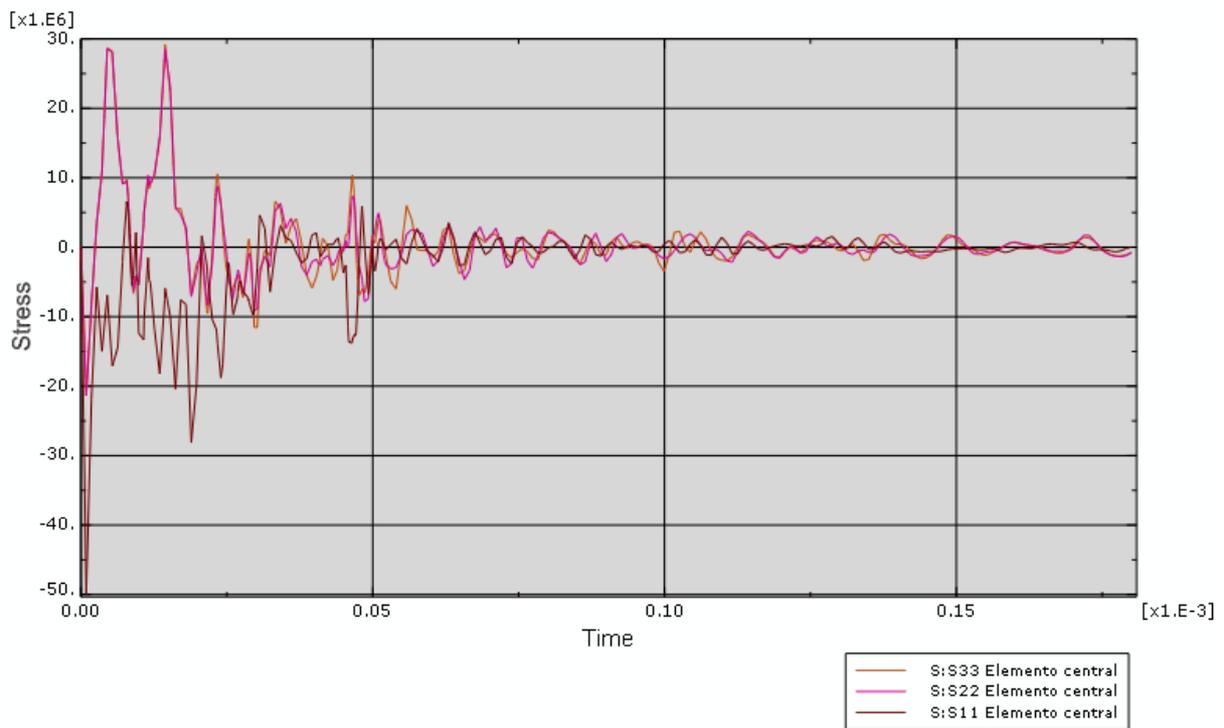


Figura 0.55 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

En la Figura 0.55 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. Además, las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante pero, al contrario que ocurre en el caso mencionado, en éste, sí se disipan.

La mayor deformación del flyer (por ser éste más delgado) con respecto a la simulación anterior, es la causante de que las tensiones adquieran esas magnitudes. Y la sección circular de la probeta es la causante de que las tensiones σ_{22} y σ_{33} se disipen, no como ocurría en el caso de probetas cuadradas.

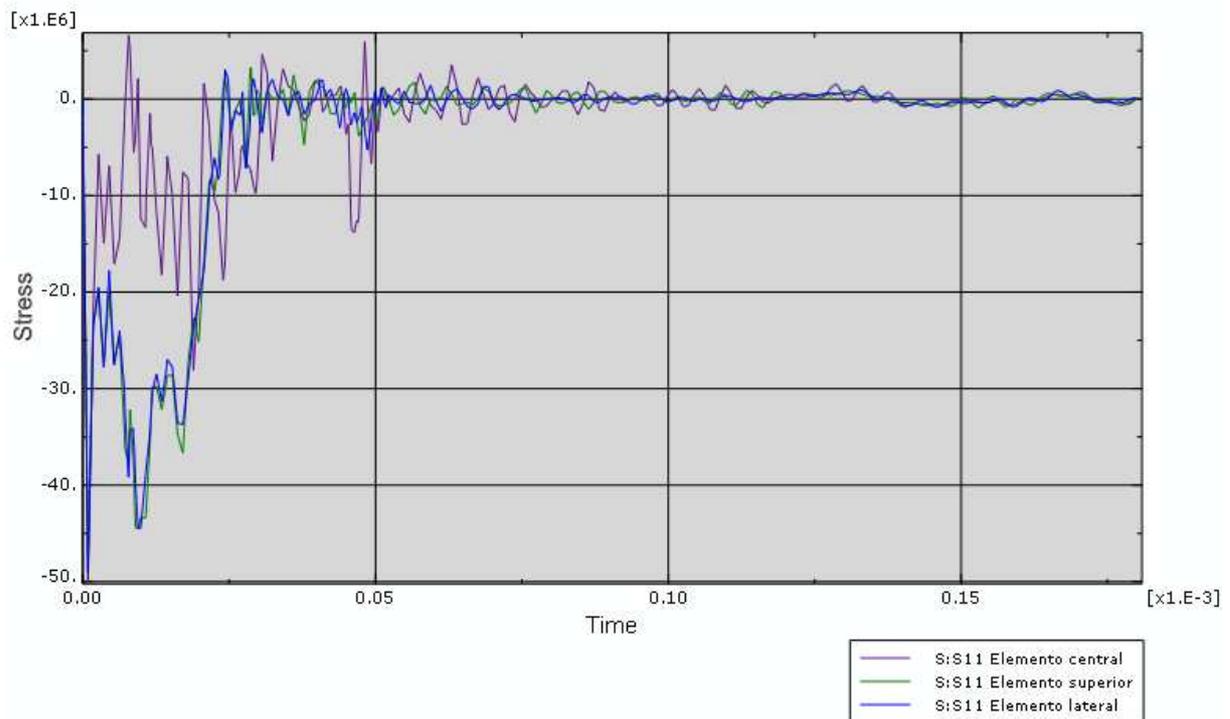


Figura 0.56 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Si se compara la Figura 0.56 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.

1.2.3 Probeta 100xØ10 mm. Flyer de acero Ø22x2mm

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:

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

Y la tensión transmitida (σ_T):

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

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

1. Plano de choque

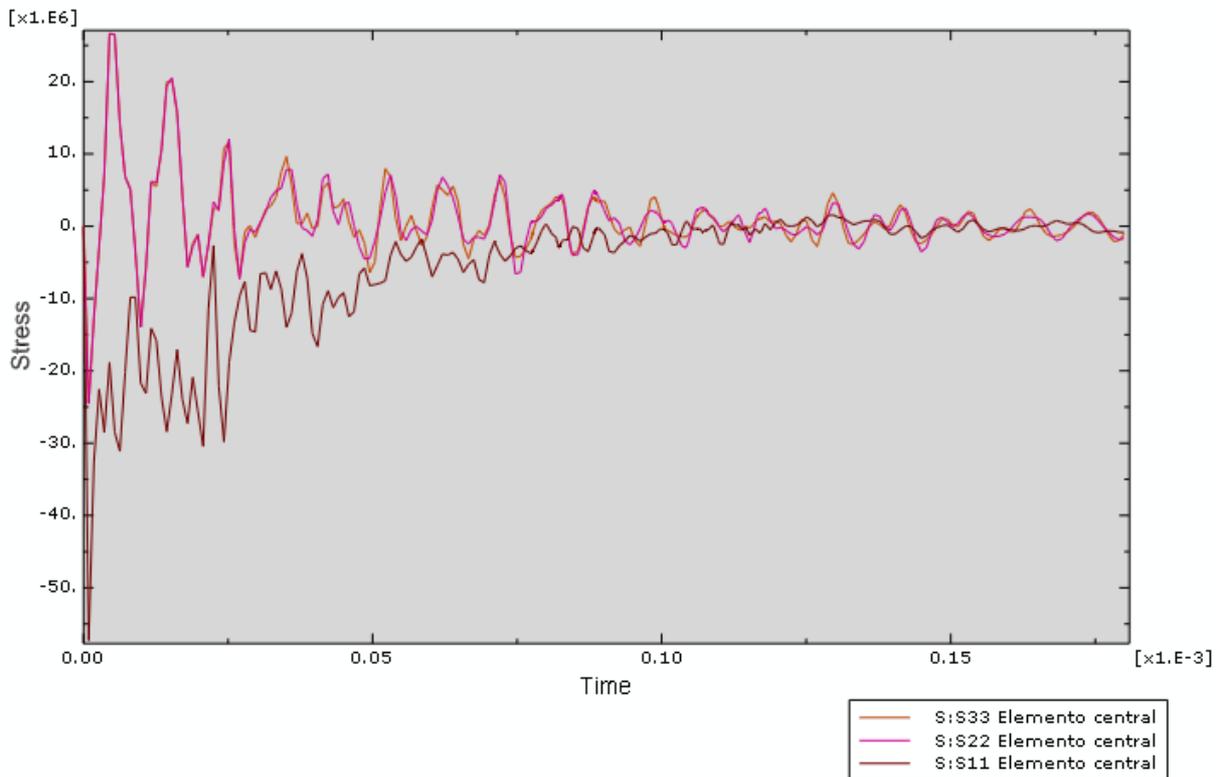


Figura 0.57 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

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 esta gráfica, 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 Figura 0.57, donde la tensión media σ_{11} es de 26MPa mientras que la teórica es de 37,5MPa.

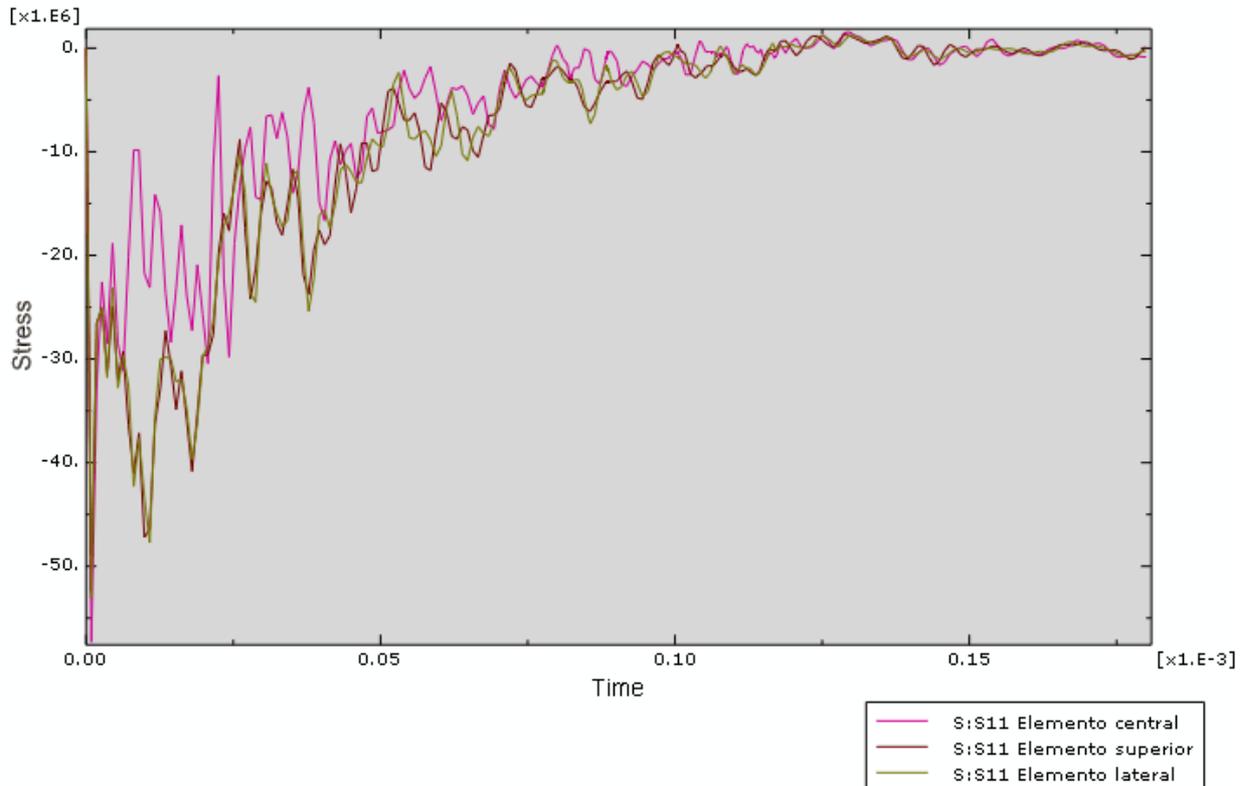


Figura 0.58 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Del mismo modo, en la Figura 0.58, se puede observar como la tensión σ_{11} en los elementos superior y lateral es mayor que en el elemento central, esto significa que se produce el efecto envolvente del flyer sobre la probeta, habiendo un déficit de contacto en la zona central donde se transmite menor tensión. Por consiguiente, en los extremos habrá una mayor presión y se transmitirá mayor tensión no sólo en la dirección longitudinal de la probeta si no también en las perpendiculares a ésta debido a que, la flexión sufrida por el flyer hace que el contacto en los extremos no se de entre caras paralelas, si no con ángulo.

1.3 Simulaciones probeta-flyer de la misma sección

En este apartado se analizarán las simulaciones correspondientes a la segunda solución proporcionada en el apartado “Conclusión” del apartado 1.2.2 para reducir el efecto envolvente del flyer. Las simulaciones se han realizado sobre probetas de sección cilíndrica de Ø10x100mm ya que, de los resultados obtenidos en los estudios anteriores, se ha determinado como la probeta más apta. Y, para comparar la influencia y verificar las hipótesis anteriores de estabilización de ondas, se han utilizado flyers de Ø10x2mm y Ø10x5mm.

1.3.1 Flyer de Aluminio Ø10x5mm

En este caso, la tensión incidente (σ_I) sobre la probeta es la misma que en las otras simulaciones con flyer de aluminio ya que las dimensiones de éste no influyen:

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

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

$$A_1 = A_2;$$

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

Y la tensión teórica transmitida (σ_T) en este caso es:

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

1. Plano de choque

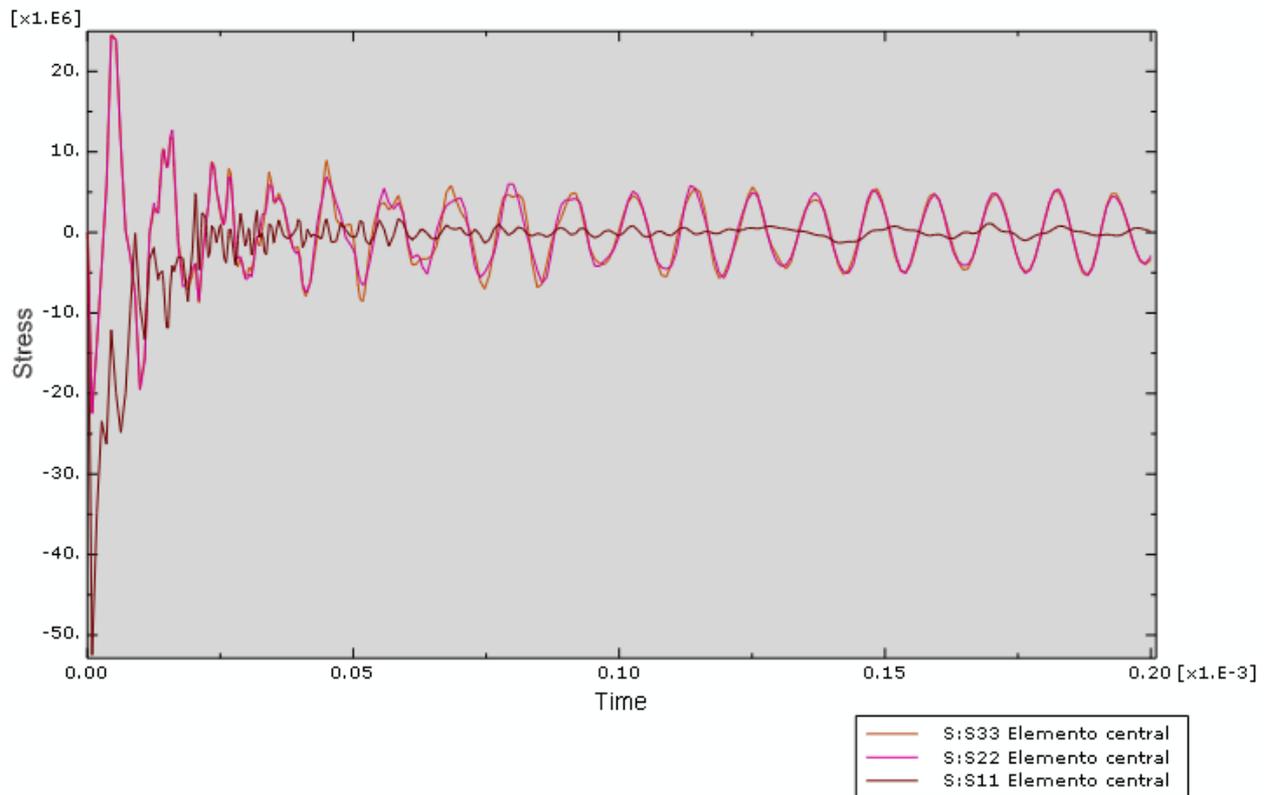


Figura 0.59 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

La Figura 0.59 muestra unos resultados muy similares a los de las simulaciones anteriores. Se observa como 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.

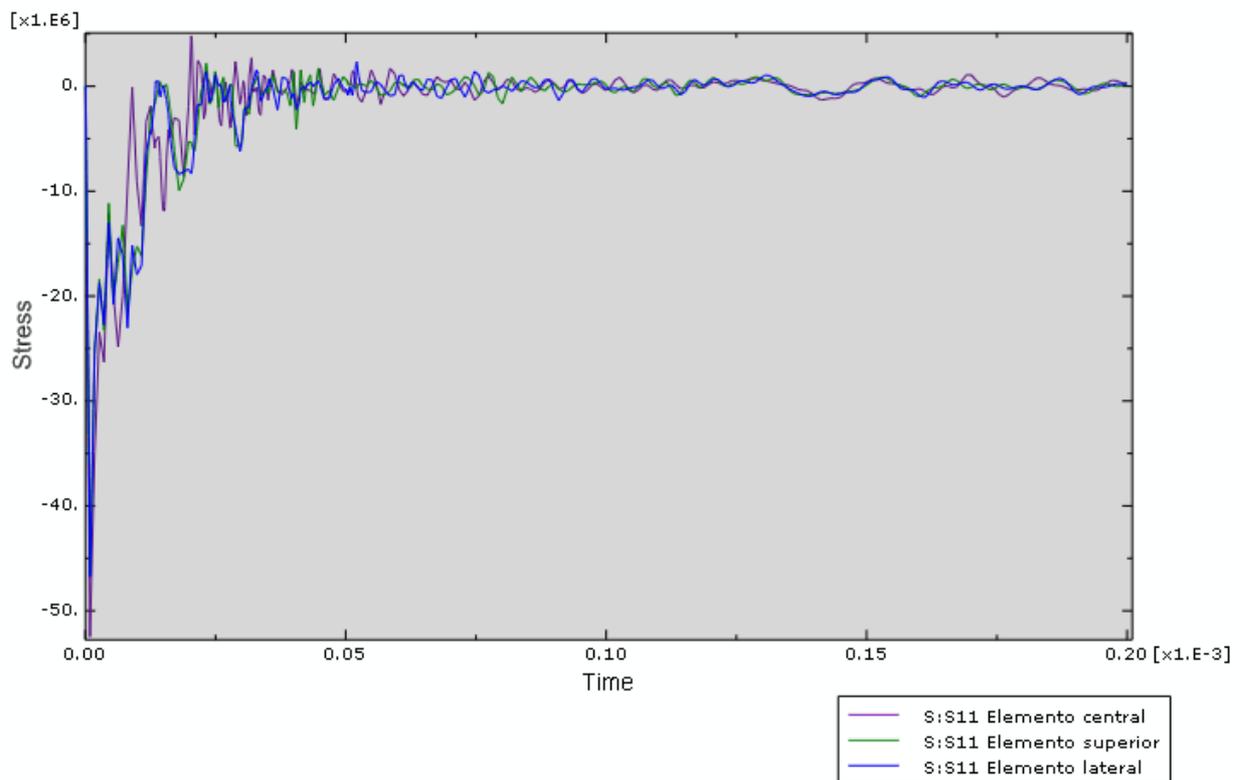


Figura 0.60 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

La Figura 0.60 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 el diámetro de flyer era mayor que el de la probeta, no existe ningún pico de tensión mayor en los elementos superior y lateral, produciéndose la misma tensión σ_{11} en todos los elementos del plano de choque.

Además, si se compara esta gráfica con la de simulaciones anteriores, se puede comprobar como 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

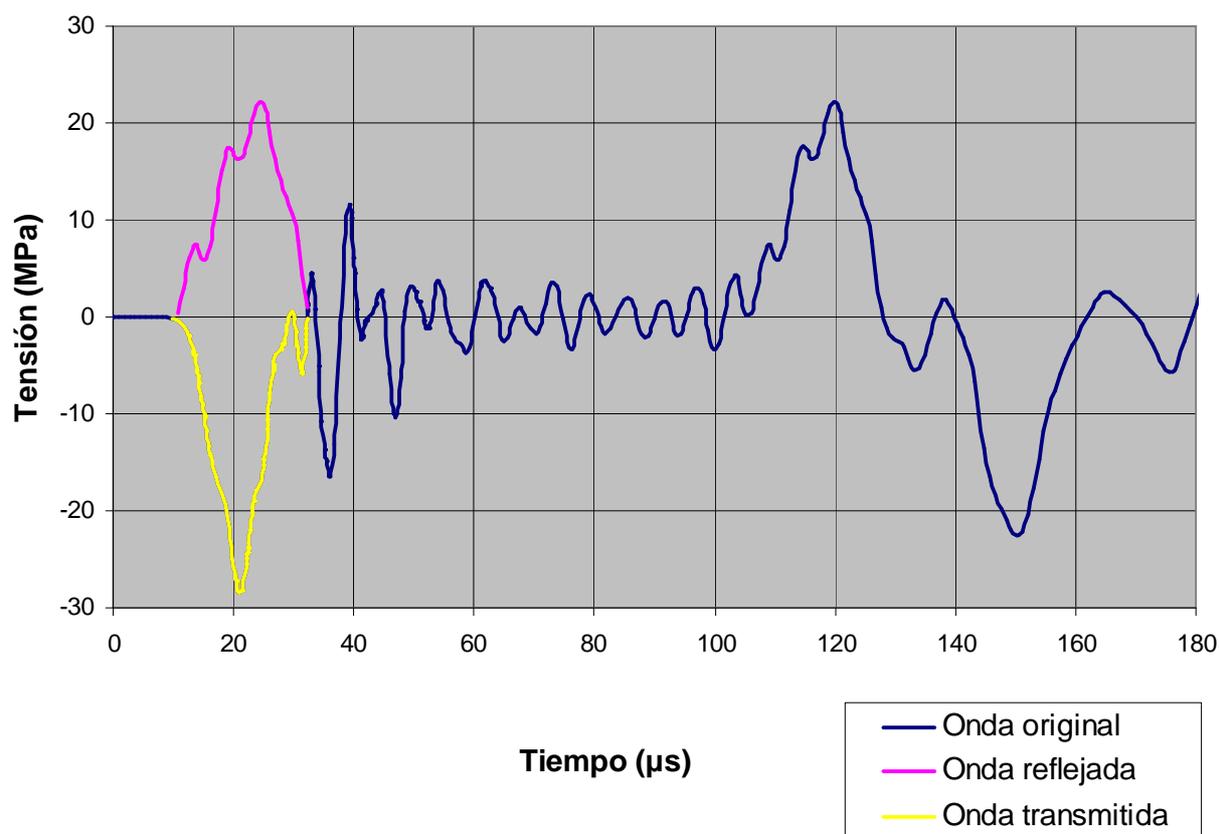


Figura 0.61 Tensión-Tiempo

Una de las mejoras más notables que pueden observarse a primera vista en la Figura 0.61 es que, aunque tampoco coincide con el valor teórico, la longitud de onda ha mejorado considerablemente con respecto a las simulaciones anteriores, ya que, mientras que antes rondaba los $50\mu\text{s}$, en este caso es de aproximadamente $20\mu\text{s}$. 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 $23,4\text{MPa}$, que resulta inferior a la teórica de $33,4\text{MPa}$. Esto es debido a que a medida que avanza el frente de onda, las tensiones σ_{22} y σ_{33} influyen haciendo que la magnitud del frente en la dirección longitudinal de la probeta disminuya.

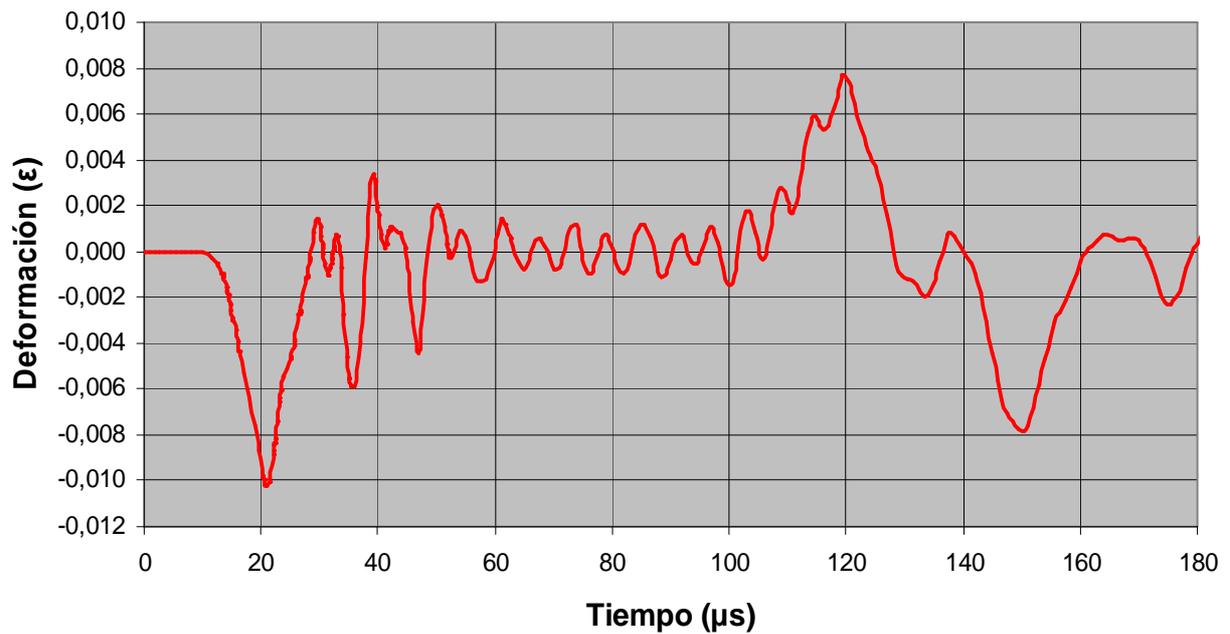


Figura 0.62 Deformación-Tiempo

En la Figura 0.62 también puede observarse la rápida estabilización de las ondas en esta simulación así como la reducción de la deformación obtenida (0,008 ϵ) con la teórica (0,011 ϵ).

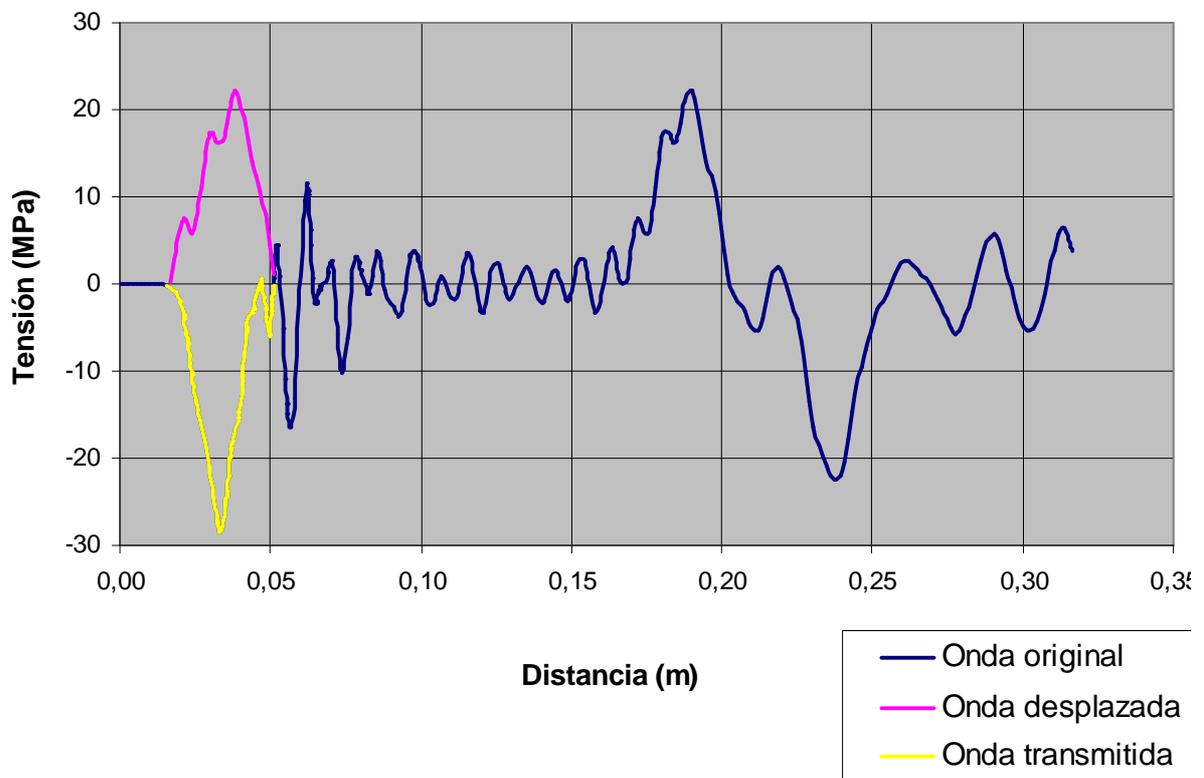


Figura 0.63 Tensión-Distancia

En la Figura 0.63 se ha acoplado la onda reflejada a la transmitida en el mismo instante para poder compararlas mejor. Se observa una onda reflejada muy similar a la transmitida, pero no se pueden considerar iguales si no lo corrobora el cálculo de áreas.

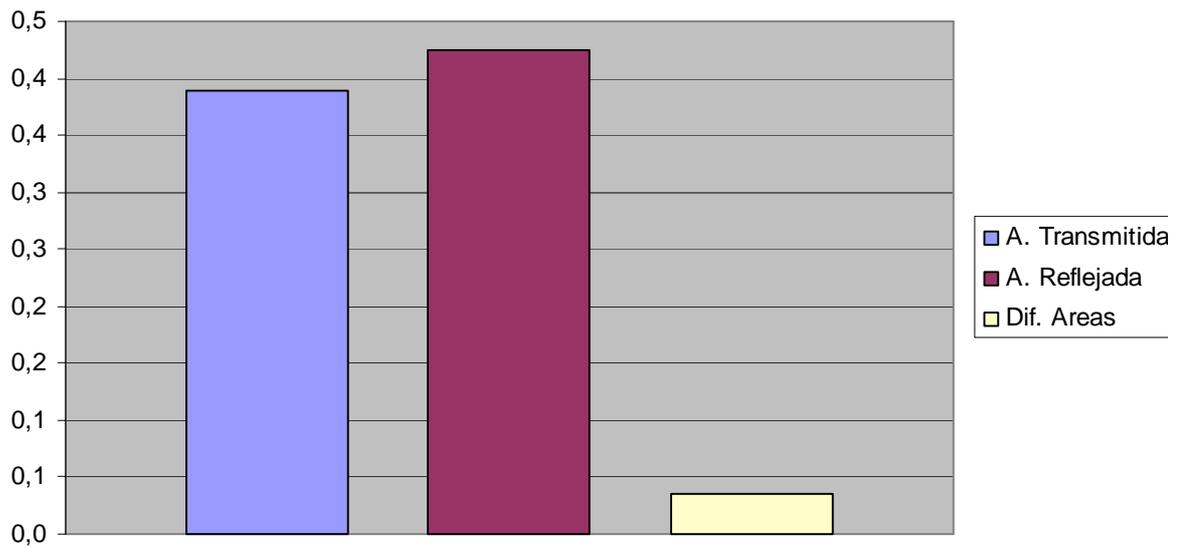


Figura 0.64 Diferencia de áreas

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%.

3. Plano medio

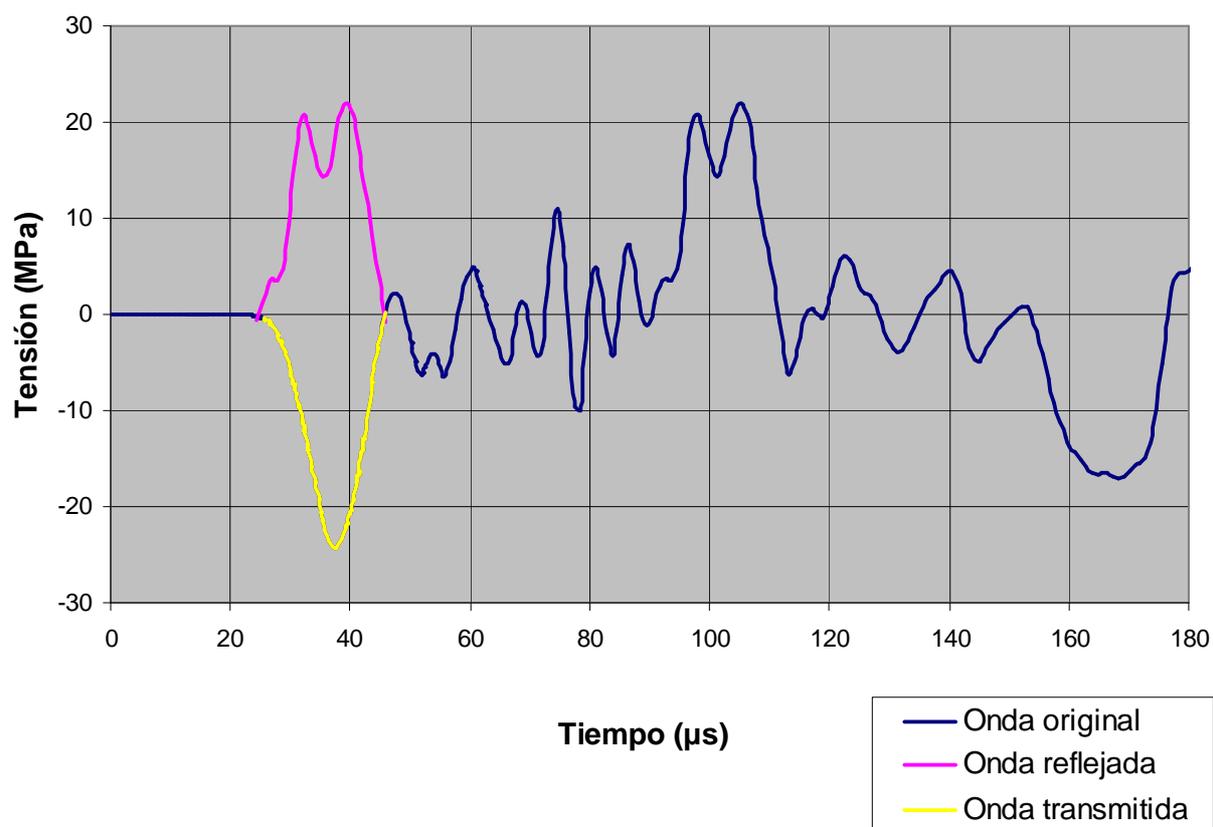


Figura 0.65 Tensión-Tiempo

En la Figura 0.65 se observa una onda igual en magnitud (23,4MPa) y longitud (20μs) que la del plano anterior. Esto corrobora la hipótesis de que, si las tensiones σ_{22} y σ_{33} adquieren un valor importante, perturban la onda, haciendo que la magnitud de la onda en la dirección longitudinal disminuya y se aleje del teórico.

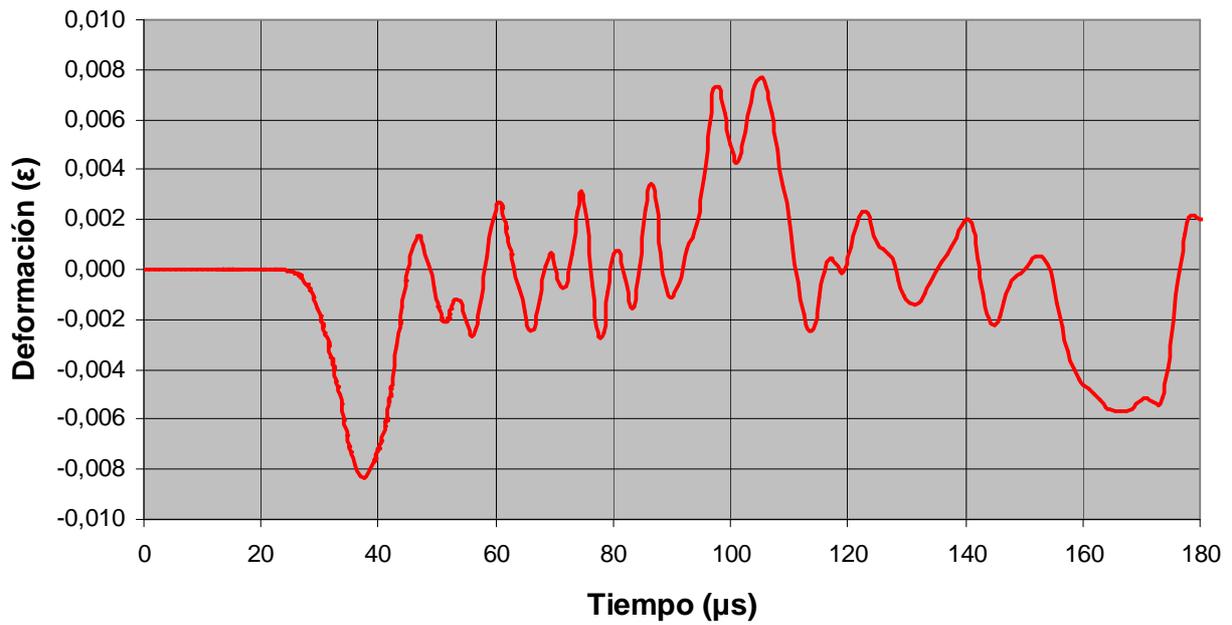


Figura 0.66 Deformación-Tiempo

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.

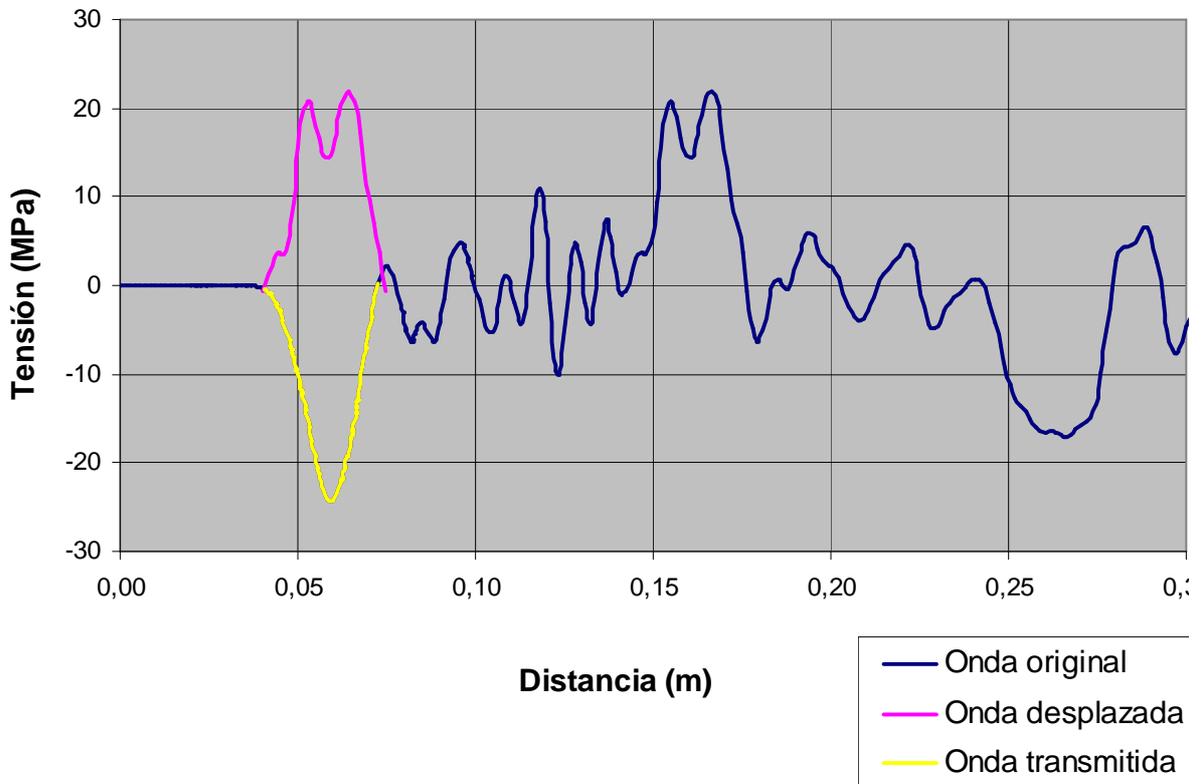


Figura 0.67 Tensión-Distancia

Del mismo modo que en el plano anterior, la Figura 0.67 muestra la superposición de la onda transmitida y reflejada en función de la distancia al plano de choque en la que se encuentran. Visualmente parece que pueden considerarse prácticamente iguales, pero se ha de recurrir al cálculo de áreas para confirmarlo numéricamente.

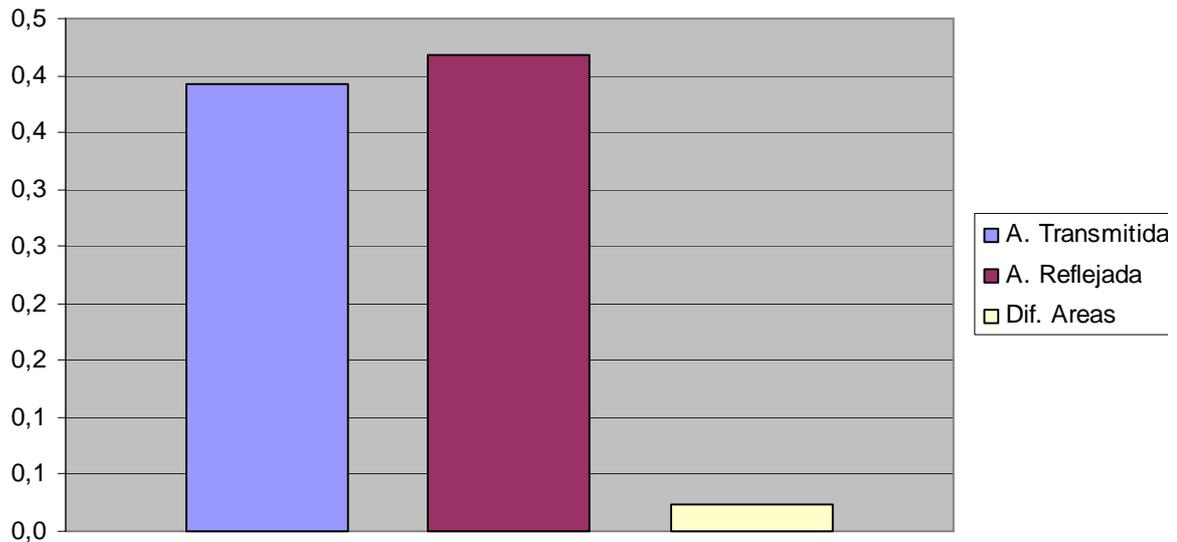


Figura 0.68 Diferencia de áreas

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, con la onda ya estabilizada, también se podían considerar iguales. Esta igualdad permanecerá constante hasta que se produzca el cruce de ondas, ya ambas ondas se anularán entre sí disminuyendo su longitud y magnitud.

4. Plano 75% (límite)

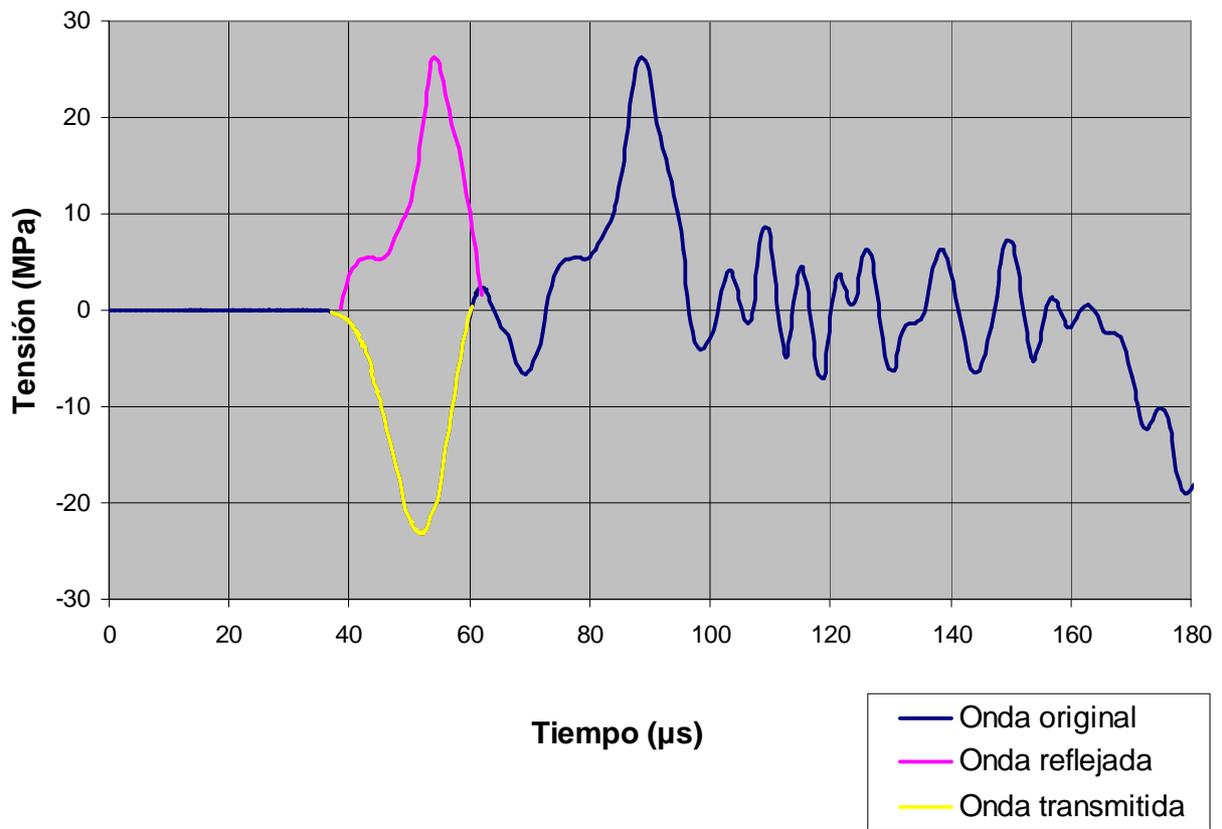


Figura 0.69 Tensión-Tiempo

En la Figura 0.69 se observa un inicio de cambio de forma en la onda reflejada, esto se debe a que está a punto de cruzarse con la reflejada y la magnitud y longitud de ambas ondas van a verse anuladas entre sí. Por lo demás, la onda permanece igual que en los planos anteriores.

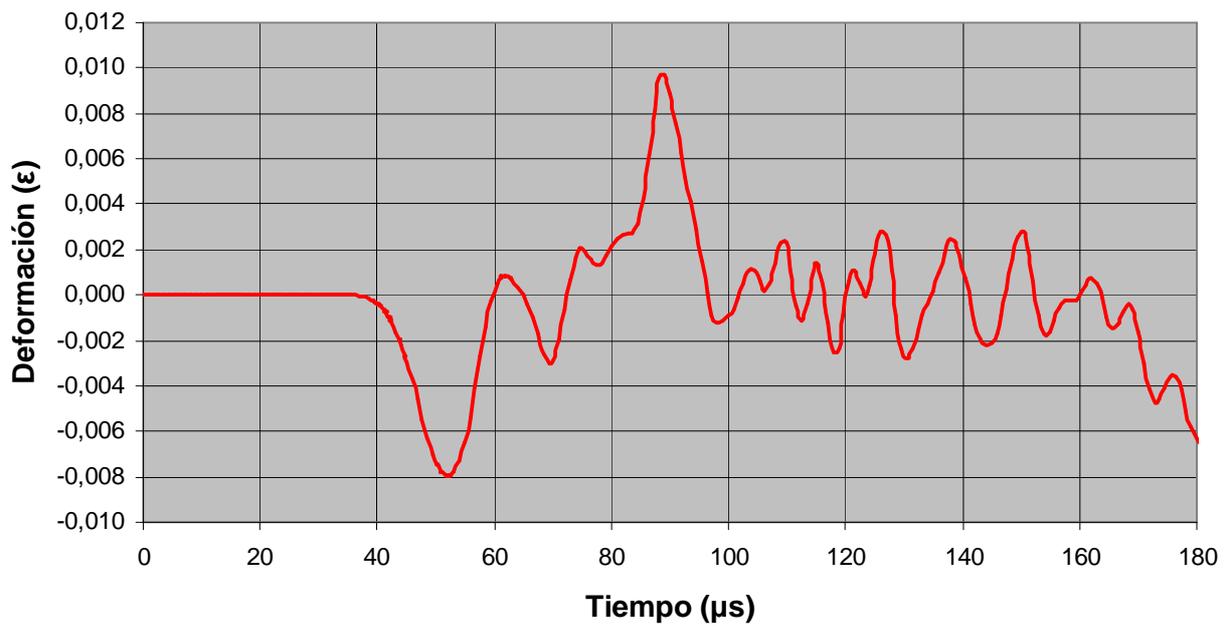


Figura 0.70 Deformación-Tiempo

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.

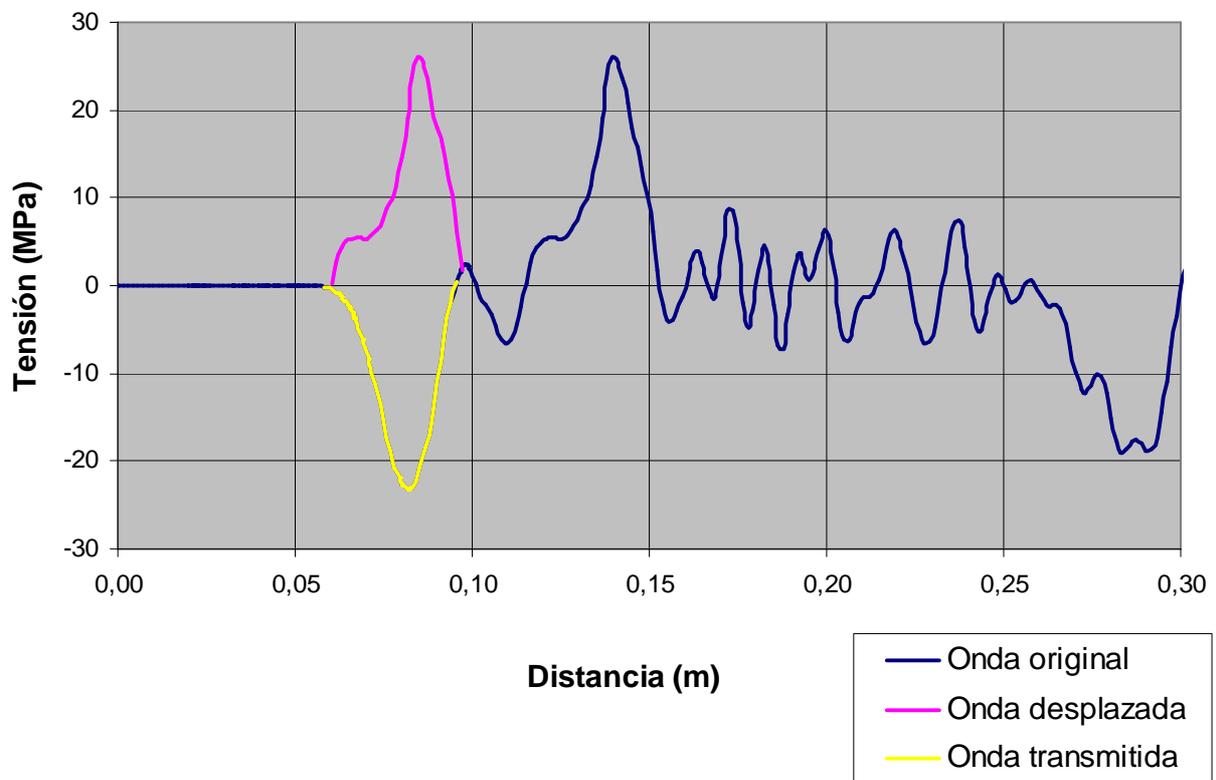


Figura 0.71 Tensión-Distancia

En la Figura 0.71 se ve perfectamente, gracias a la superposición de ondas, cómo la forma de la onda reflejada empieza a cambiar. Una vez más, se ha de recurrir al cálculo numérico para comprobar si las ondas pueden considerarse iguales.

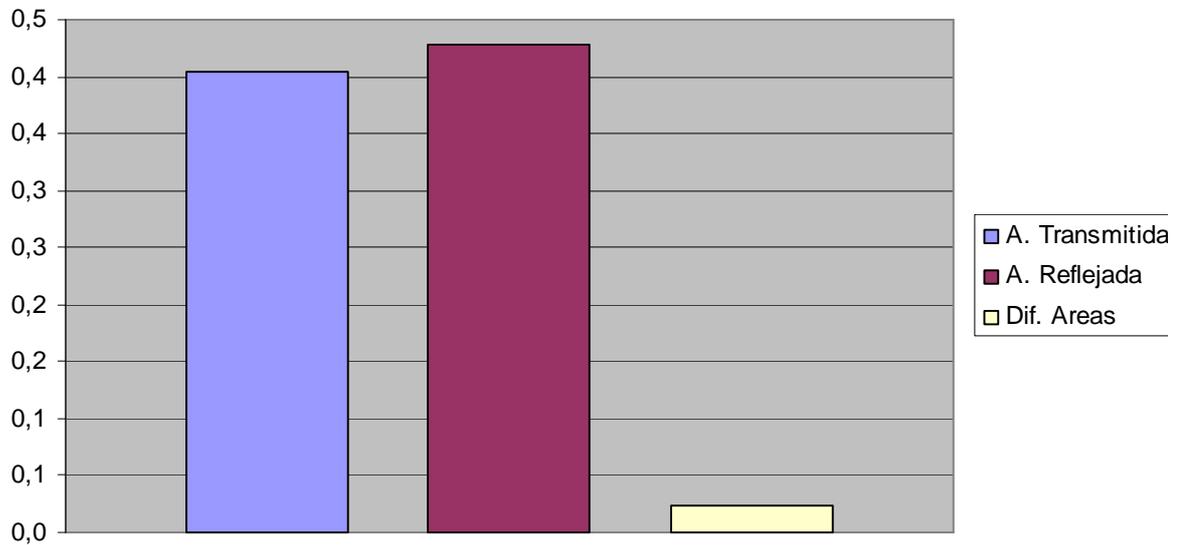


Figura 0.72 Diferencia de áreas

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 con el cálculo de áreas ya que, como puede visualizarse en la Figura 0.71, la onda reflejada es muy similar a la transmitida y la reducción de longitud y magnitud que se daría sería equivalente en ambas, resultando la diferencia de áreas menor del 10% siempre.

La única forma de detectar el cruce de ondas a partir del cálculo de áreas es comparar cada área hallada con la del plano anterior; si el área obtenida es notablemente menor que la anterior es porque la curva se ha visto modificada.

1.3.2 Flyer de Aluminio Ø10x2mm

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

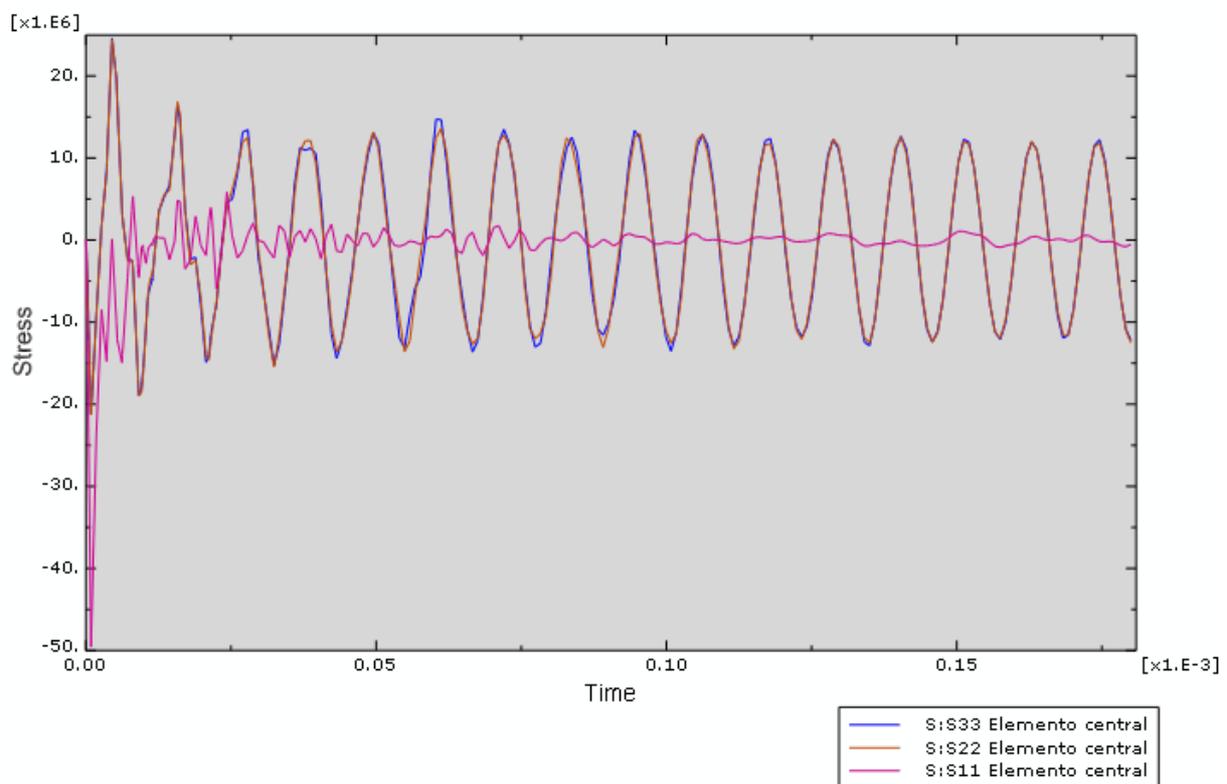


Figura 0.73 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

La Figura 0.73 muestra lo que se esperaba, al igual que ocurría en la simulación anterior, las tensiones σ_{22} y σ_{33} no se disipan. Además, el valor alcanzado por éstas es 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 y hace que las tensiones perpendiculares al eje longitudinal de la probeta cobren mayor importancia.

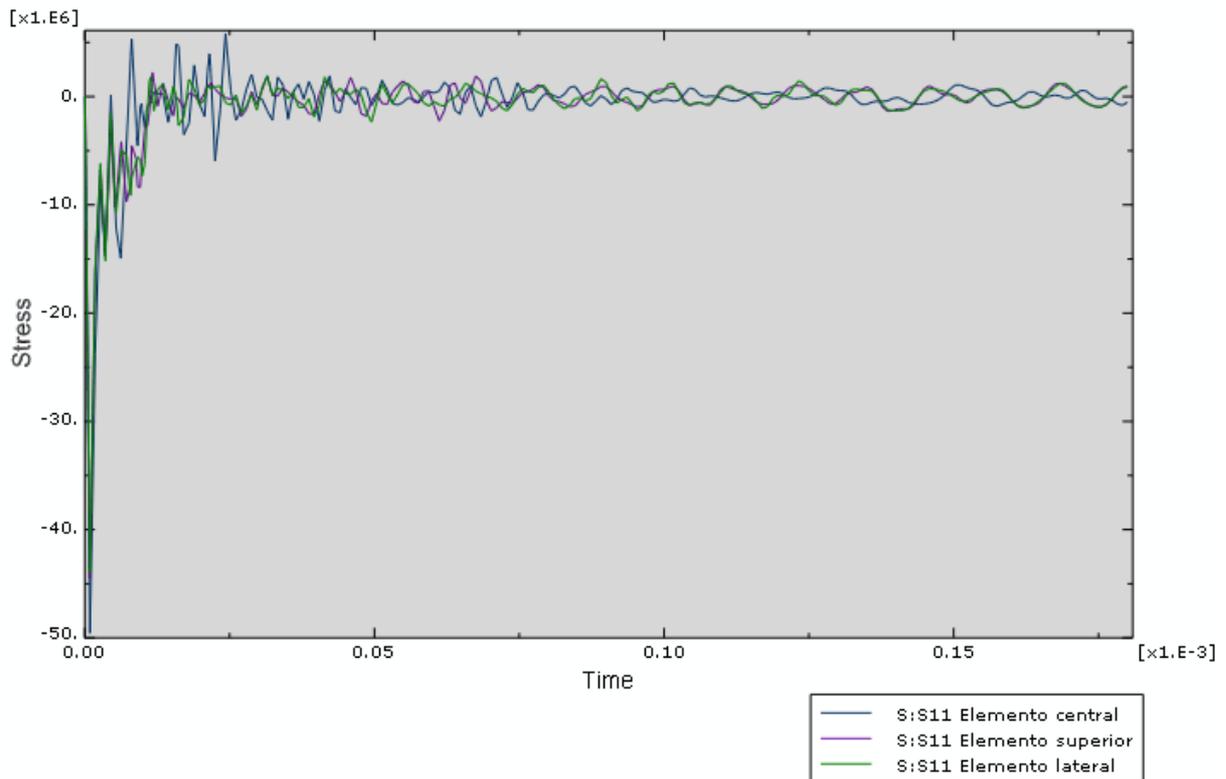


Figura 0.74 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

Del mismo modo que en el caso anterior, el contacto que se produce entre probeta y flyer es total ya que, como puede observarse en la Figura 0.74, la tensión σ_{11} de todos los elementos del plano de choque es la misma.

1.3.3 Flyer de Acero $\varnothing 10 \times 5 \text{mm}$

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 las dimensiones de éste no influyen:

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

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

$$A_1 = A_2;$$

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

La tensión teórica transmitida (σ_T) será este caso:

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

1. Plano de choque

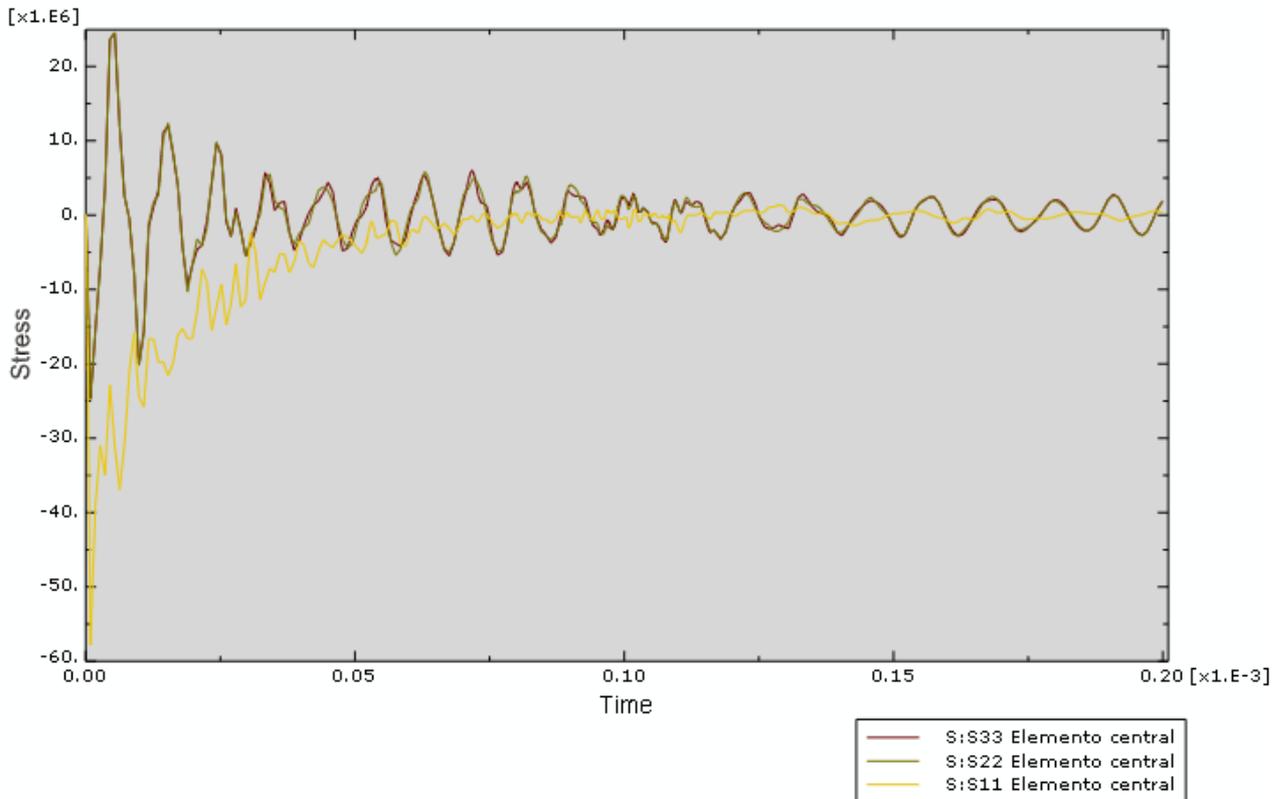


Figura 0.75 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

La Figura 0.75 muestra como 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. Este hecho era de esperar ya que al ser un material más resistente se deforma menos durante el impacto y, por lo tanto, reduce la transmisión de ondas en las direcciones perpendiculares al eje longitudinal de la probeta, reduciendo 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} y se puede considerar el ensayo como válido.

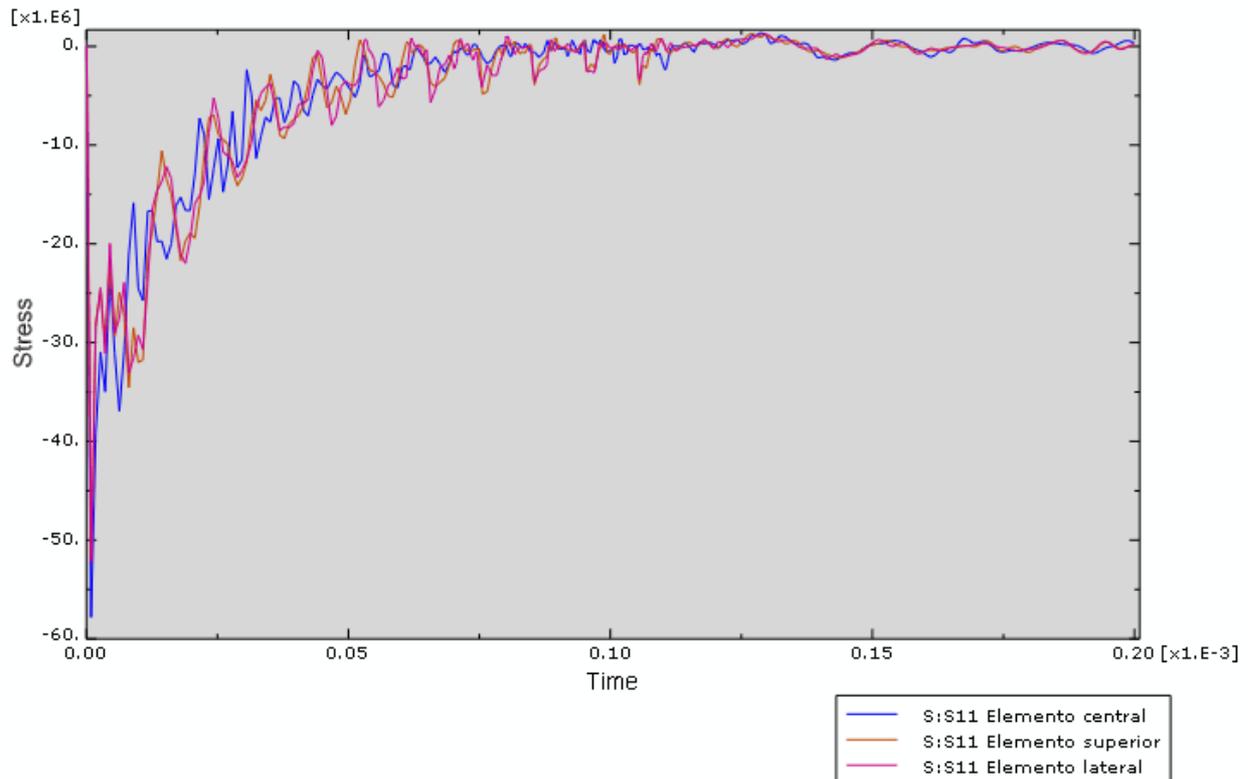


Figura 0.76 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

La Figura 0.76 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 se daba el efecto envolvente.

Por lo tanto, se continuará con el análisis de los demás planos de la probeta para comprobar si puede obviarse el efecto de las tensiones σ_{22} y σ_{33} dado su reducido valor.

2. Plano 25%

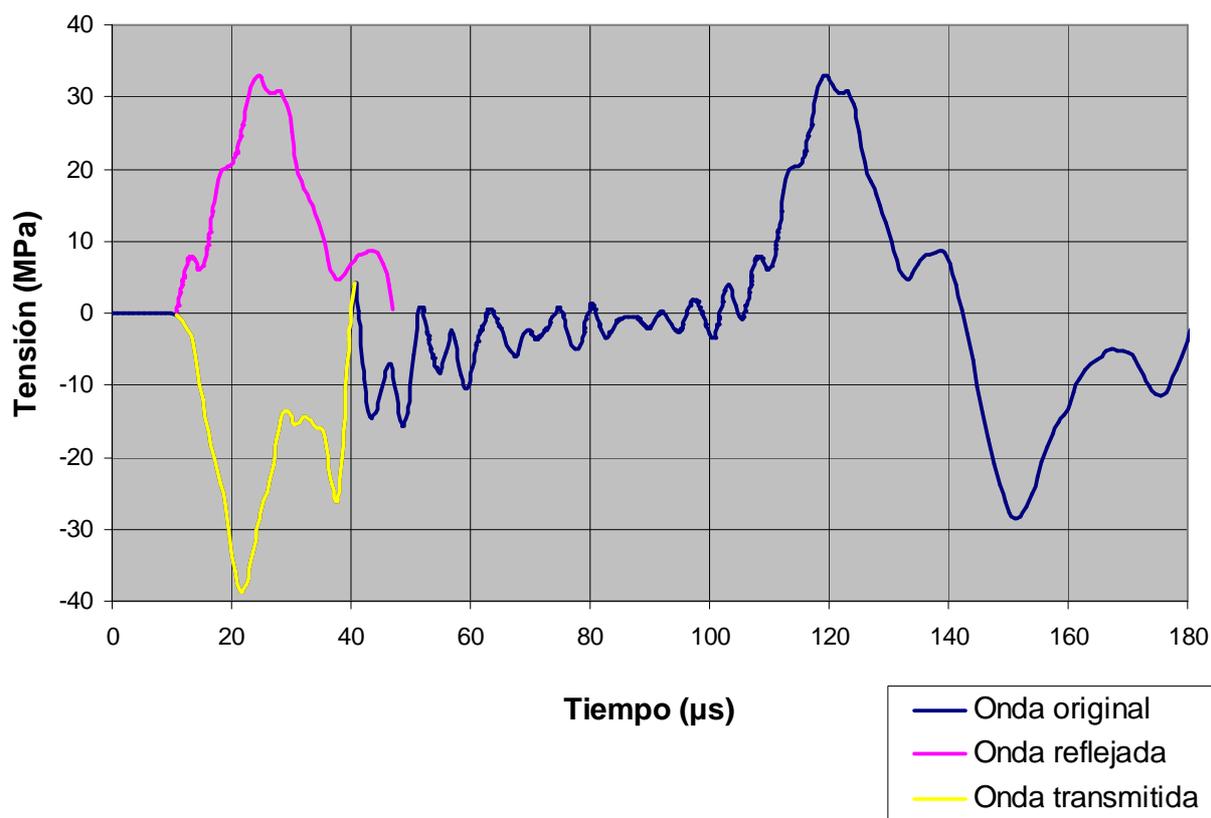


Figura 0.77 Tensión-Tiempo

Como ya sucedía con el caso de flyer de aluminio, una de las mejoras más evidentes al ver la Figura 0.77 es la considerable mejora de la longitud de onda que, aunque sin coincidir con la teórica, es mucho menor que en los casos con flyers de mayor diámetro que la probeta. En este caso la longitud de onda es aproximadamente $29\mu\text{s}$, mientras que en las otras simulaciones rondaba los $55\mu\text{s}$. 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 mejora.

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 y esto provoca una menor influencia 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. Este hecho hace que, de momento, pueda considerarse el ensayo como válido.

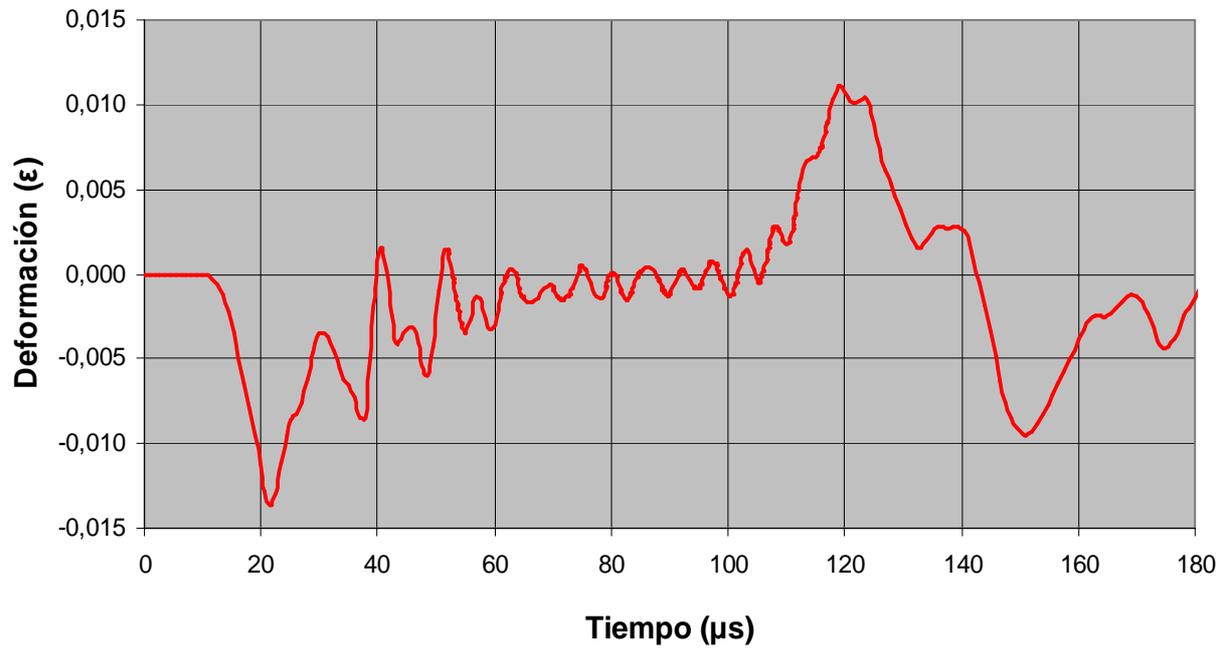


Figura 0.78 Deformación-Tiempo

Al igual que sucedía con la tensión, la deformación representada en la Figura 0.78 muestra también unos valores más próximos a los teóricos, 0,011ε obtenidos frente a los 0,012ε teóricos.

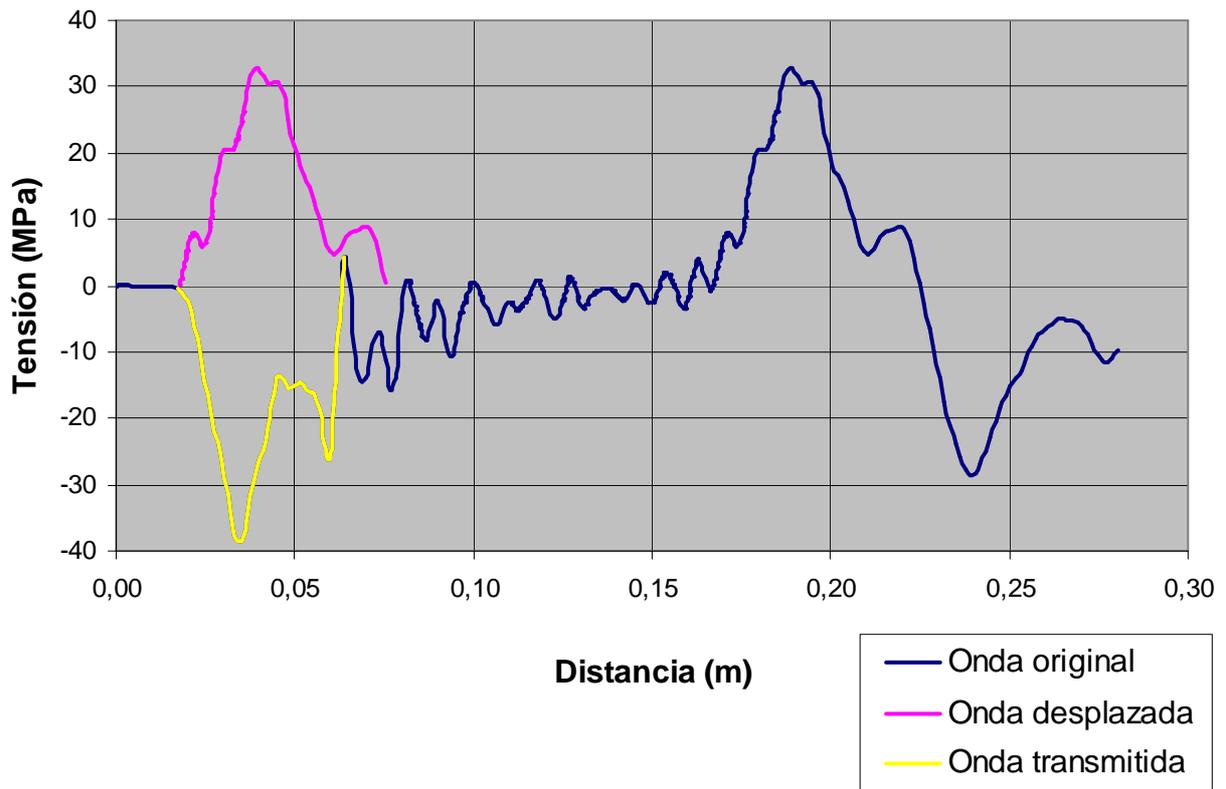


Figura 0.79 Tensión-Distancia

En la Figura 0.79 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.

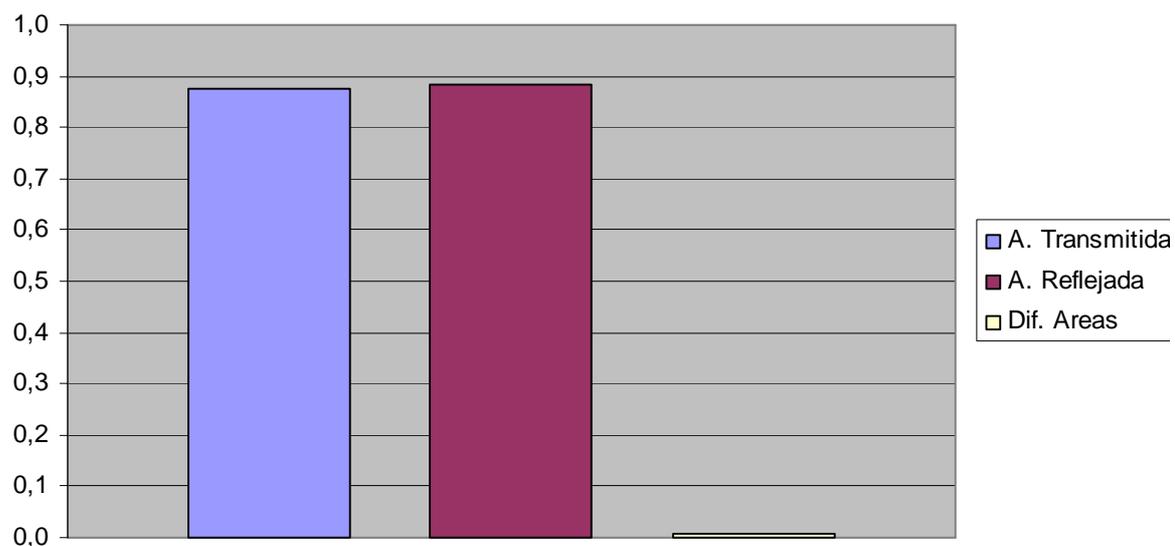


Figura 0.80 Diferencia de áreas

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%

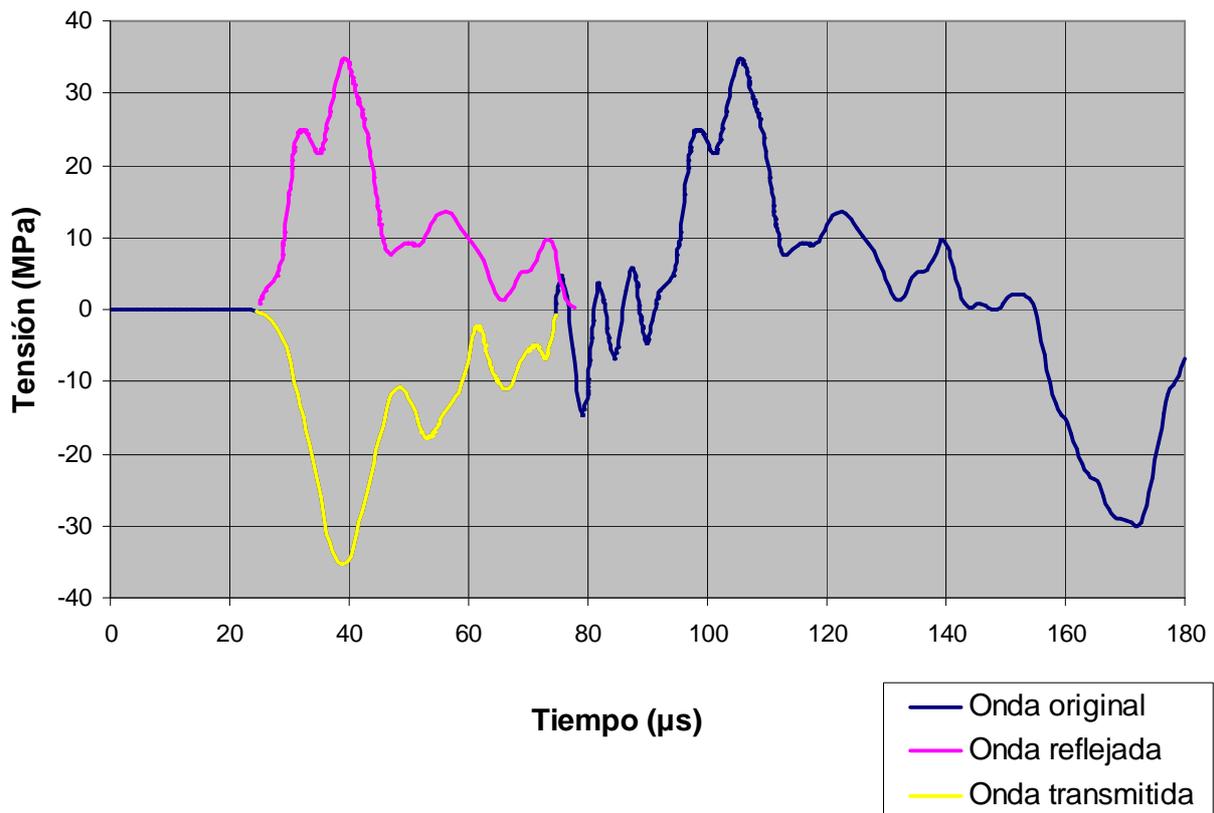


Figura 0.81 Tensión-Tiempo

La Figura 0.81 muestra una onda totalmente estabilizada que permanecerá constante hasta que se produzca el cruce de ondas. Las ondas más próximas al plano de choque son menos estables, por lo que sus propiedades aún no son definitivas, así pues los valores de onda obtenidos en este plano son más fiables.

El valor de la tensión en este caso 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.

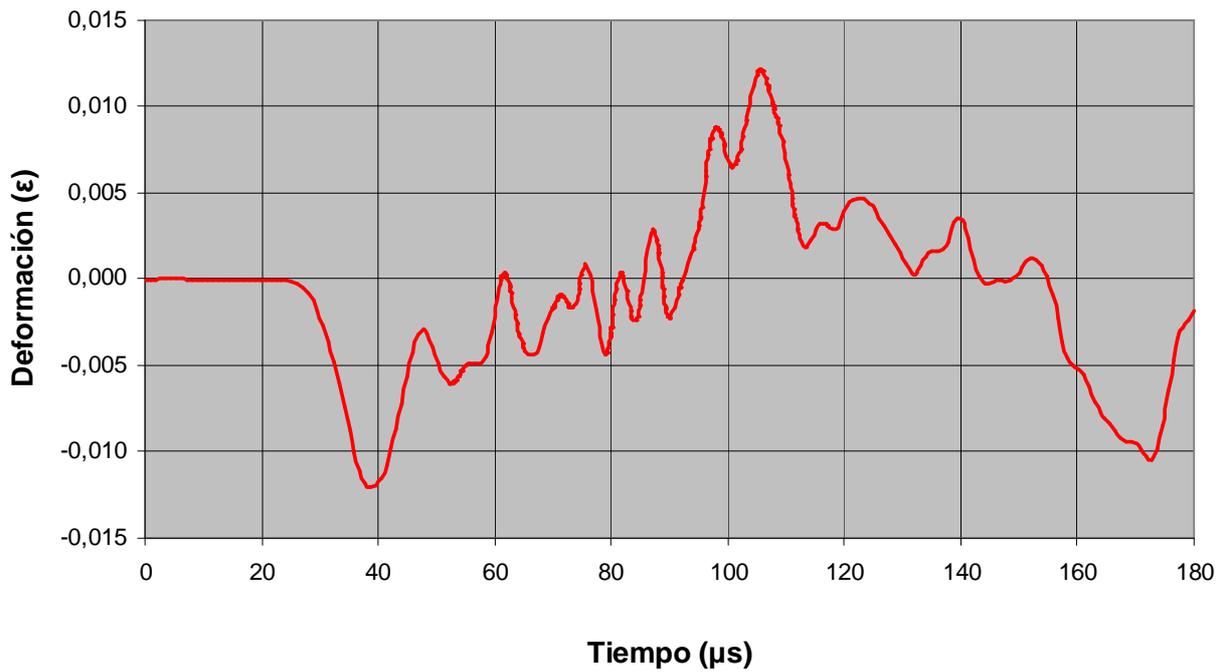


Figura 0.82 Deformación-Tiempo

Del mismo modo, en la Figura 0.82 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.

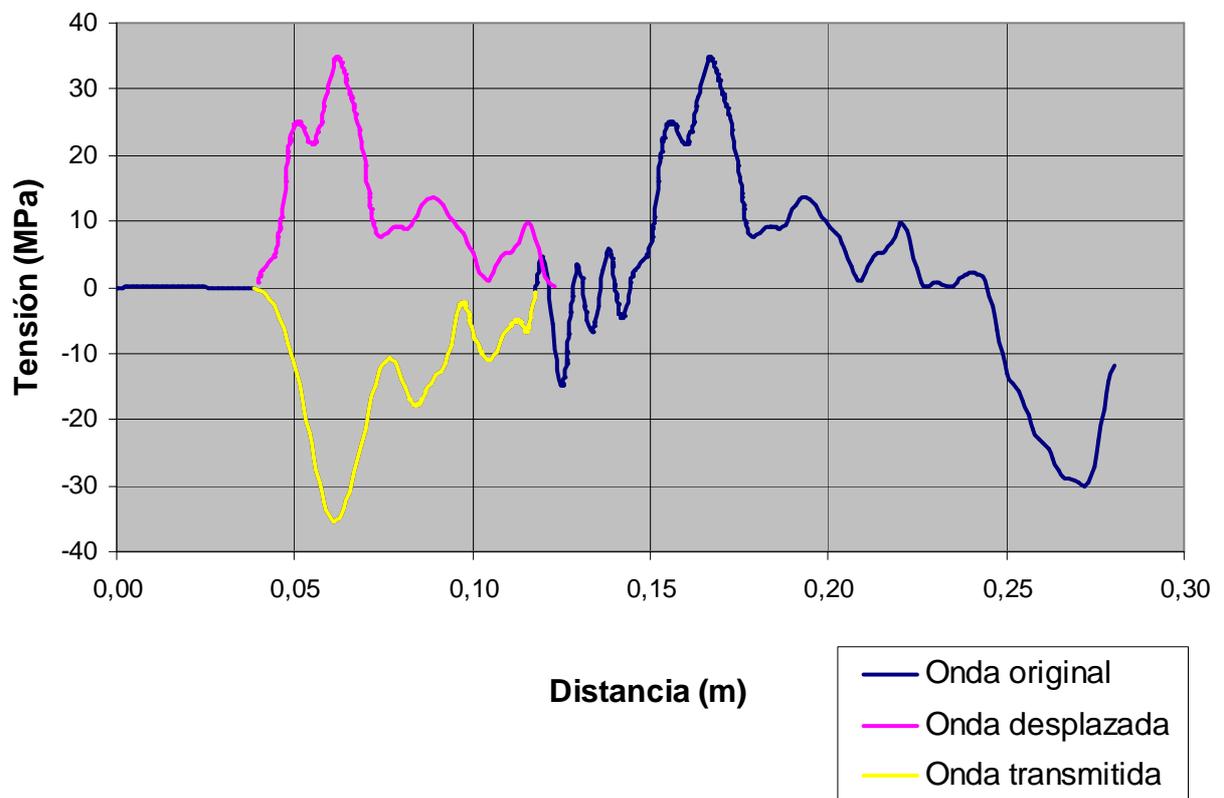


Figura 0.83 Tensión-Distancia

Como se puede observar en la Figura 0.83, 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.

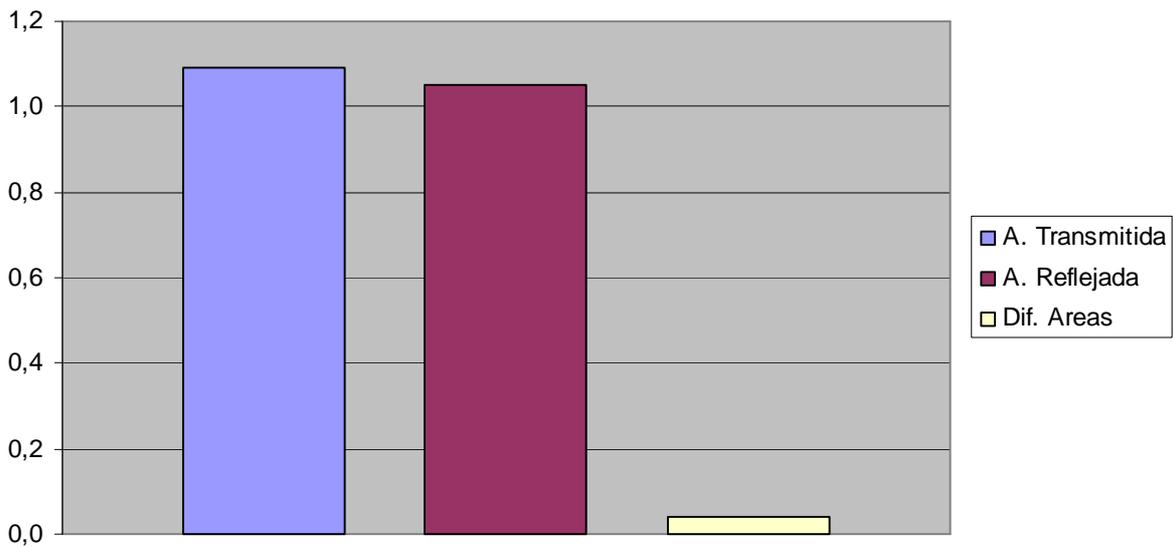


Figura 0.84 Diferencia de áreas

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 75%

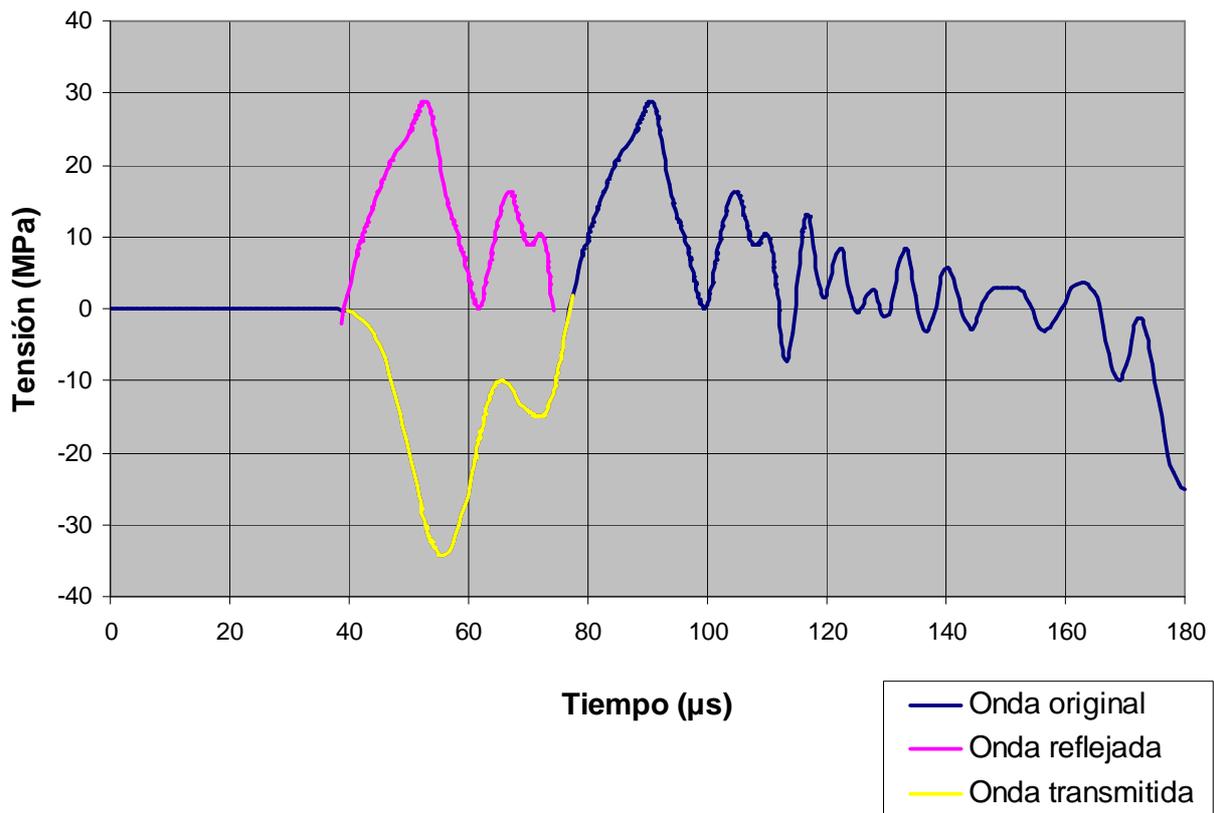


Figura 0.85 Tensión-Tiempo

Como puede observarse en la Figura 0.85, 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 $36\mu\text{s}$ ya que las ondas se anulan entre sí. Sucede lo mismo con la magnitud de la onda reflejada, el máximo se ha visto reducido de 34MPa a $29,7\text{MPa}$.

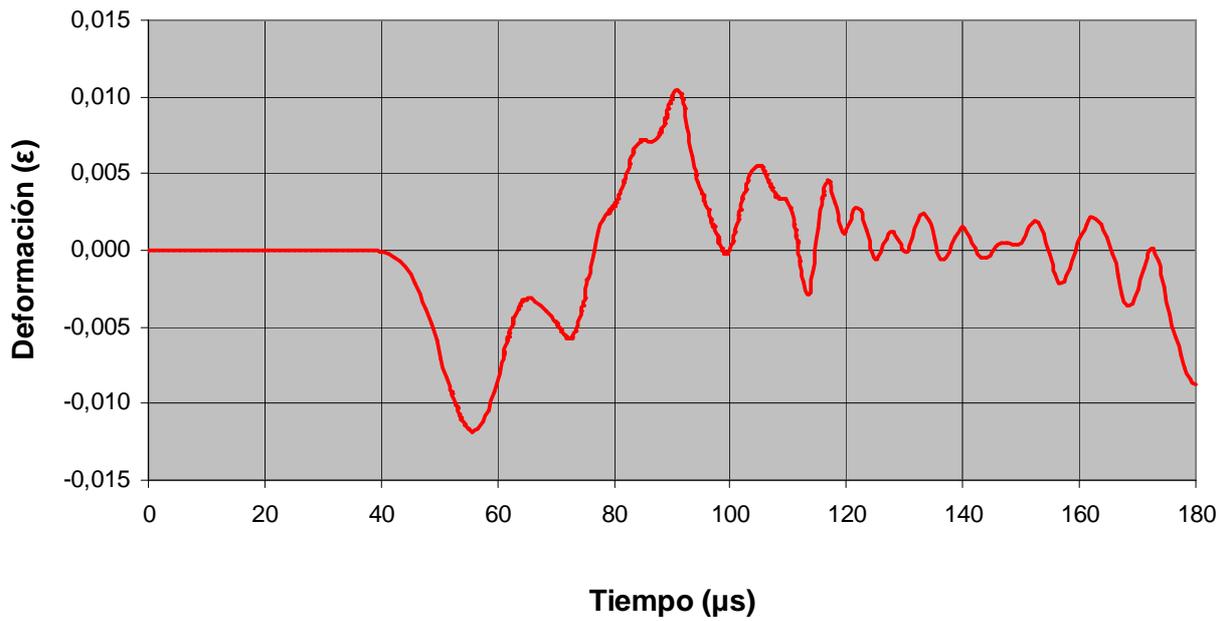


Figura 0.86 Deformación-Tiempo

También pueden comprobarse las consecuencias del cruce de ondas en esta gráfica, donde el valor de la deformación se ha visto reducido de $0,0116\epsilon$ a $0,01\epsilon$.

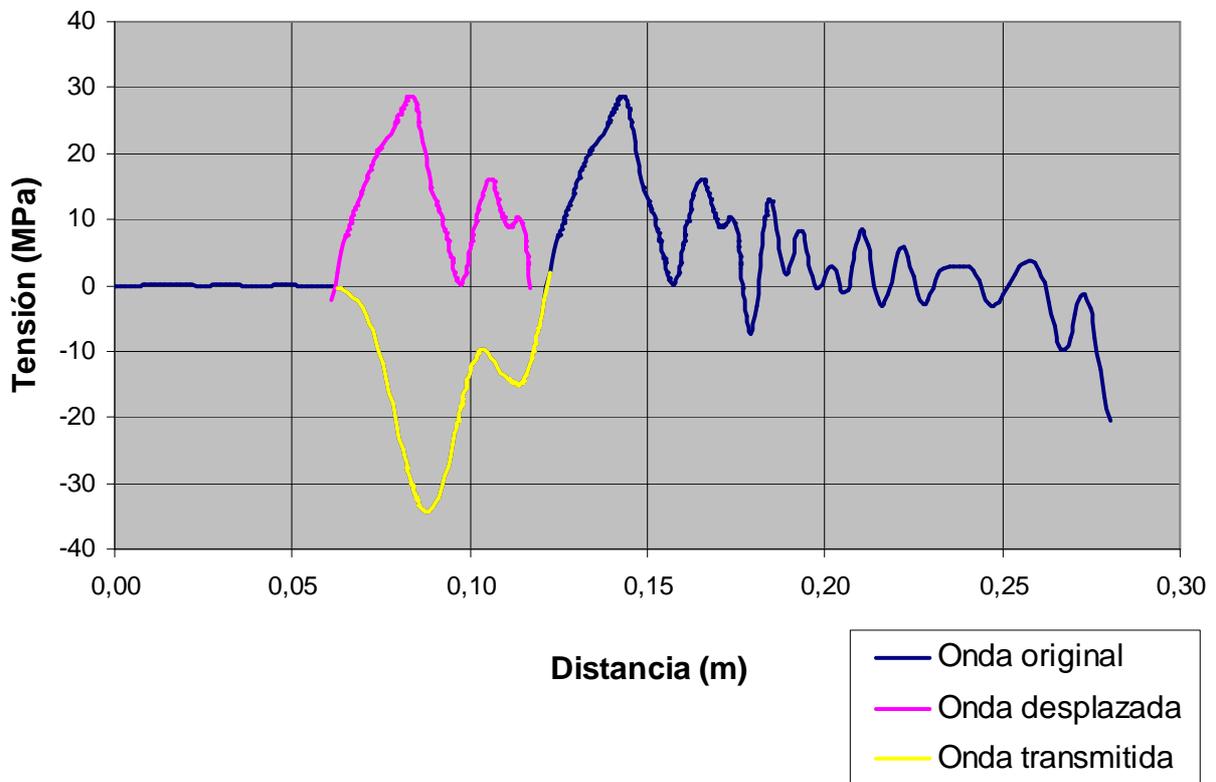


Figura 0.87 Tensión-Distancia

Al hacer la superposición de la onda reflejada sobre la transmitida se puede comprobar como 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.

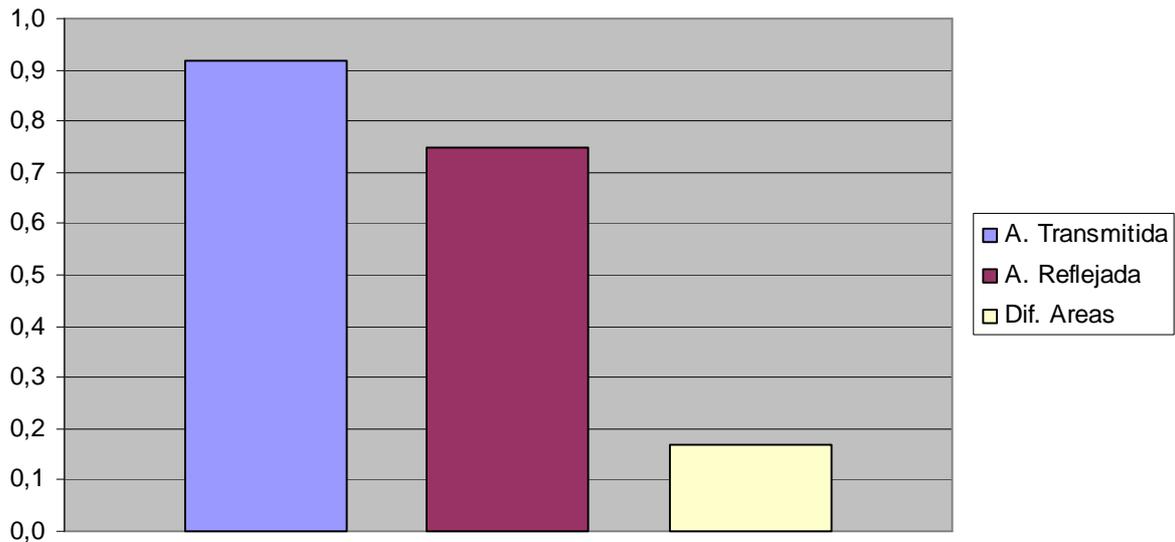


Figura 0.88 Diferencia de áreas

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 espera tras la visualización de la Figura 0.87, la diferencia entre ondas es mayor del 10%, por lo que no se pueden considerar iguales.

5. Plano 55% (límite)

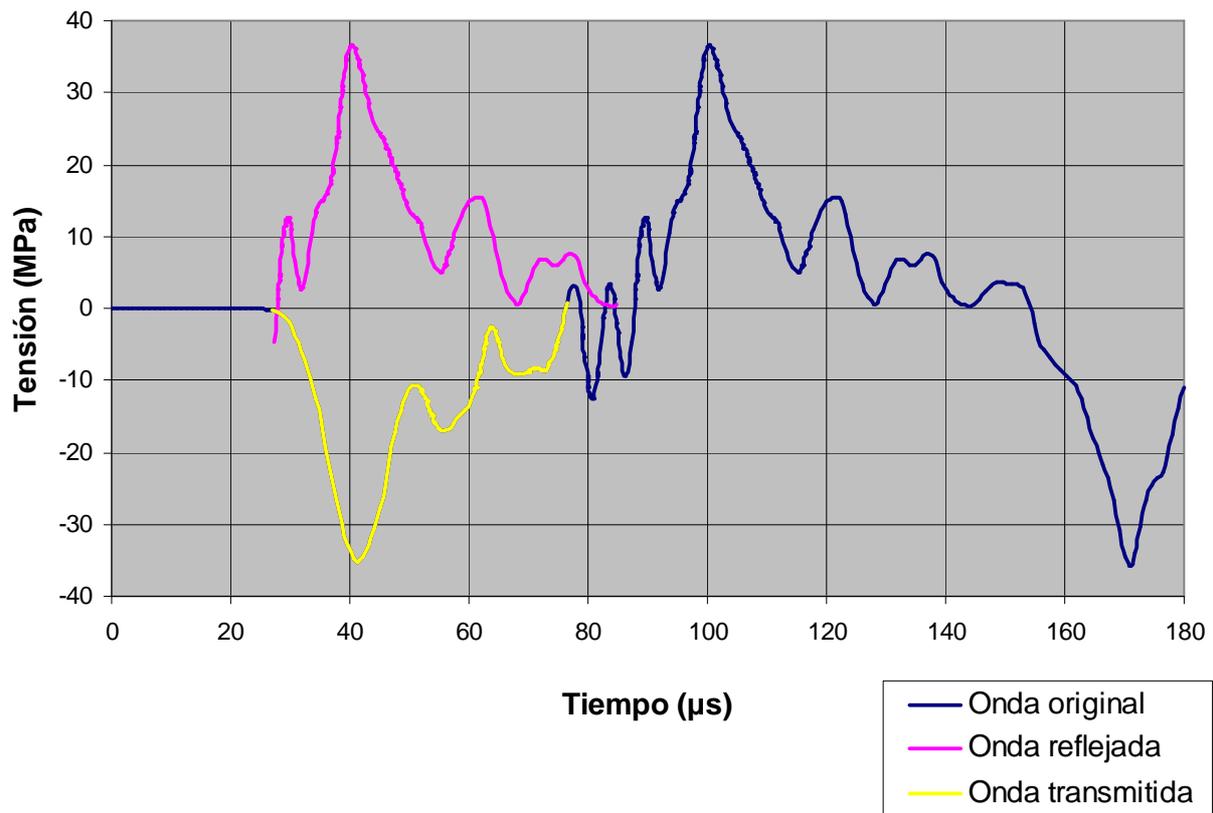


Figura 0.89 Tensión-Tiempo

En la Figura 0.89 se puede observar como el cruce de ondas está a punto de producirse, por ello éste es el plano límite a partir del cual no se podría colocar la galga extensométrica ya que, al anularse las ondas entre sí, los resultados obtenidos estarían falseados. Este hecho puede comprobarse en el análisis del plano 75%, donde la magnitud y longitud de la onda reflejada se han visto modificadas.

En este caso, la magnitud de la tensión σ_{11} 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.

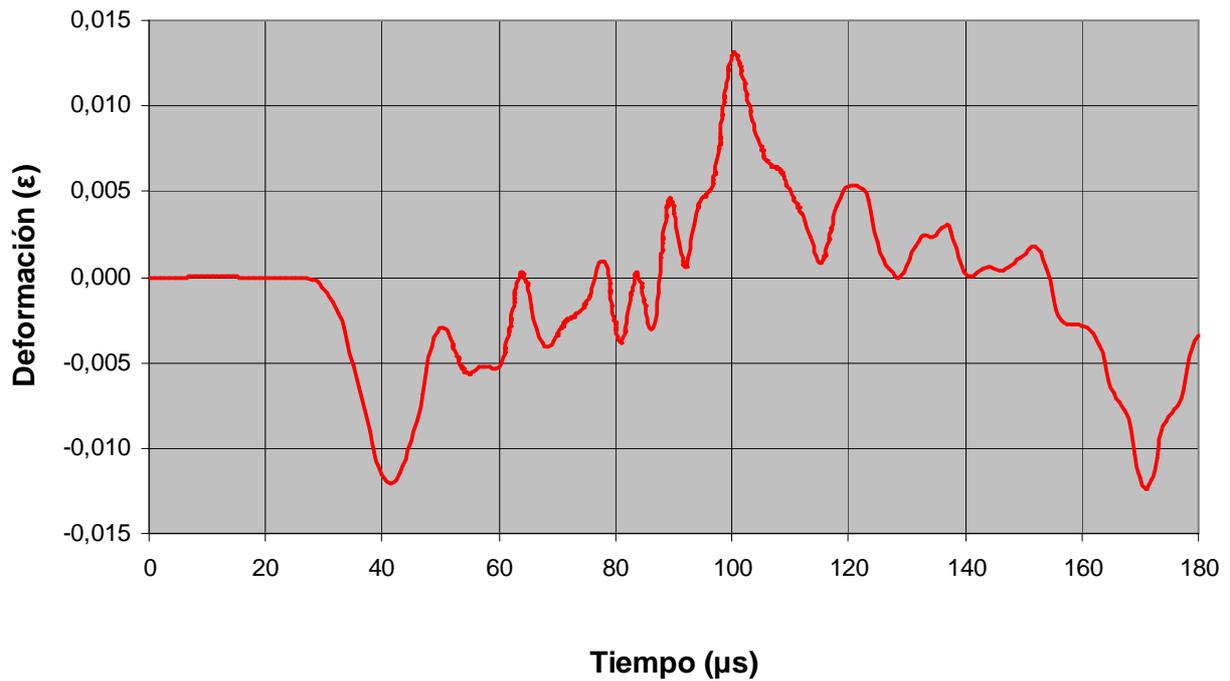


Figura 0.90 Deformación-Tiempo

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

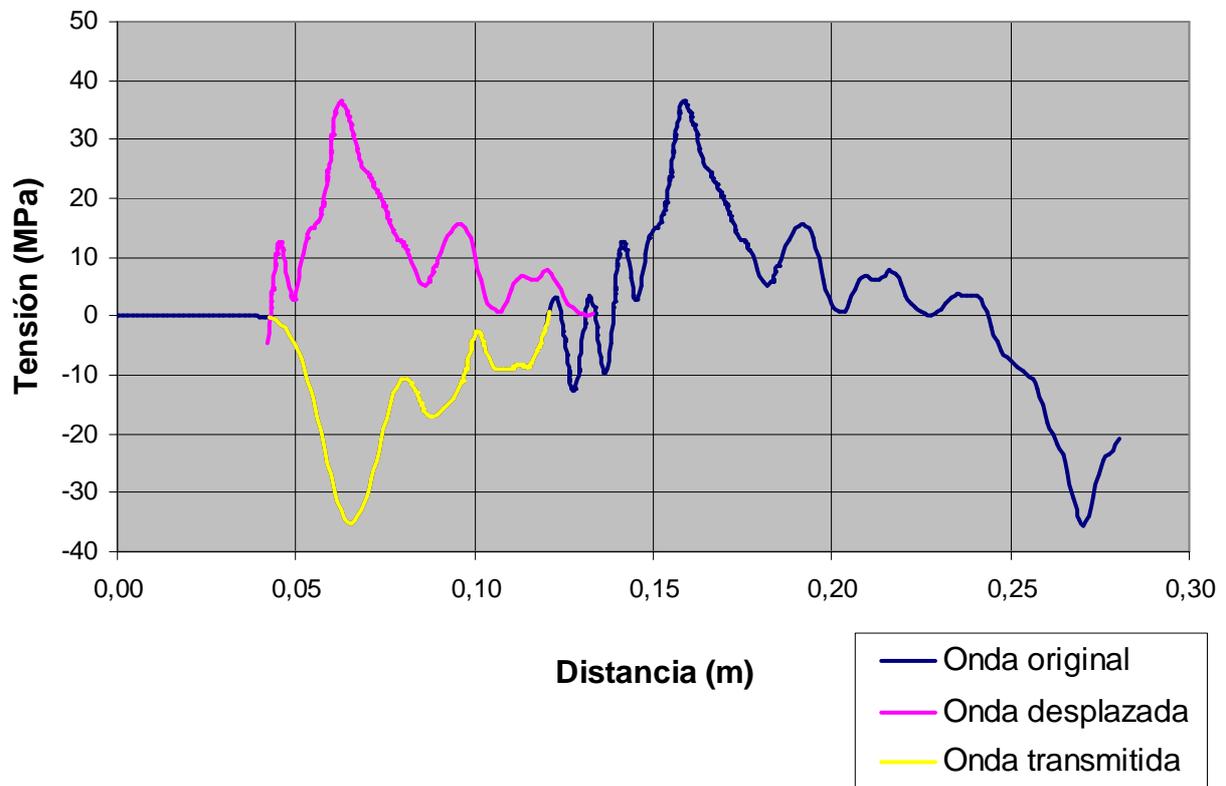


Figura 0.91 Tensión-Distancia

En la Figura 0.91, 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.

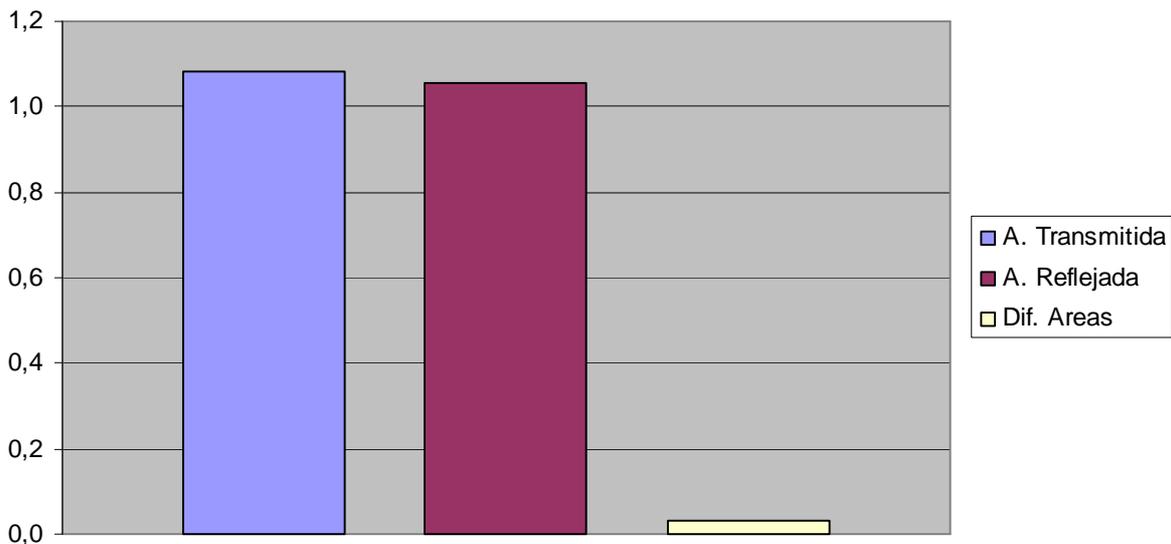


Figura 0.92 Diferencia de áreas

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 posteriores a este plano sean menores que las anteriores al mismo y, por ello, puede detectarse cuando se ha producido el cruce de ondas.

1.3.4 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:

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

1. Plano de choque

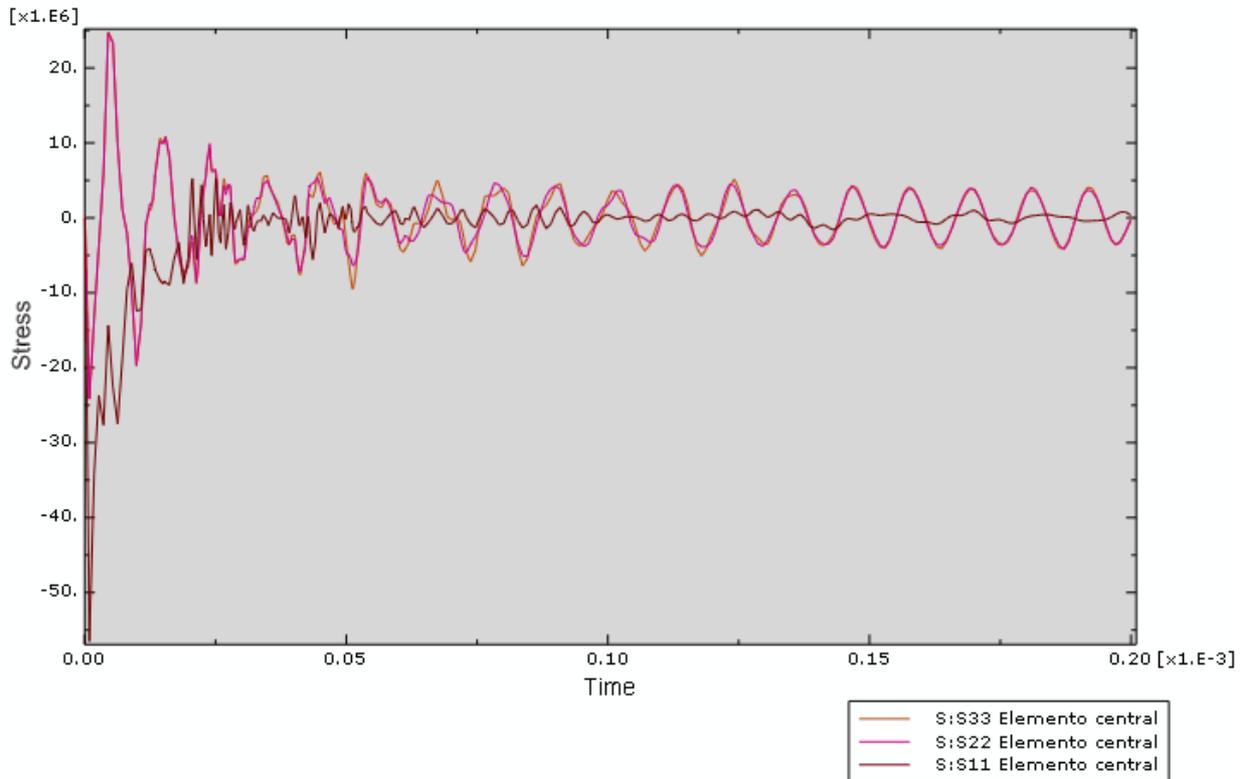


Figura 0.93 Tensiones producidas por el impacto en el plano de choque

Como puede observarse en la Figura 0.93, en este caso sucede lo mismo que en 1.3.1, 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. Este hecho hace prever que el ensayo no será válido ya que la influencia de estas tensiones invalidará la hipótesis de propagación unidimensional.

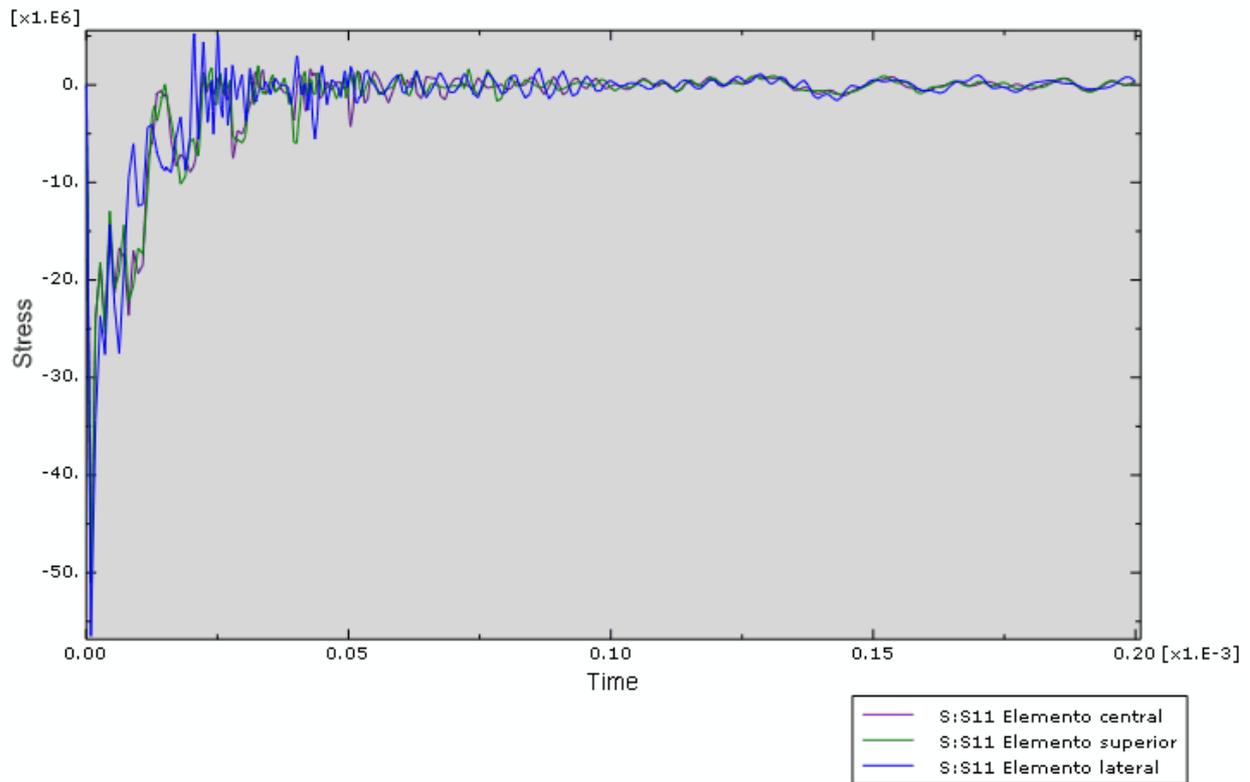


Figura 0.94 Comparación de la tensión σ_{11} en los diferentes elementos del plano de choque

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, como puede verse en la Figura 0.94.

1.4 Imperfecciones: choque oblicuo

En este capítulo se analizará la importancia que supone que el flyer impacte sobre la probeta con cierto ángulo (ver Figura 0.95), 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 en el **¡Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** ya que si el impacto es oblicuo, es imposible que se cumplan.

Las simulaciones se han realizado sobre probetas de sección cilíndrica de $\varnothing 10 \times 100 \text{mm}$ ya que, como se ha mencionado en el apartado 1.2, se ha demostrado que son las probetas para aptas para la realización del ensayo. Esto

es una ventaja añadida, ya que al ser simétricas, la variación será la misma tanto si el flyer rota sobre su eje vertical como si lo hace sobre el horizontal.

En cuanto al flyer, se ha utilizado un flyer de acero de $\varnothing 10 \times 5 \text{ mm}$, es decir, se va a partir del modelo que ha resultado ser válido para llevarlo al laboratorio.

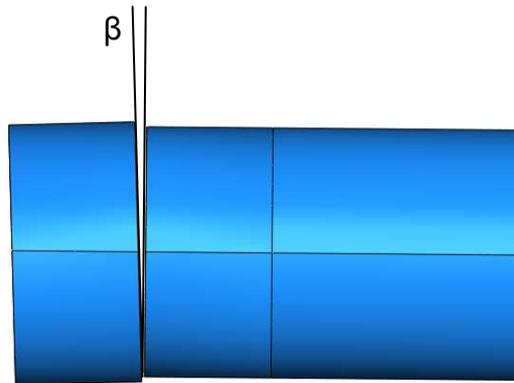


Figura 0.95 Ángulo entre caras en el momento del impacto

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 van a comparar en la misma gráfica:

- 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.

1.4.1 Desalineamiento probeta-flyer de 1º

1. Plano de choque

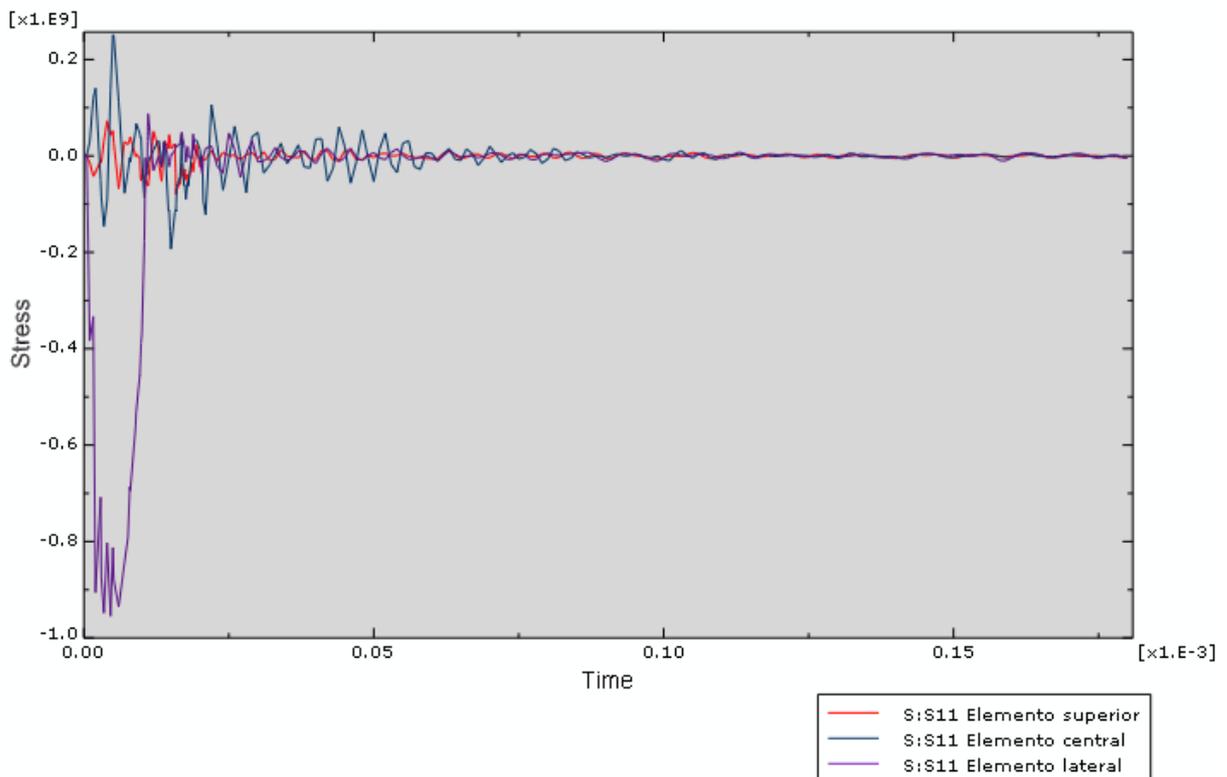


Figura 0.96 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Como se puede observar en la Figura 0.96 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:

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

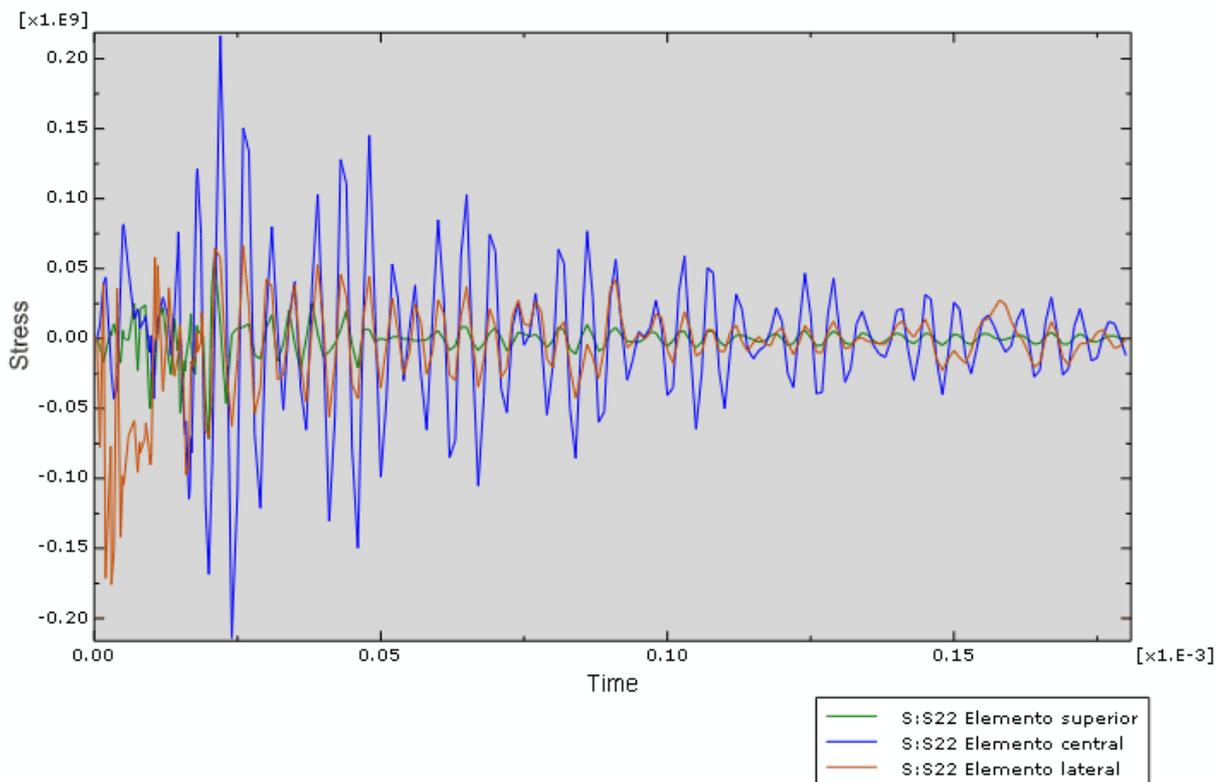


Figura 0.97 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

La Figura 0.97 muestra las tensiones σ_{22} de los elementos, como se puede observar, existe un pico inicial de tensión $\sigma_{22}=80MPa$ en el elemento lateral coincidente con el pico de $\sigma_{11}=815MPa$ debido a que el impacto oblicuo introduce directamente tensiones en estas dos direcciones.

Como era de esperar, debido a al impacto oblicuo, esta tensión es bastante elevada en todos los elementos, más en el elemento central que en el superior ya que está alineado con el lateral. En el elemento superior esta tensión es muy inferior a la de los otros elementos debido a que es el elemento más alejado de la línea de transmisión de esfuerzos.

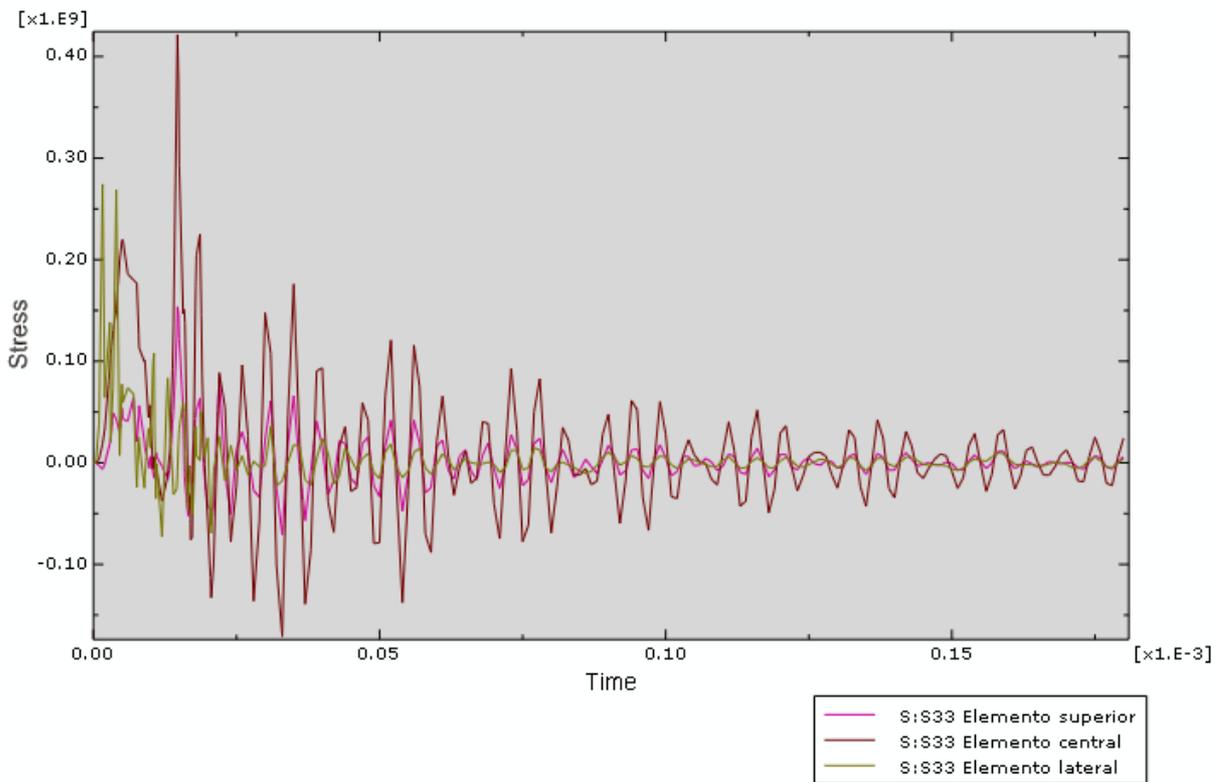


Figura 0.98 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 0.98 muestra una tensión σ_{33} bastante elevada ya que, si la tensión σ_{11} lo es, 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 debido a que es el que recibe el impacto.

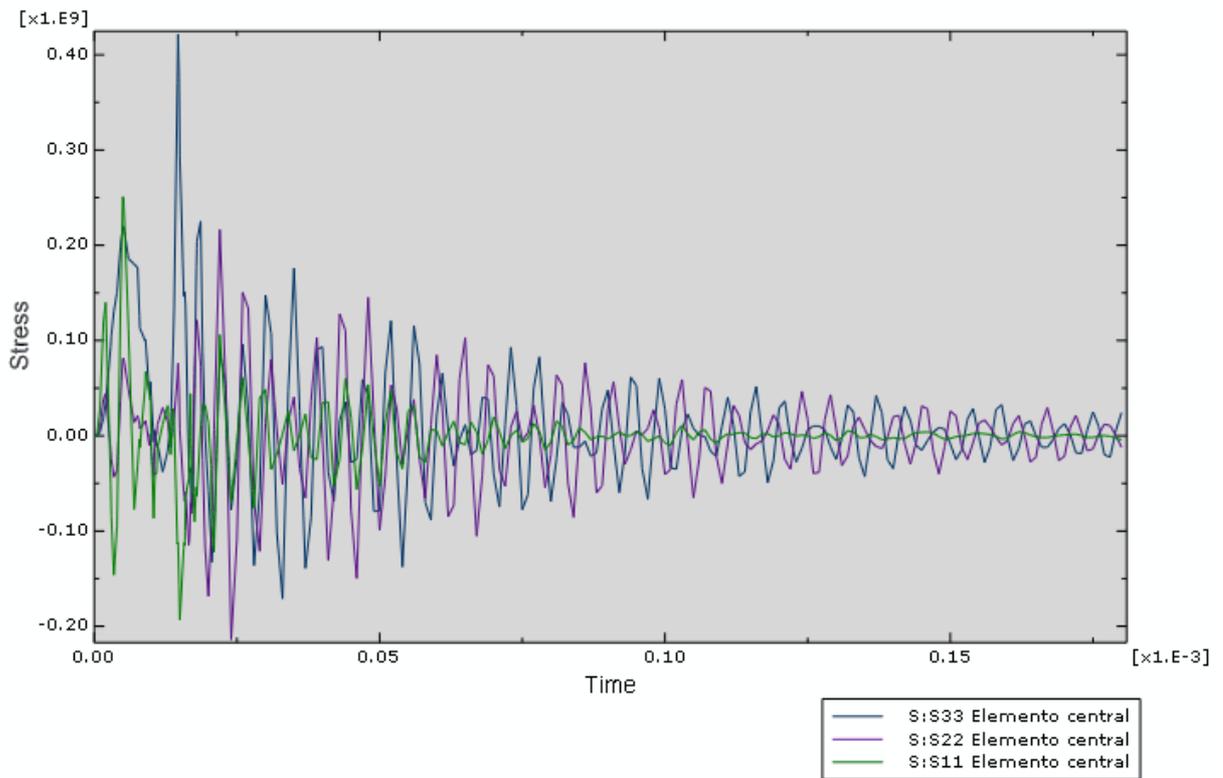


Figura 0.99 Tensiones del elemento central

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%

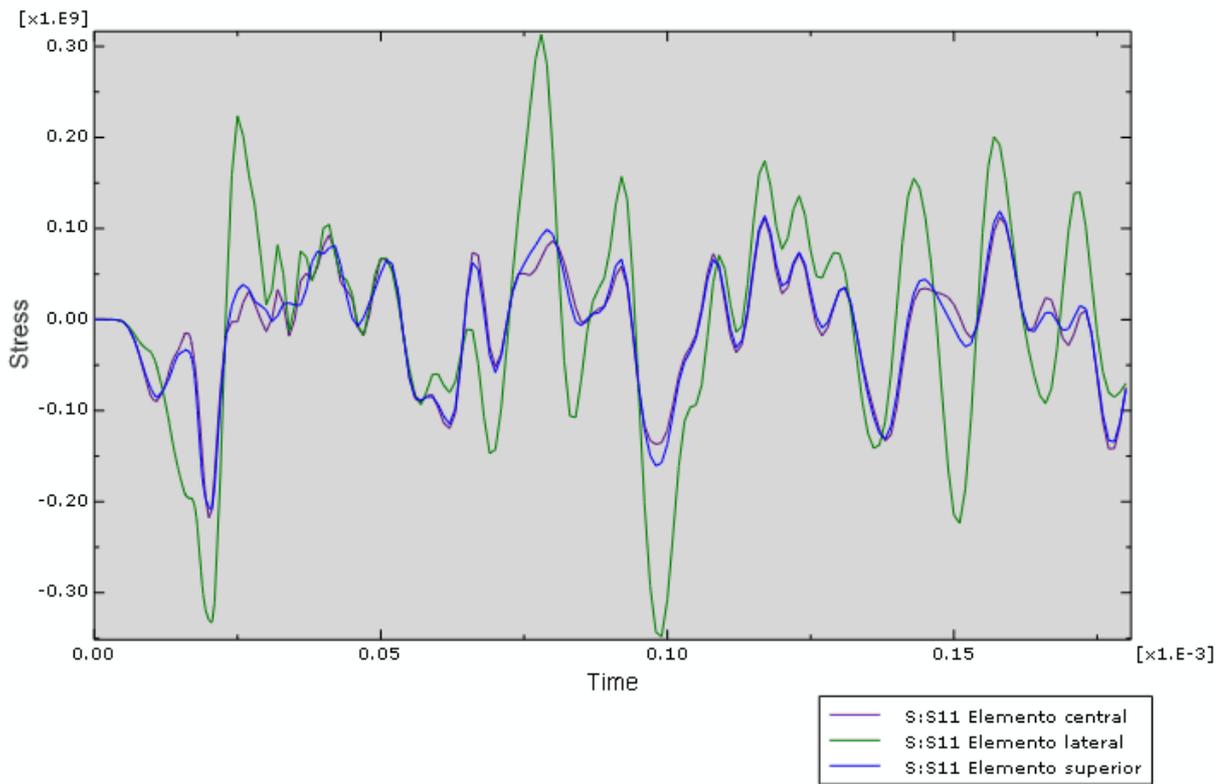


Figura 0.100 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 0.100 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.

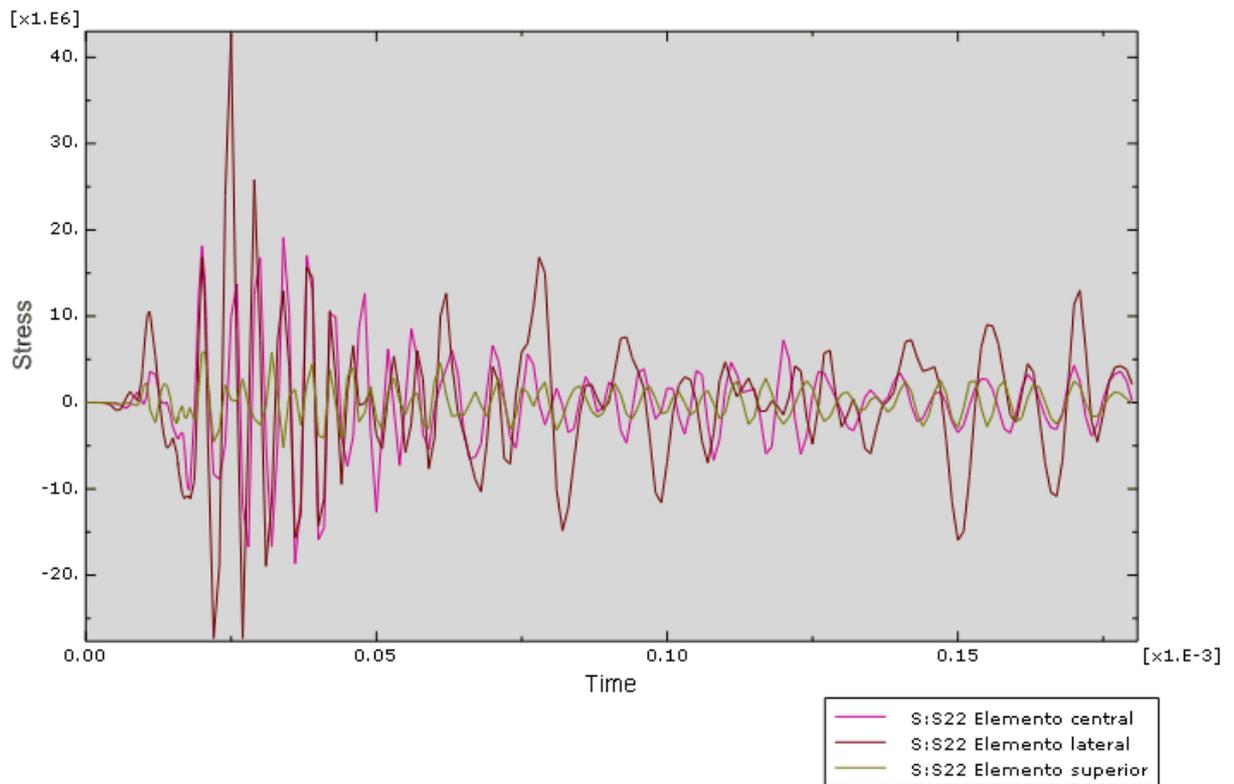


Figura 0.101 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

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, 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 ya que es el que recibe el impacto.

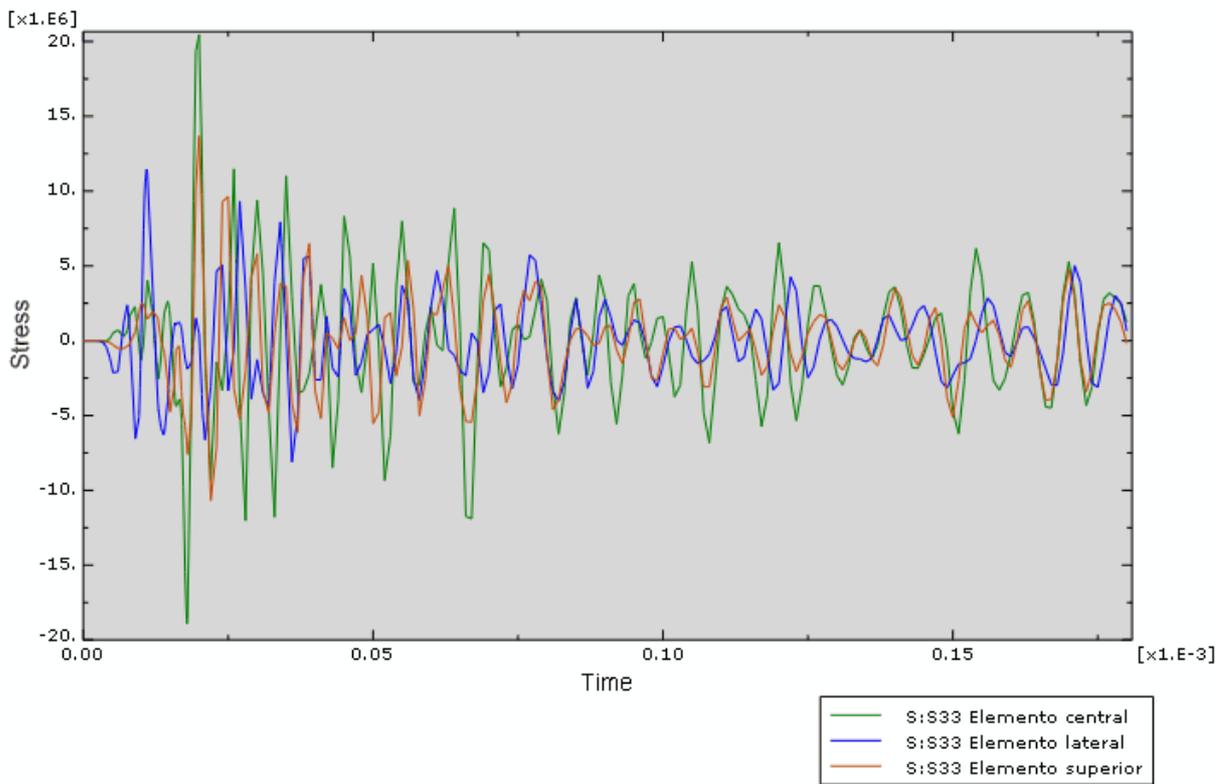


Figura 0.102 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Como se puede ver en la Figura 0.102, 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 el efecto Poisson de la tensión σ_{11} , por ello tendrá un valor menor que σ_{22} pero mayor que en los casos de impacto plano, ya que σ_{11} era menor.

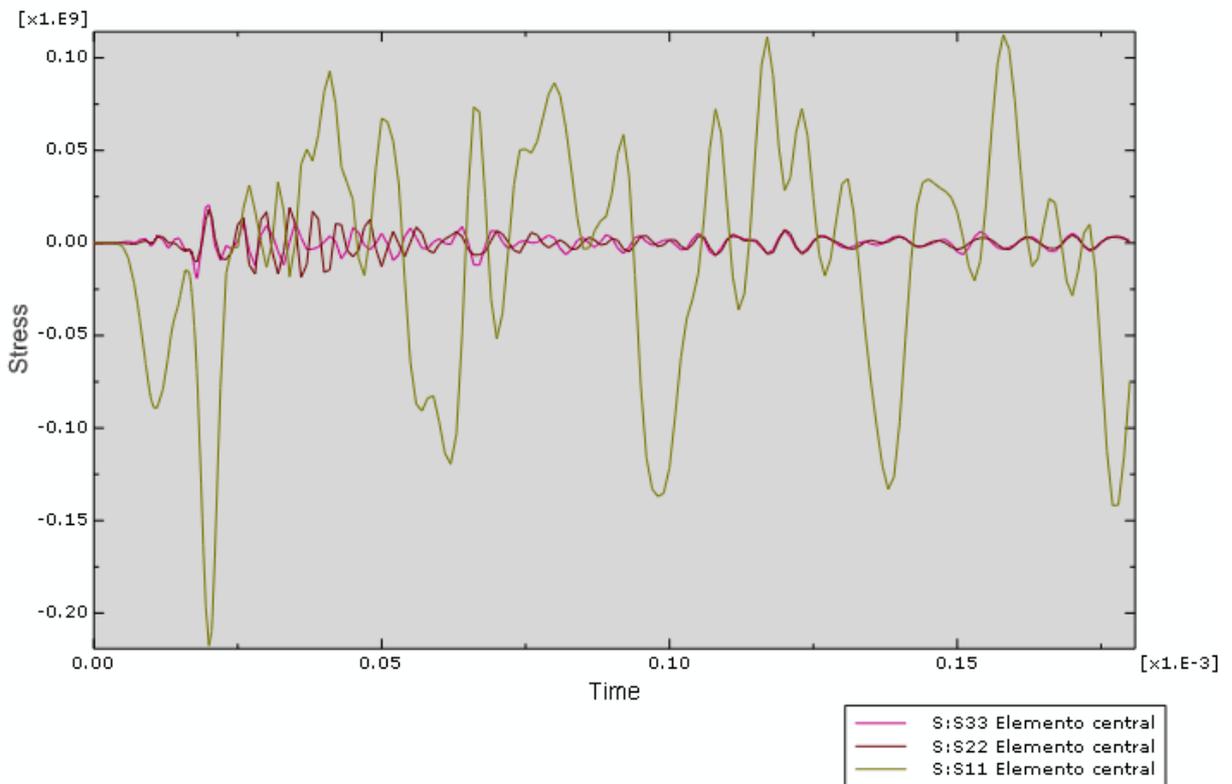


Figura 0.103 Tensiones del elemento central

Al observar las tensiones que se producen en el elemento central en este plano y compararlas con las del anterior, 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 de σ_{11} es del orden de 100MPa, por lo que en este caso sí estaría justificado despreciar la existencia de dichas tensiones.

3. Plano 50%

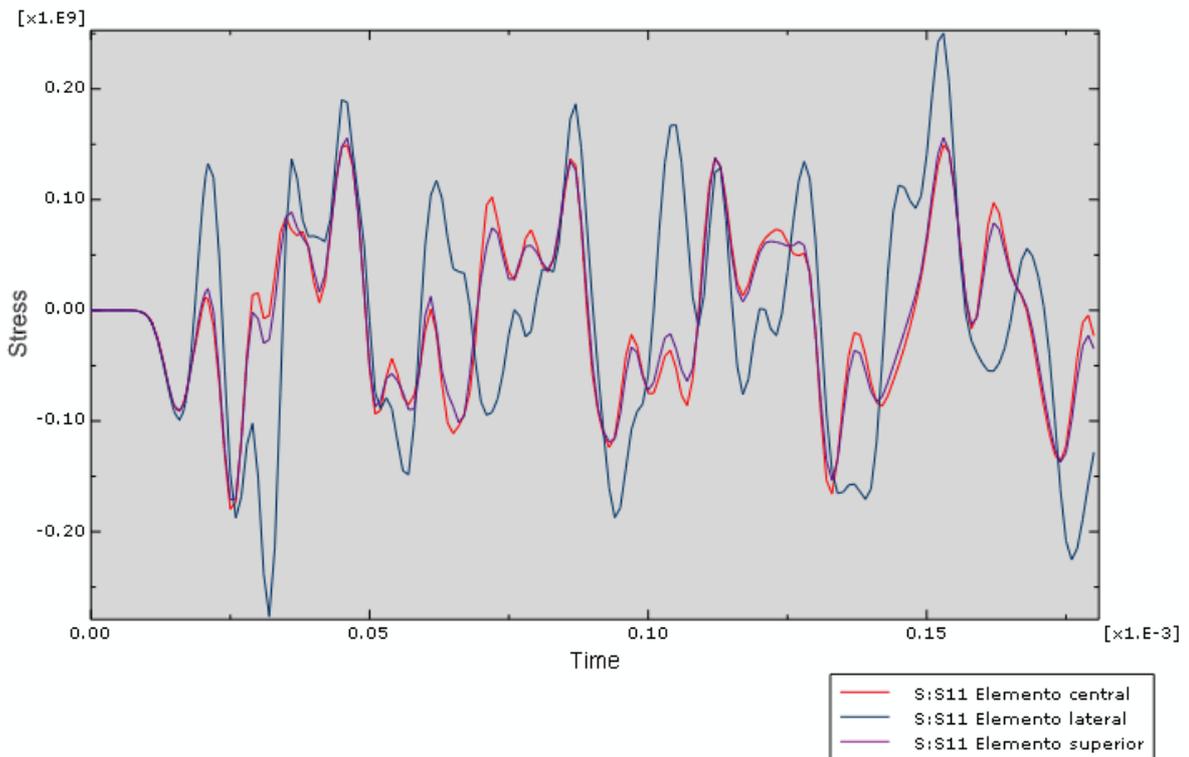


Figura 0.104 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Como sucede en los planos anteriores y se puede observar en la gráfica, 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.

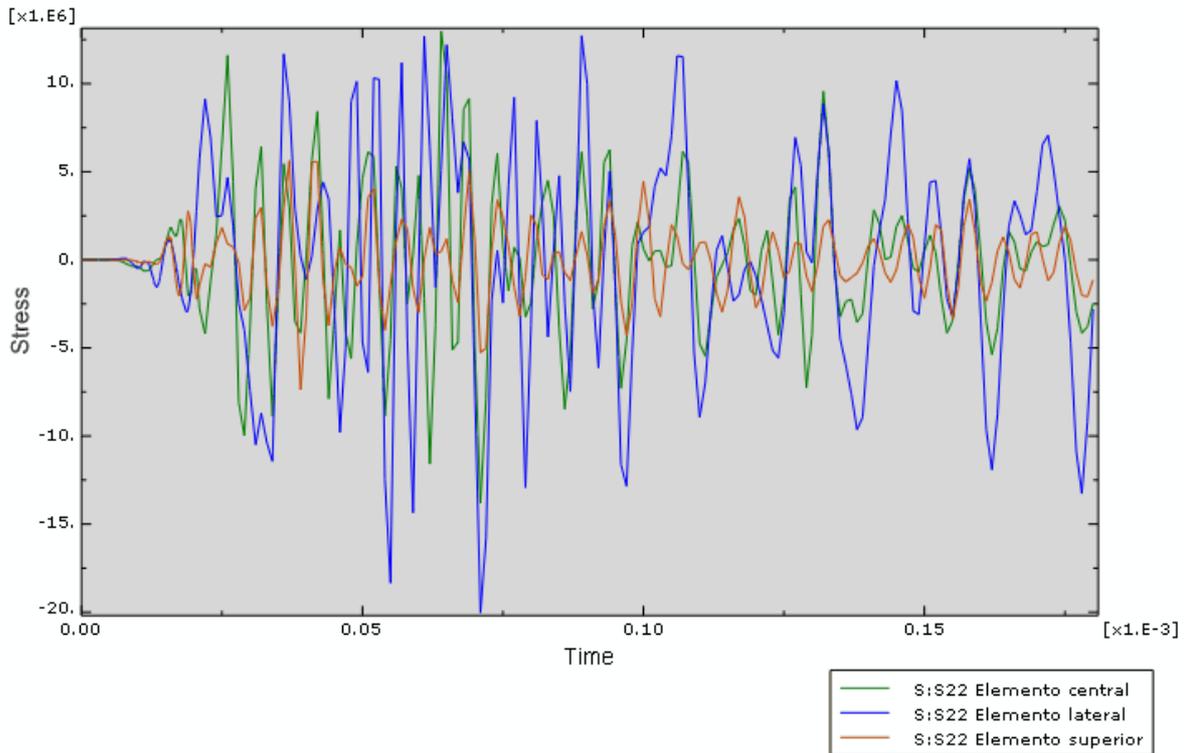


Figura 0.105 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

En la Figura 0.105 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. 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 10MPa aproximadamente para los elementos central y lateral, y de 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.

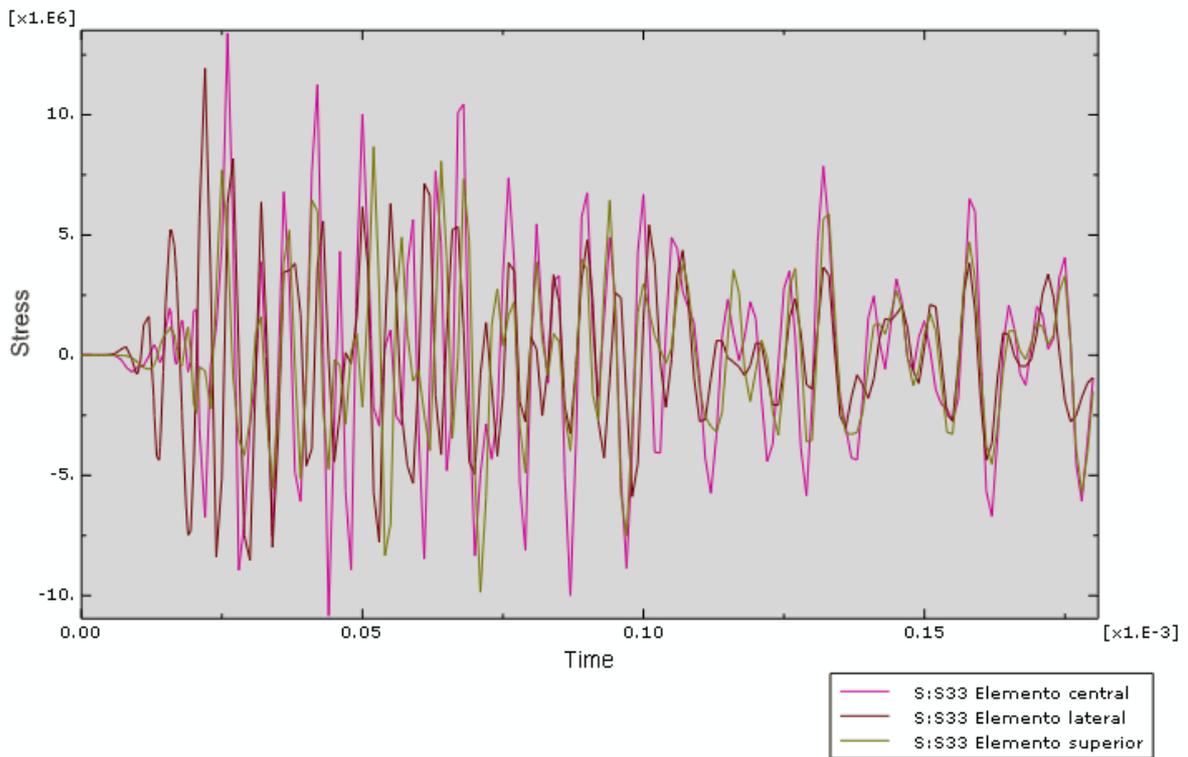


Figura 0.106 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 0.106 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} .

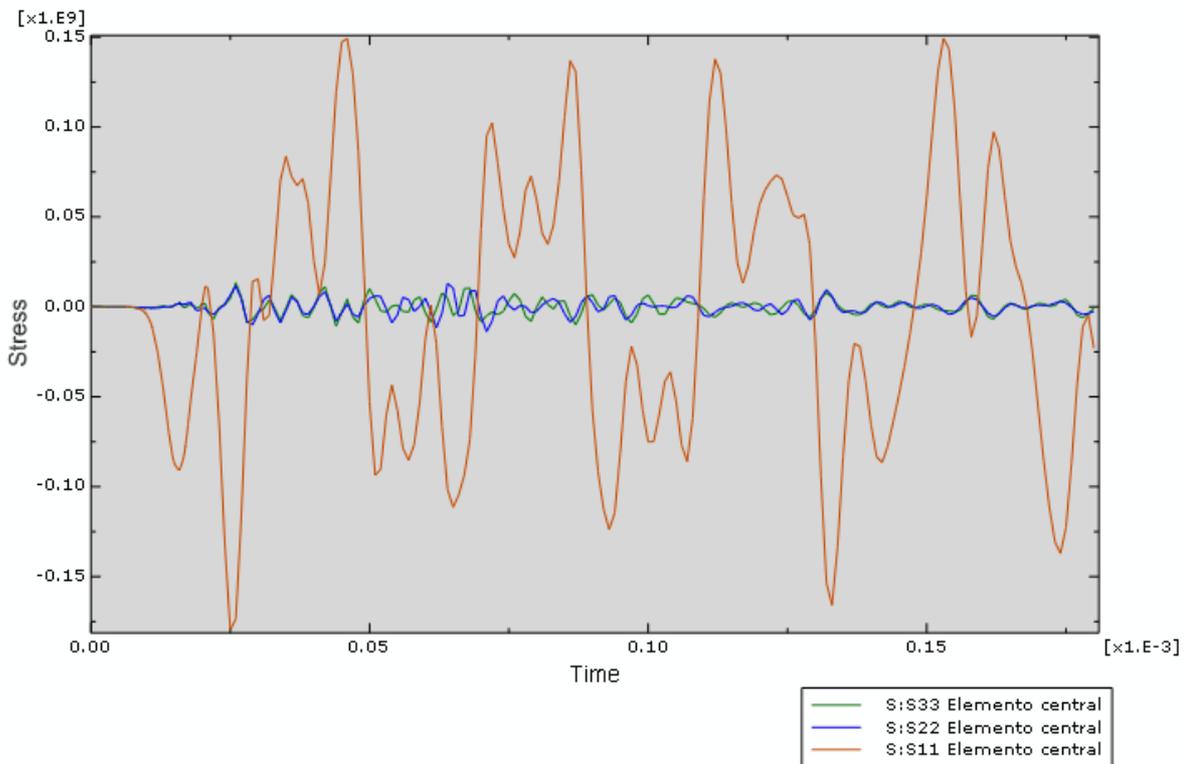


Figura 0.107 Tensiones del elemento central

Al comparar las tensiones del elemento central se observa como, 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%

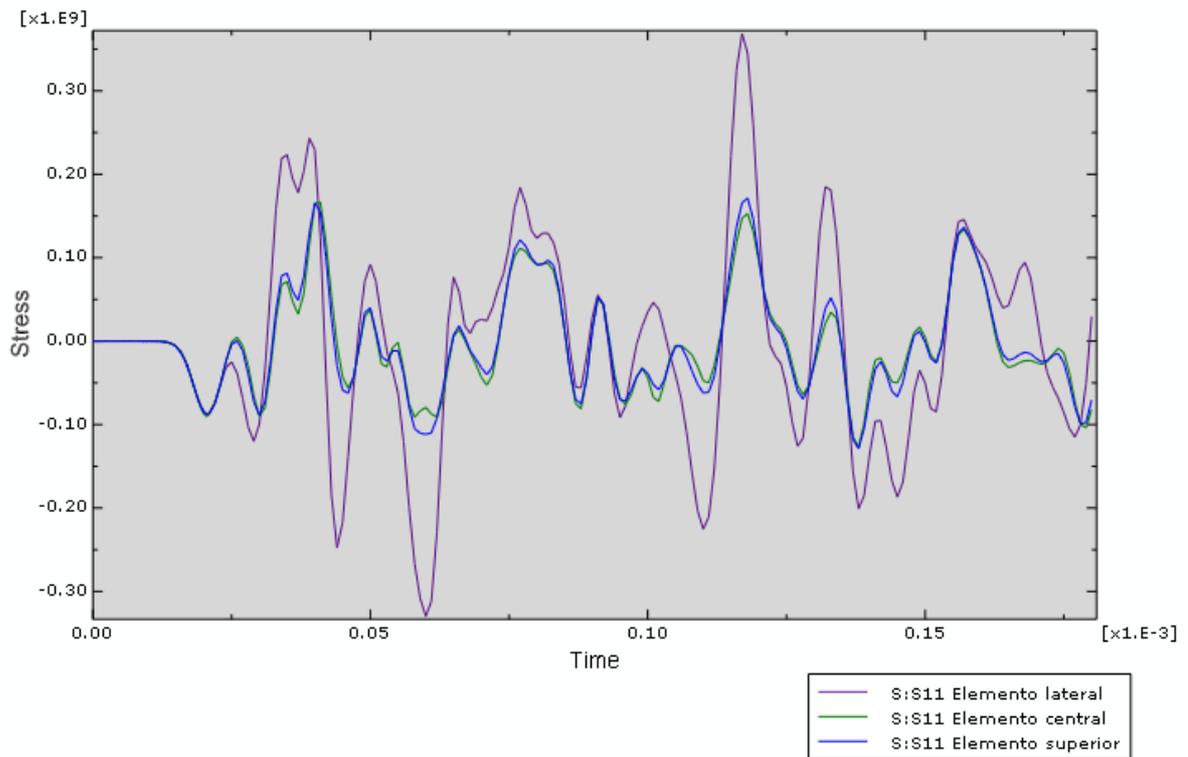


Figura 0.108 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

A diferencia del caso de impacto plano, con el impacto oblicuo se producen gráficas con tantas perturbaciones que no puede identificarse con claridad en qué momento se produce el cruce de ondas.

La Figura 0.108 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.

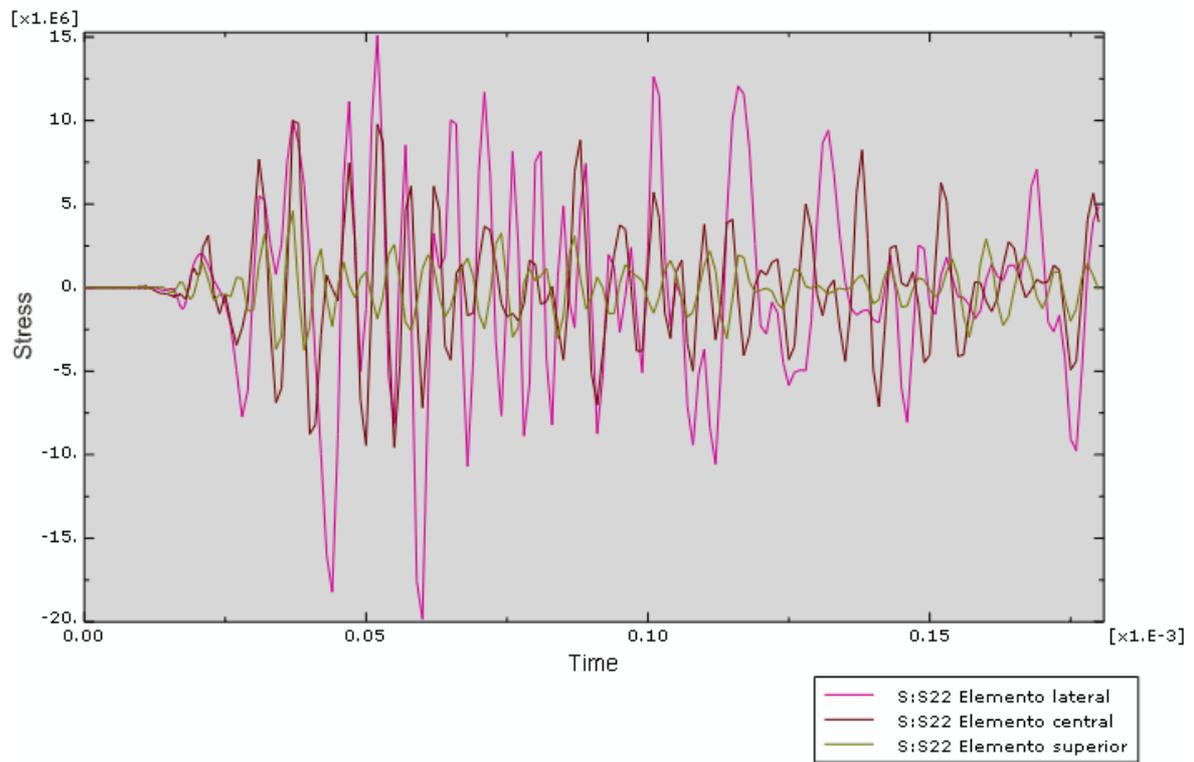


Figura 0.109 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

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.

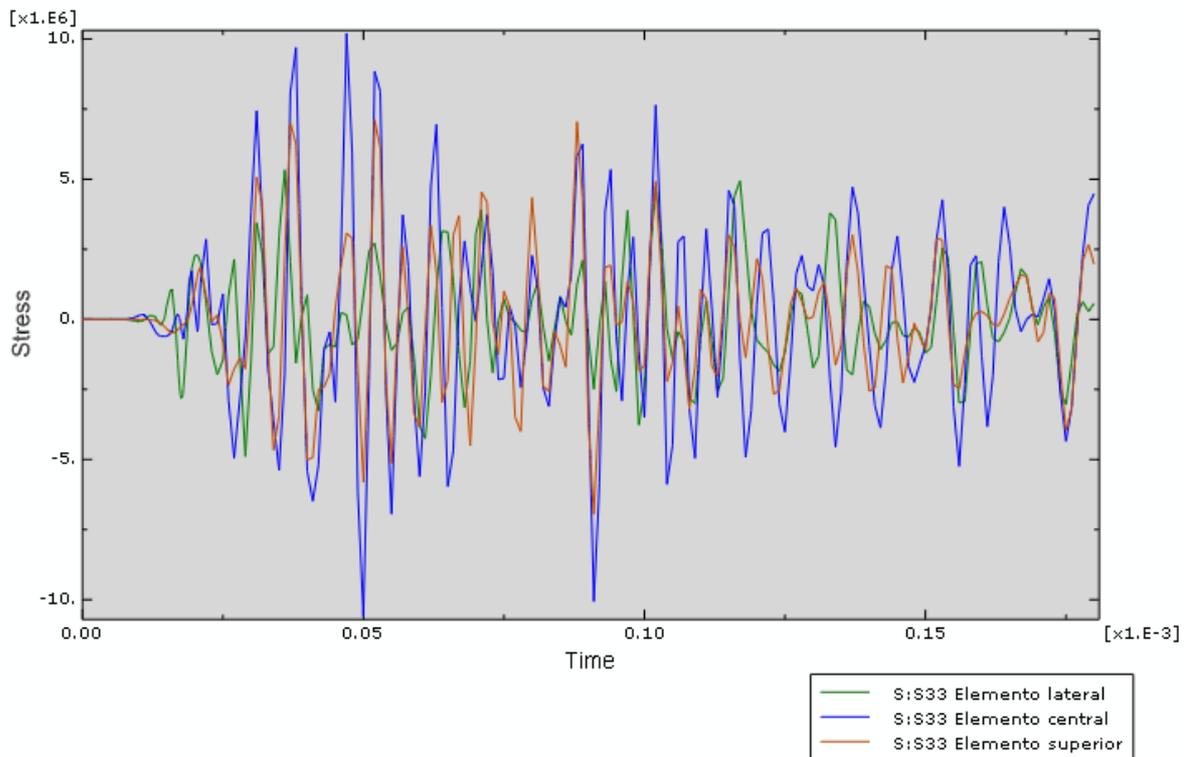


Figura 0.110 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

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.

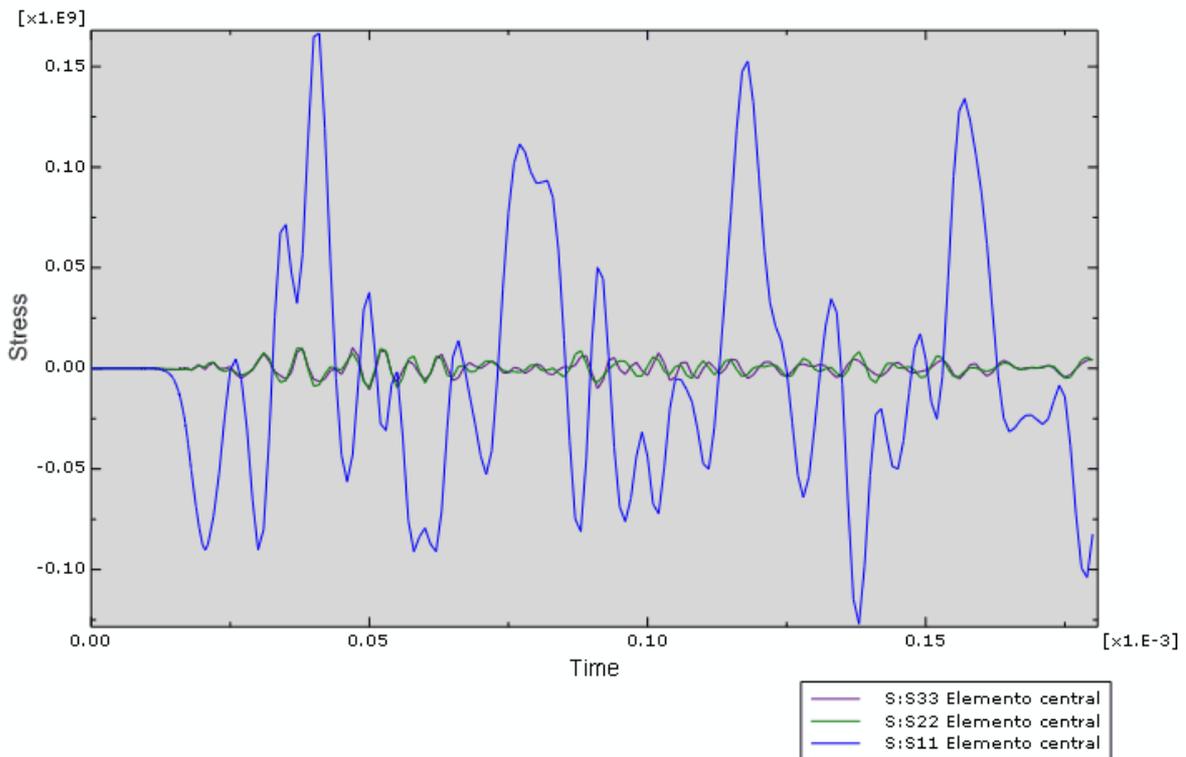


Figura 0.111 Tensiones del elemento central

La Figura 0.111 muestra con claridad como las tensiones σ_{22} y σ_{33} son insignificantes frente a la tensión σ_{11} . Además, en esta gráfica, sí puede observarse que se ha producido el cruce de ondas ya que tanto la magnitud como la longitud y el número de picos de tensión es menor que en los otros planos.

1.4.2 Desalineamiento probeta-flyer de 2°

1. Plano de choque

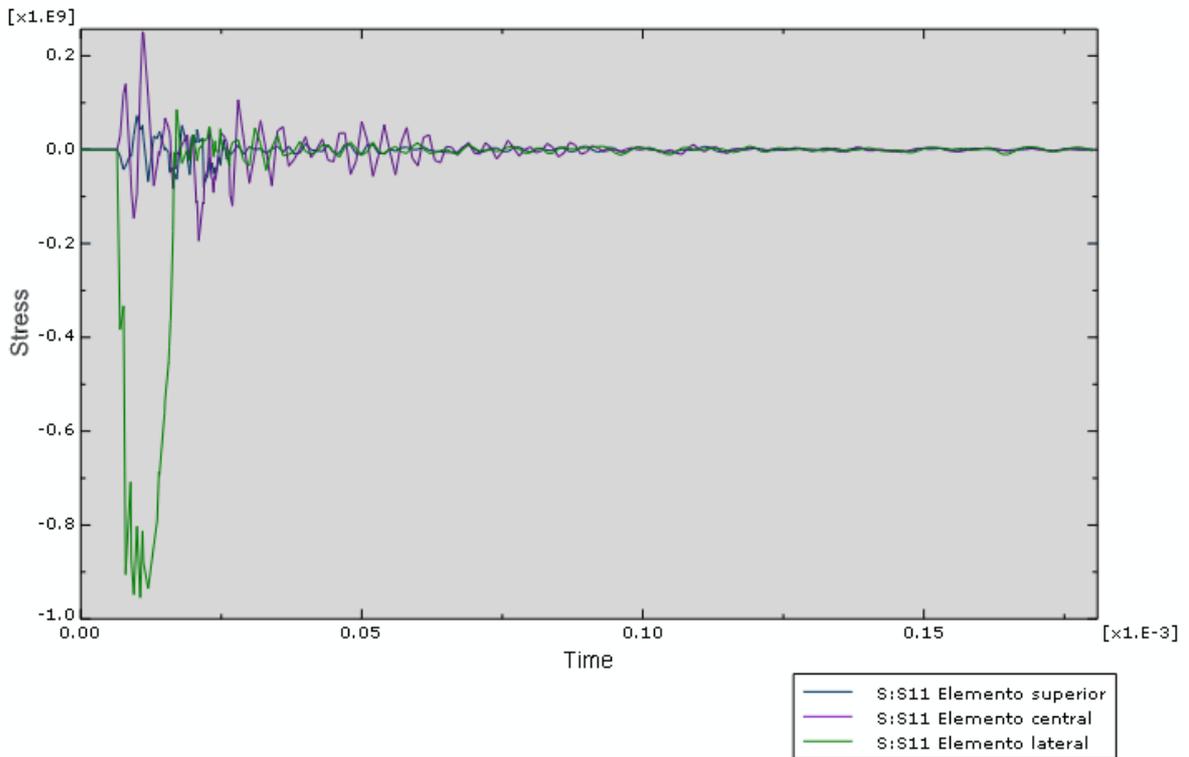


Figura 0.112 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 0.112 es idéntica a su homónima en el caso anterior (Figura 0.96) 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, una valor muy próximo al teórico de 809MPa cuando el impacto es puntual y no repartido sobre una superficie.

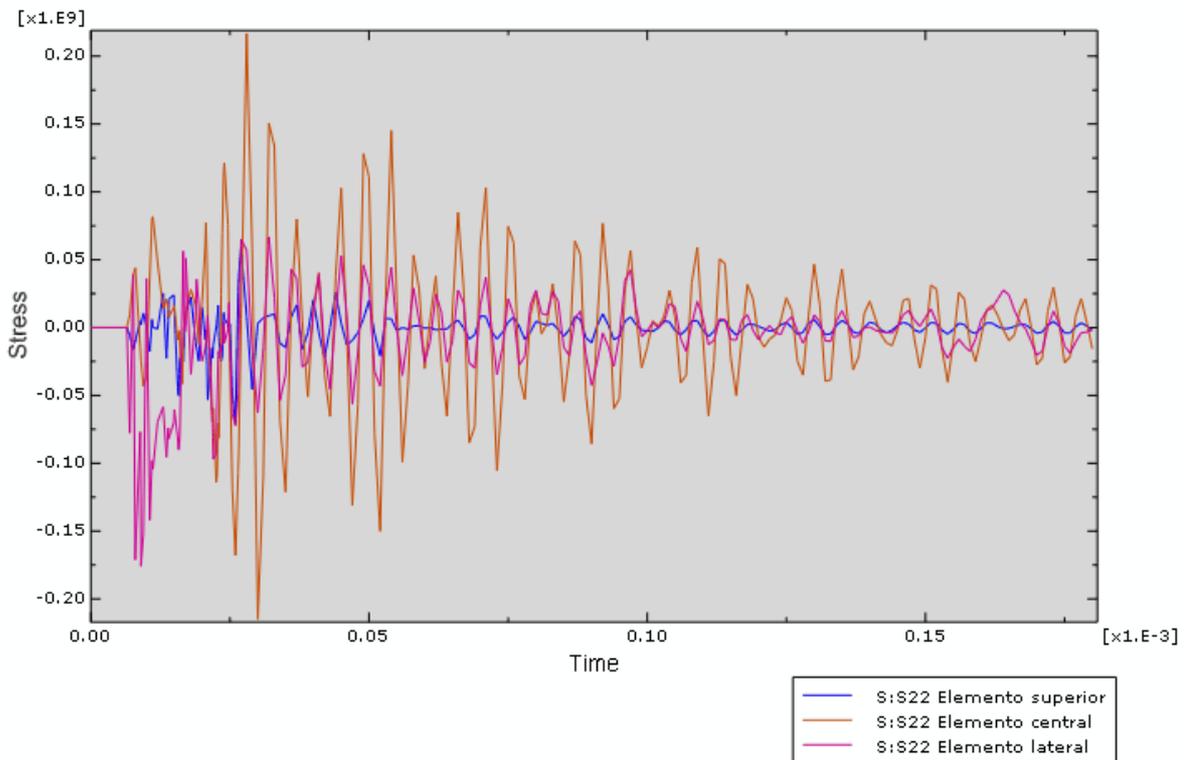


Figura 0.113 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Como se puede observar en la Figura 0.113, 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.

Al igual que con la tensión σ_{11} , la comparación de las tensiones σ_{22} en este plano resulta ser la misma que en el caso anterior ya que en este instante aún no influye el desalineamiento.

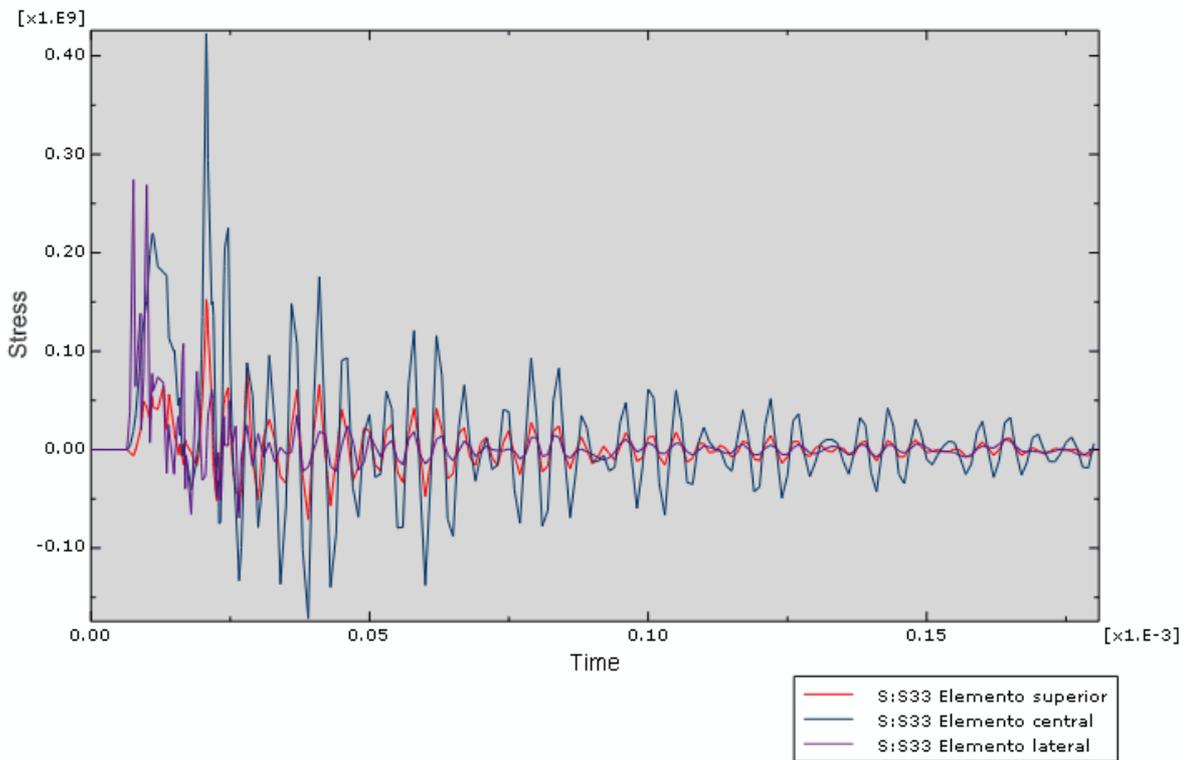


Figura 0.114 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

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.

Se puede observar que tanto la tensión σ_{22} como la σ_{33} del elemento central son oscilantes y tardan mucho más en disiparse, esto se debe a las perturbaciones introducidas por el impacto oblicuo en la dirección 22 que provoca una onda que va rebotando en las caras de la probeta a lo largo de toda su longitud provocando por efecto Poisson estos ciclos. Lógicamente el elemento más perjudicado por este efecto es el central ya que, a diferencia de los otros dos, no tiene ninguna cara libre.

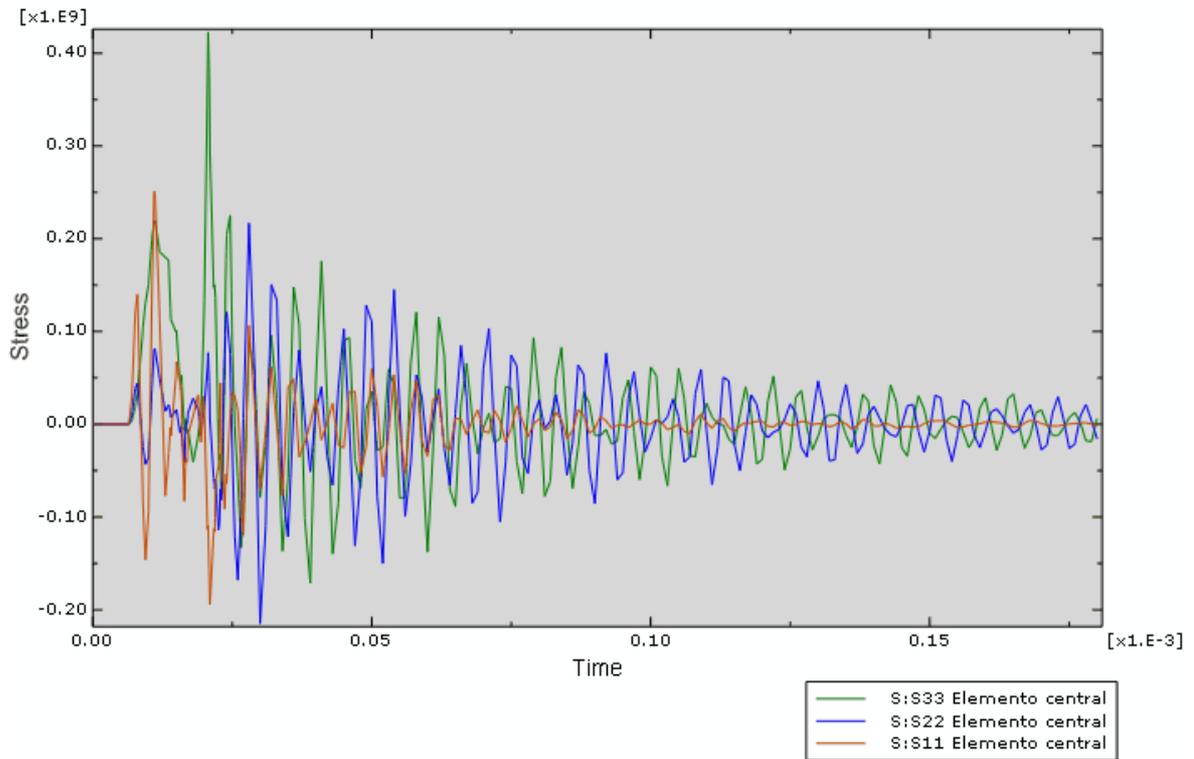


Figura 0.115 Tensiones del elemento central

La Figura 0.115 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 se ha comentado en el apartado “Conclusión” del caso anterior, 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%

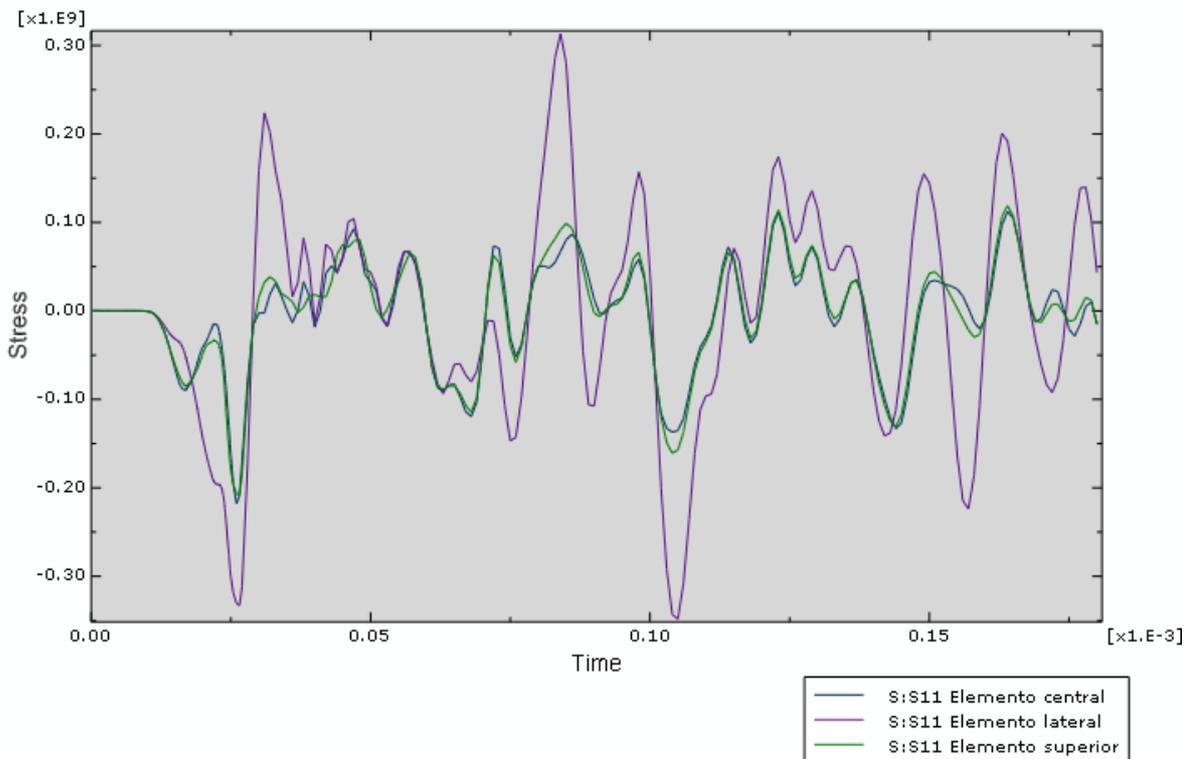


Figura 0.116 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Si se compara esta gráfica con su homónima del caso de desalineamiento de 1° se puede comprobar cómo 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 del flyer para salvar la interferencia 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 que es inferior a la que se da en el elemento lateral.

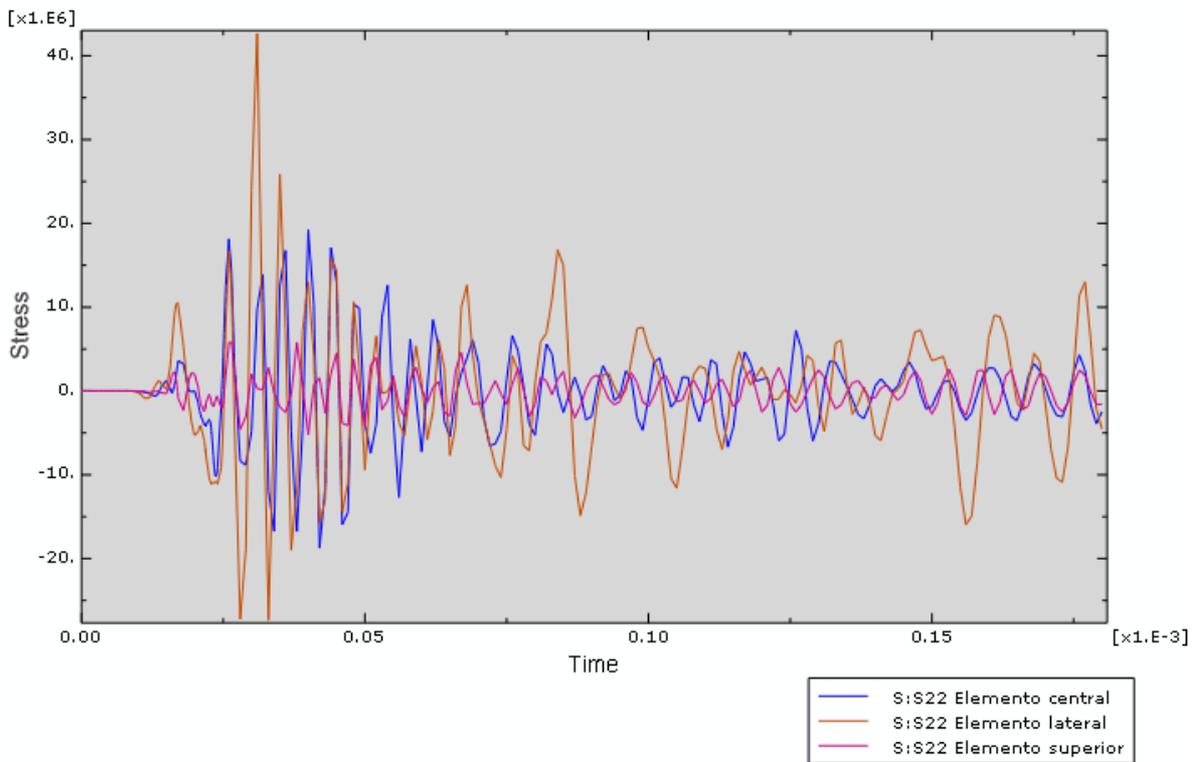


Figura 0.117 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

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.

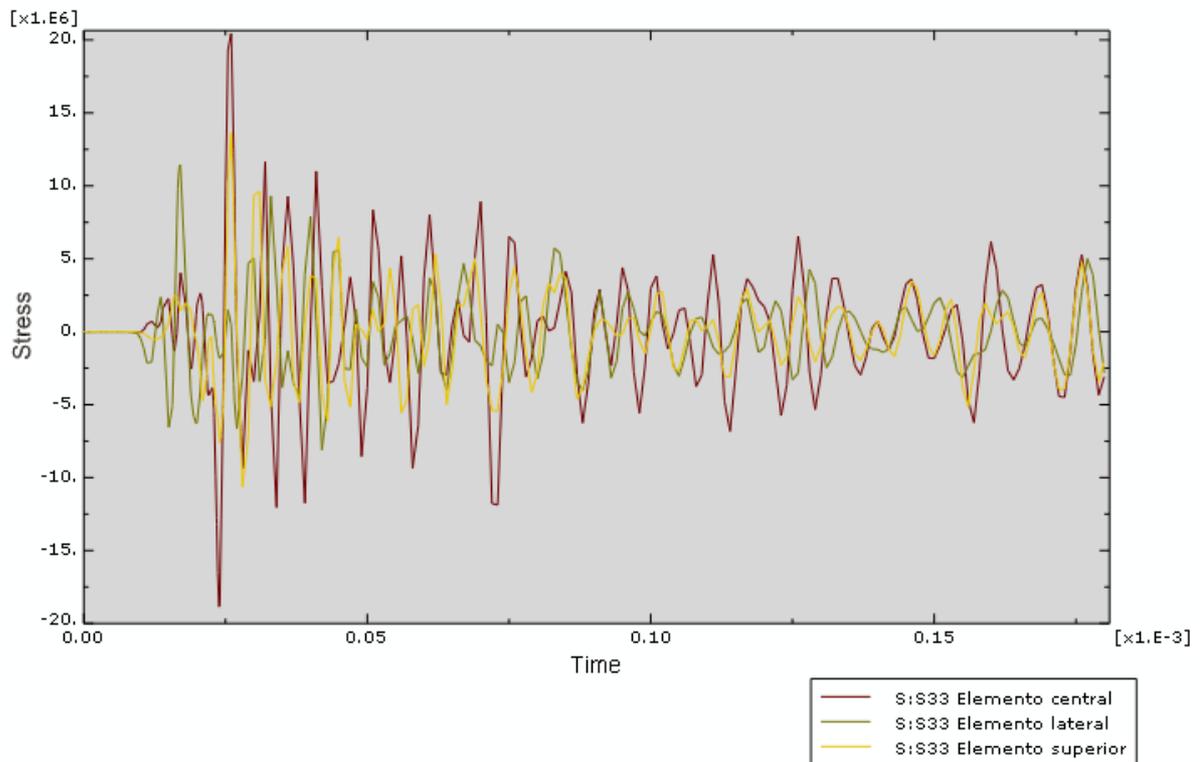


Figura 0.118 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

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 0.118, la máxima tensión σ_{33} es de aproximadamente 9MPa, un valor mayor que en su homónimo de impacto plano ya que la tensión σ_{11} en este caso también es mayor.

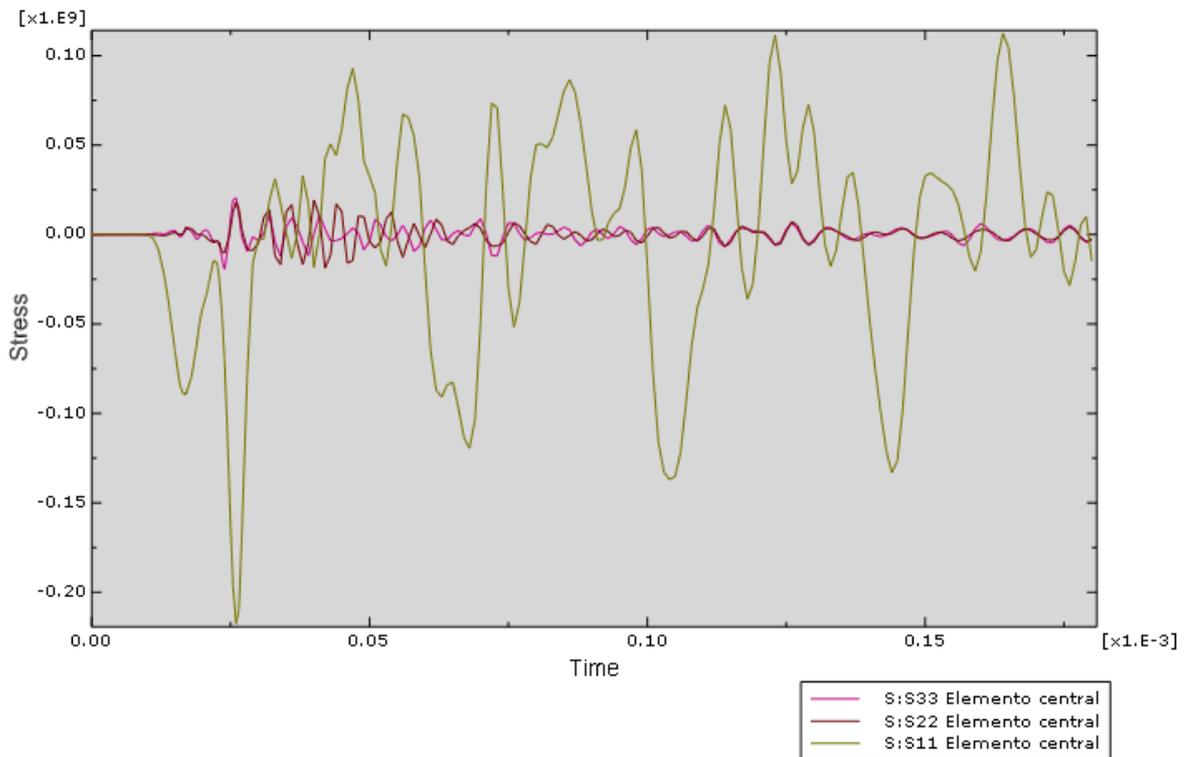


Figura 0.119 Tensiones del elemento central

En la Figura 0.119 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 de compresión aumenta hasta los 122MPa.

3. Plano 50%

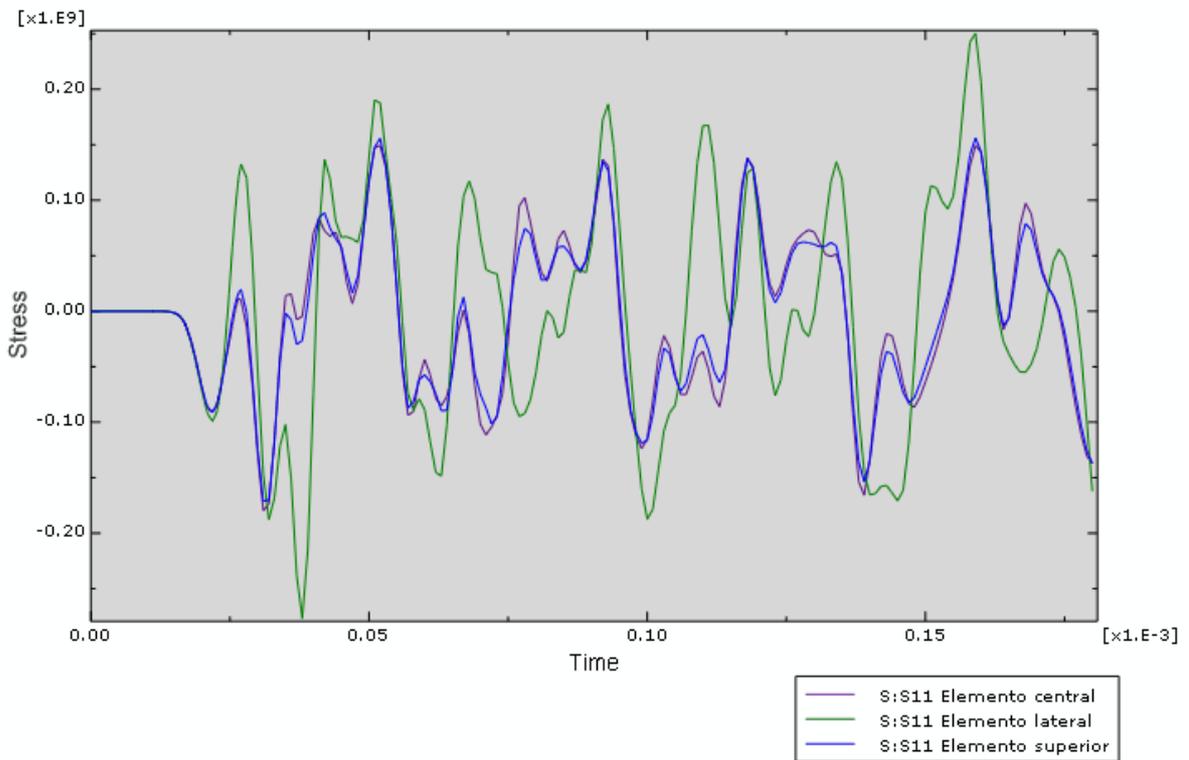


Figura 0.120 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 0.120 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 de la probeta. La diferencia de tensiones entre los elementos en este plano es menor que en los anteriores debido a que el frente de ondas es más estable.

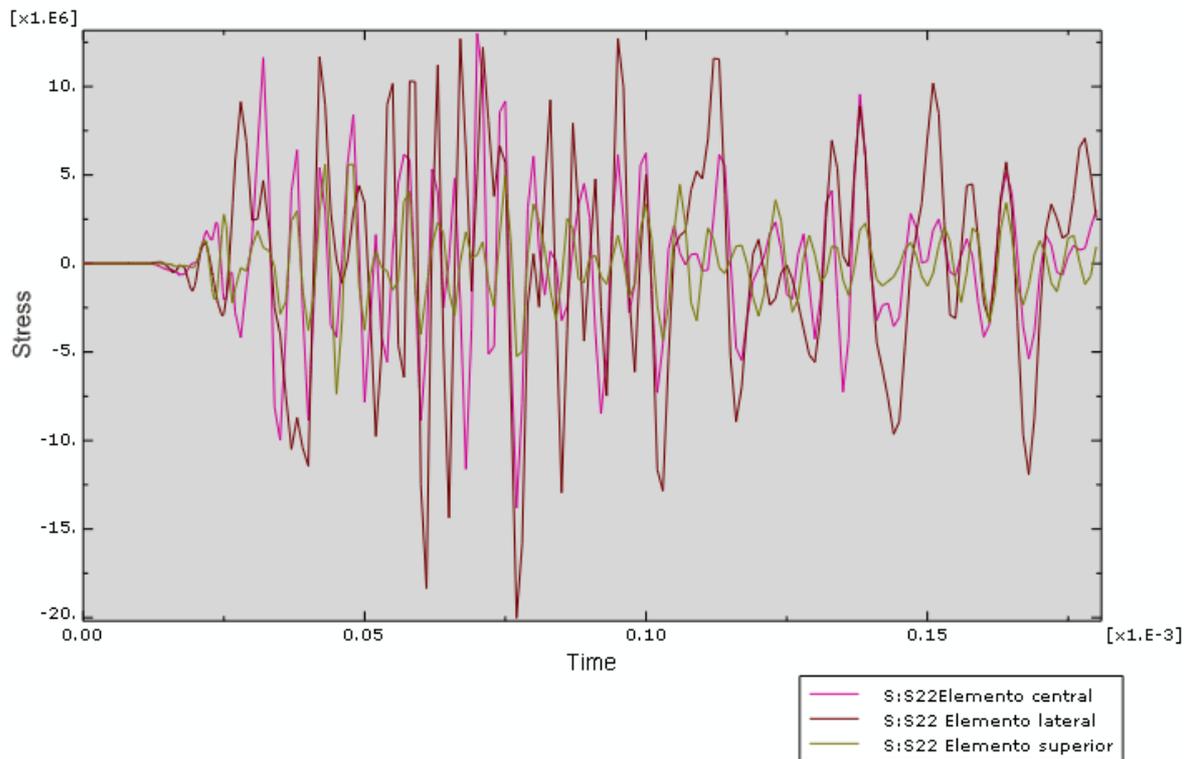


Figura 0.121 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

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 10MPa 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 (6MPa).

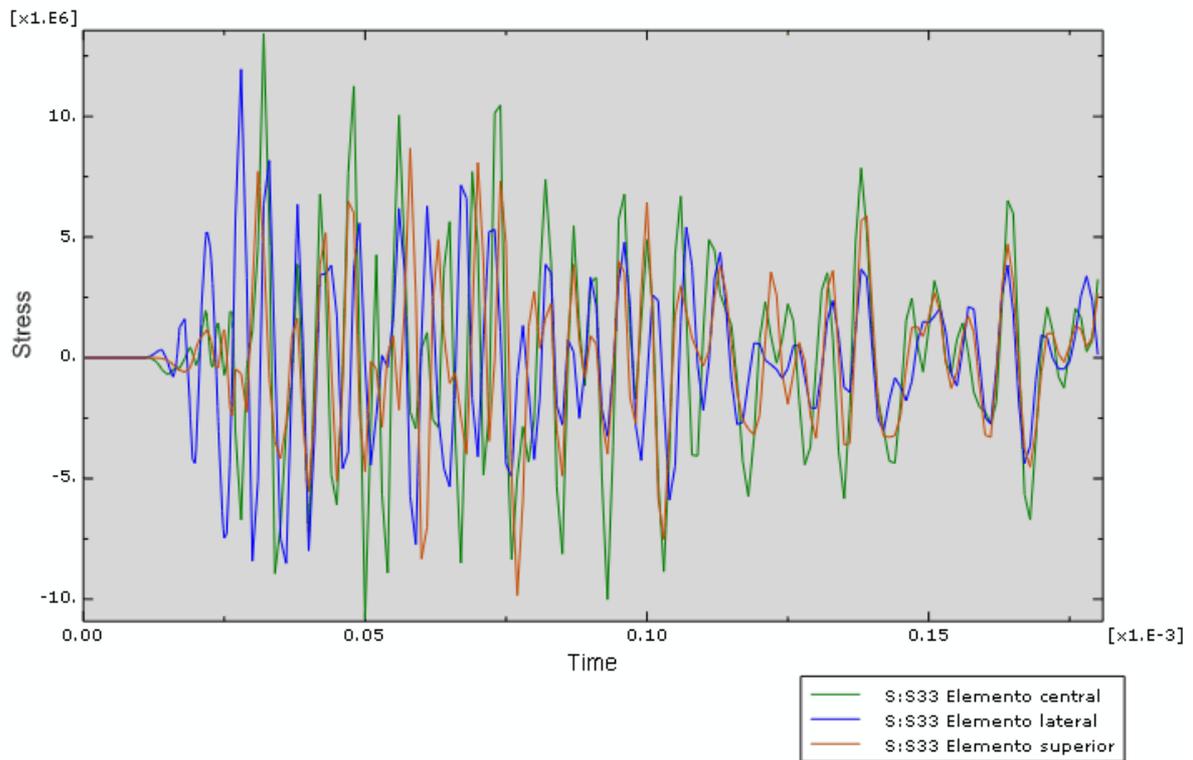


Figura 0.122 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 0.122 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.

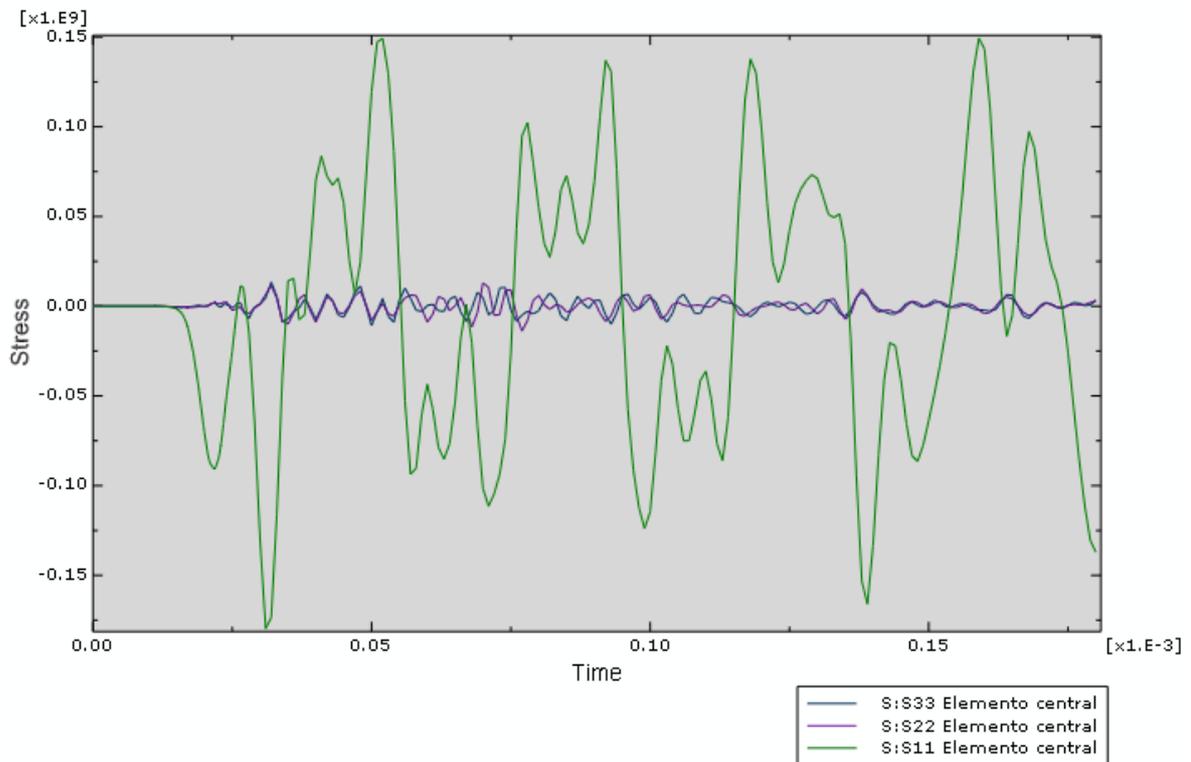


Figura 0.123 Tensiones del elemento central

La Figura 0.123 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%

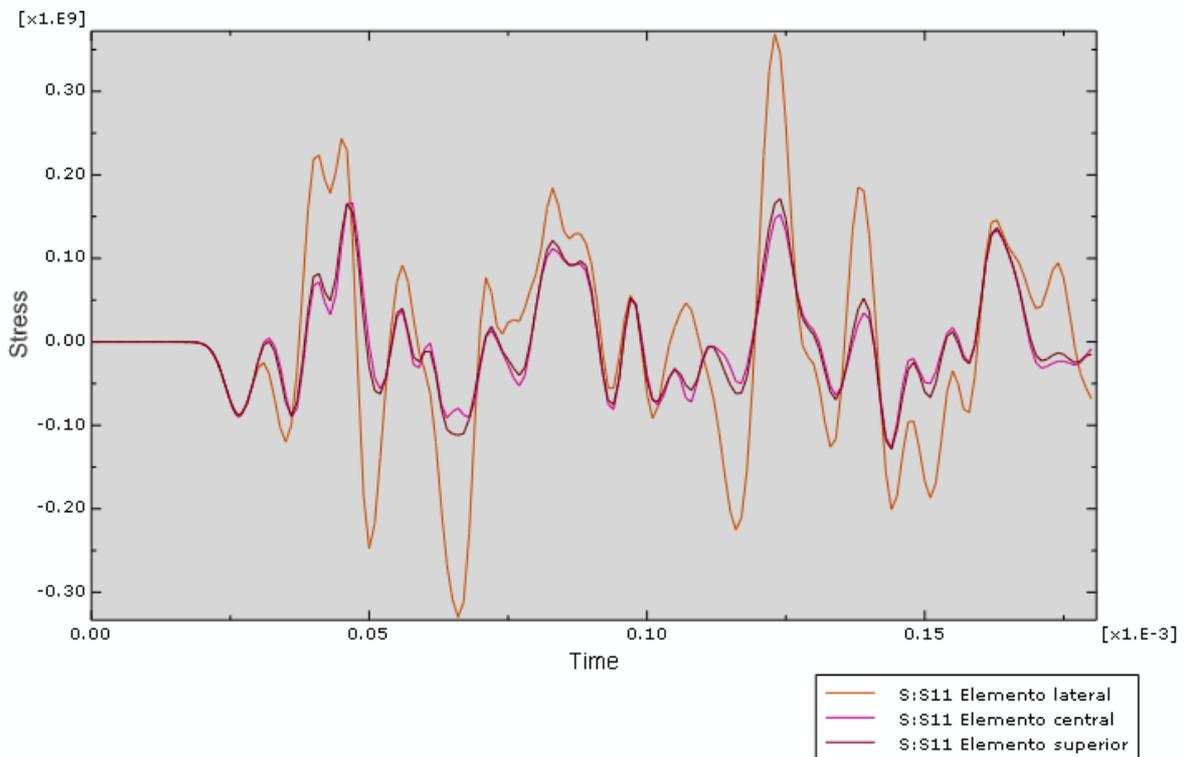


Figura 0.124 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Si se atiende a las ondas de la Figura 0.124 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.

Un hecho interesante es que, en este plano, se puede observar cómo se rompe la tendencia de estabilización del frente de ondas igualándose las tensiones de todos los elementos. Se vuelve a una diferenciación similar a la del plano de 25% entre las tensiones del elemento lateral y los otros dos.

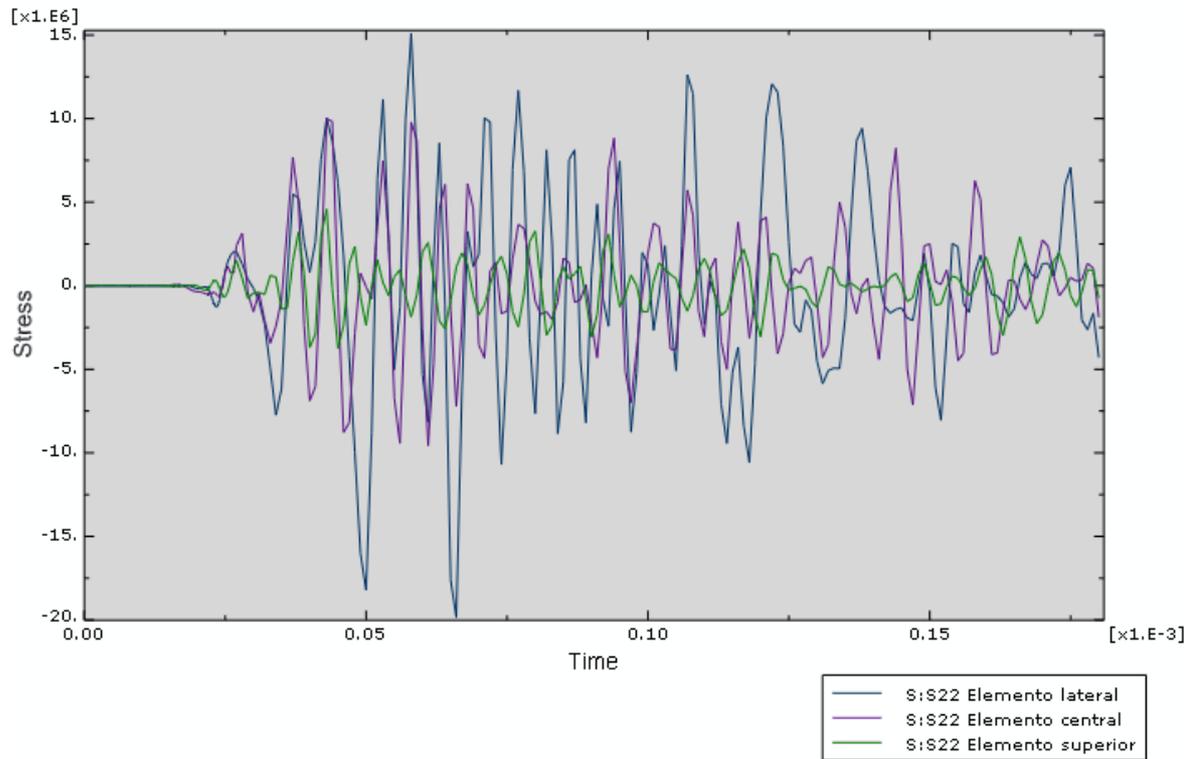


Figura 0.125 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

La Figura 0.125, 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.

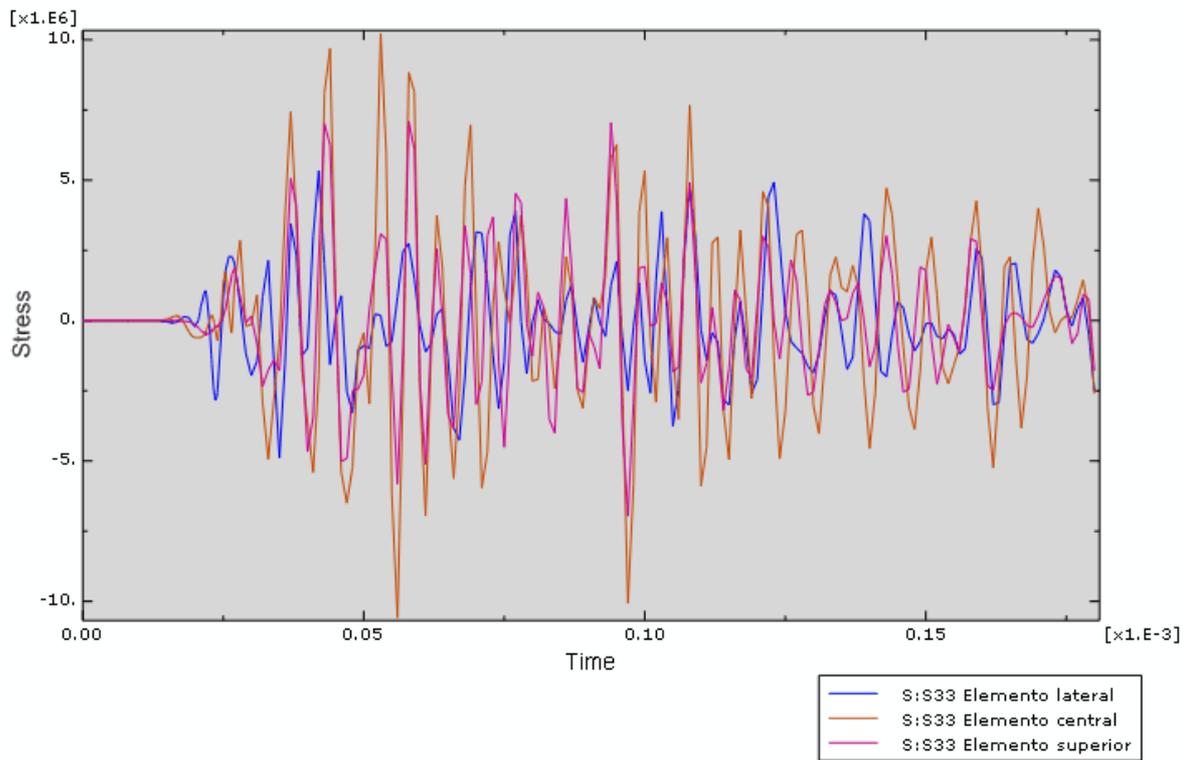


Figura 0.126 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Como sucede con la tensión σ_{11} , la Figura 0.126 muestra como se vuelve a un estado similar al del plano 25%, donde hay una gran diferenciación entre las tensiones de los elementos rompiéndose la tendencia de estabilización del frente de ondas.

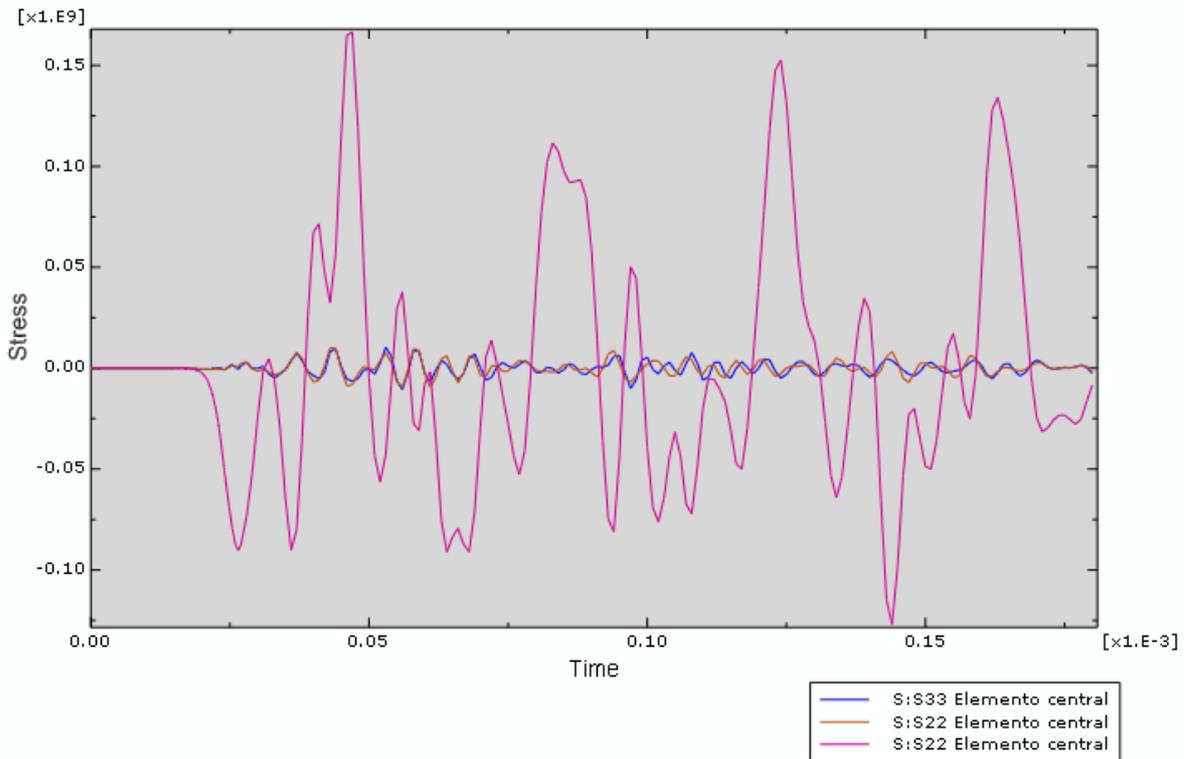


Figura 0.127 Tensiones del elemento central

La gráfica muestra con claridad como las tensiones σ_{22} y σ_{33} son insignificantes frente a la tensión σ_{11} y hay que determinar si pueden considerarse despreciables o, por el contrario, invalidan la hipótesis de propagación unidimensional. 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.

1.4.3 Desalineamiento probeta-flyer de 5°

1. Plano de choque

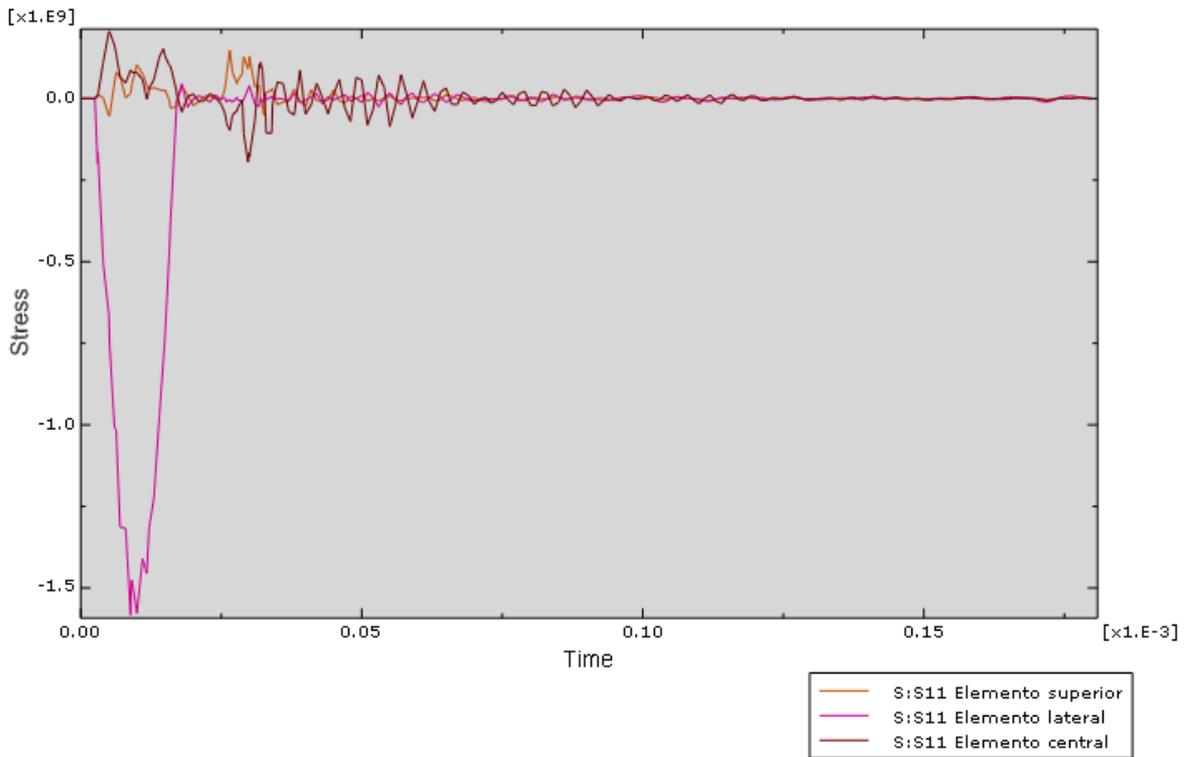


Figura 0.128 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

La Figura 0.128 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.

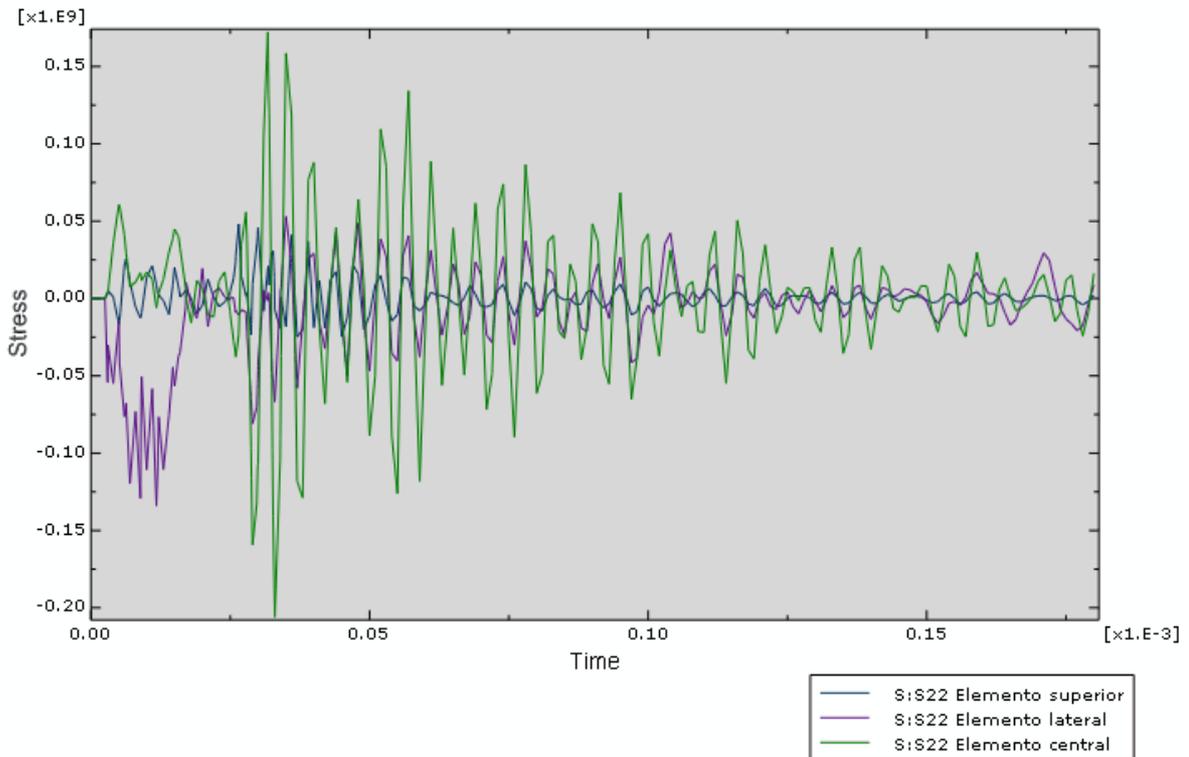


Figura 0.129 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

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.

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 mayor que en los demás.

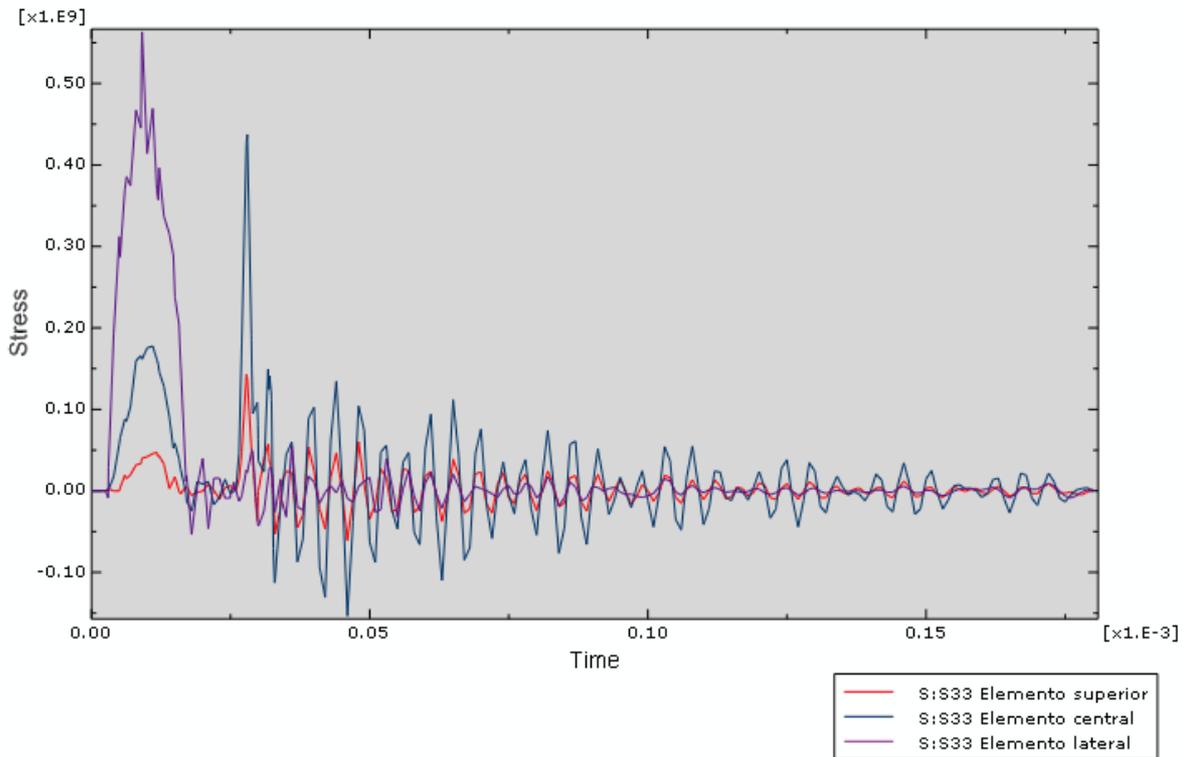


Figura 0.130 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Por su parte, el aumento de la tensión σ_{33} en los elementos se debe únicamente al aumento de la tensión σ_{11} , ya que el módulo de Poisson es una constante. Como ya se ha mencionado, el elemento central estará sometido a mayor tensión que el elemento superior ya que está en la línea de transmisión de esfuerzos mientras que el elemento superior es el más alejado de dicha línea.

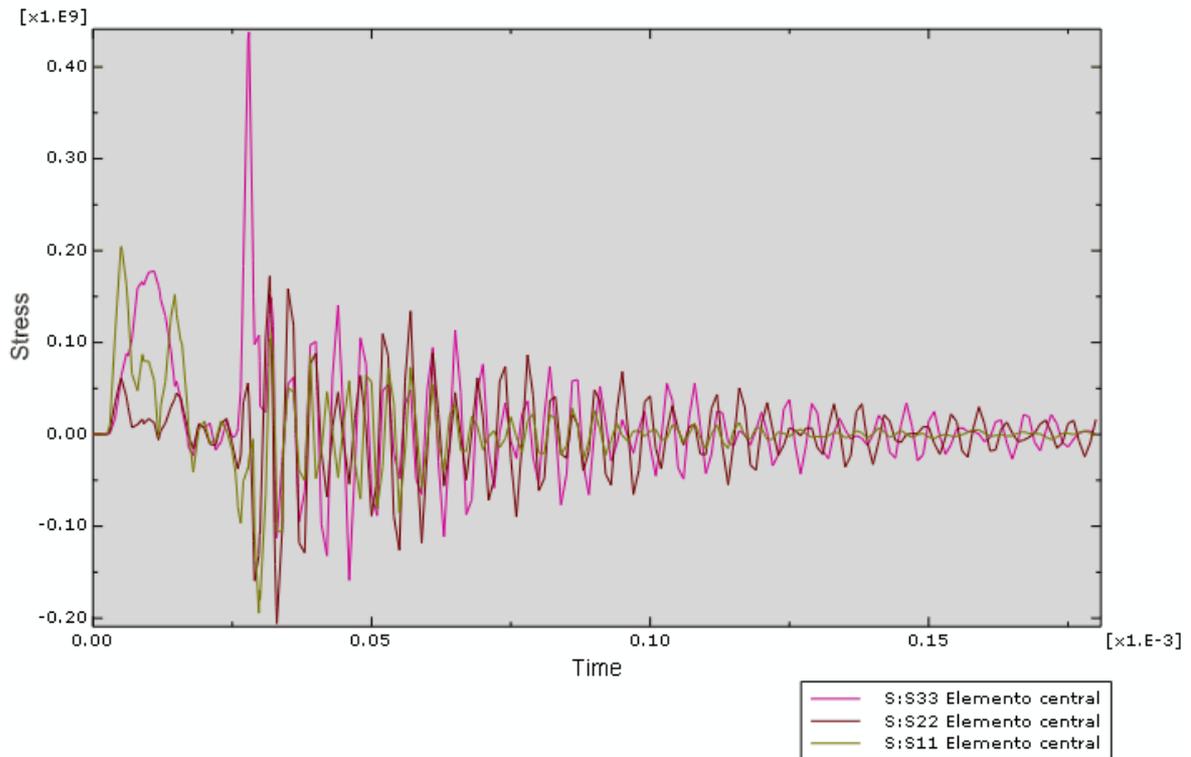


Figura 0.131 Tensiones del elemento central

Atendiendo a la Figura 0.131, donde se comparan las tensiones del elemento central, se puede observar que inicialmente las tensiones σ_{11} y σ_{33} son del mismo orden mientras que la tensión σ_{22} es muy inferior a ambas. Del mismo modo, las tensiones remanentes σ_{11} y σ_{33} son de la misma magnitud y muy superiores a σ_{22} .

2. Plano 25%

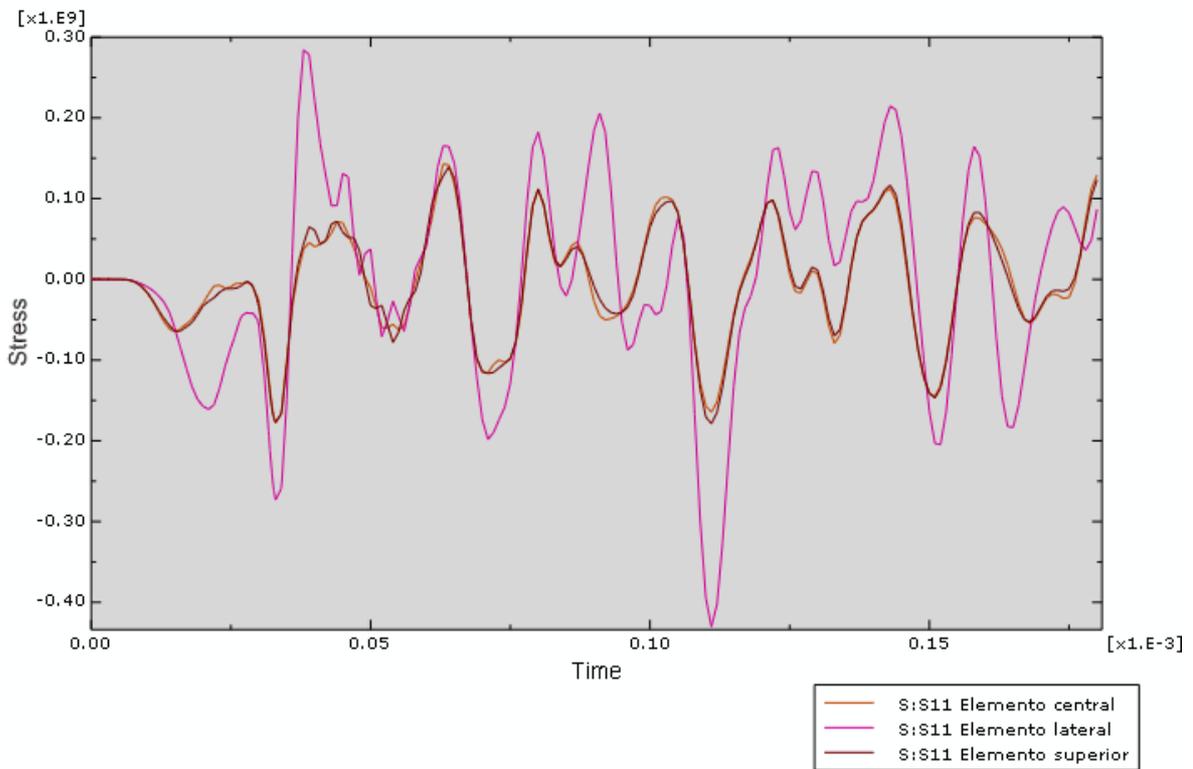


Figura 0.132 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Como muestra la Figura 0.132, la magnitud de la tensión se ha reducido considerablemente, no porque se haya disipado a lo largo de la probeta, si no por el hecho comentado anteriormente del área de impacto.

Se observa que la magnitud de la tensión en el elemento lateral es la mayor mientras que los otros elementos están sometidos a la misma tensión.

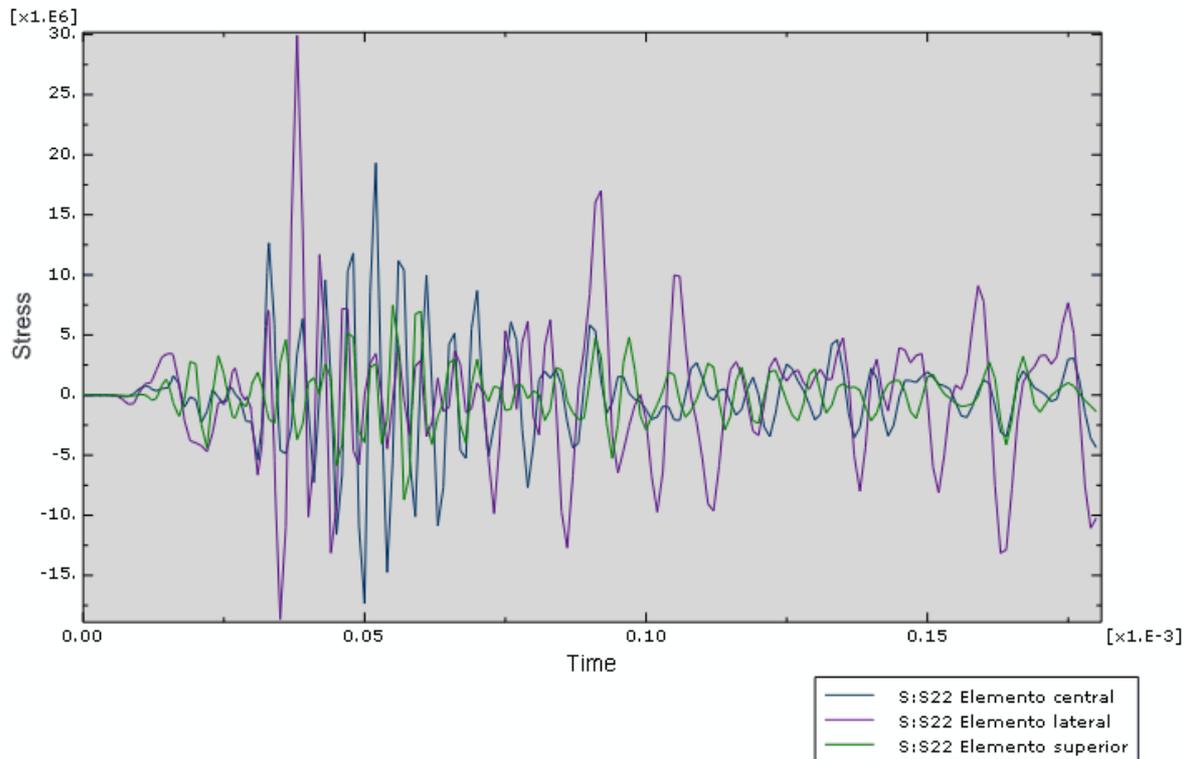


Figura 0.133 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Como ha sido común en todos los casos analizados, el elemento lateral está sometido a una mayor tensión σ_{22} que los otros dos y, exceptuando algunos picos, se puede considerar que la tensión en el elemento central y superior es la misma en la primera parte de la gráfica. Posteriormente la tensión en el elemento central va disminuyendo quedando una tensión remanente mayor en el elemento lateral. Así mismo, la gráfica del elemento central tiene más picos debido a que interactúa por todas sus caras con los elementos adyacentes recibiendo así más perturbaciones.

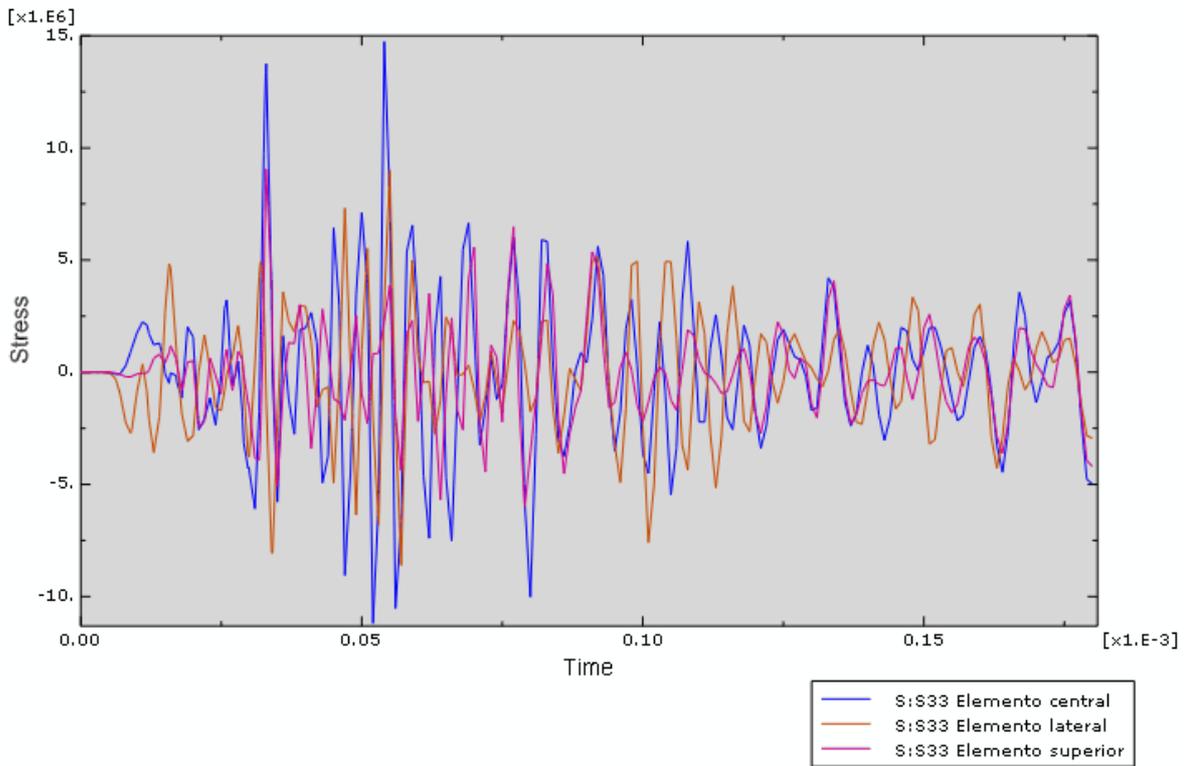


Figura 0.134 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Como se puede observar en la Figura 0.134, con respecto a la tensión σ_{33} , se puede considerar que los elementos central y lateral están sometidos a la misma tensión debido a que ambos se encuentran en la línea de transmisión de esfuerzos mientras que la tensión en el elemento superior es mucho menor ya que es el más alejado de dicha línea.

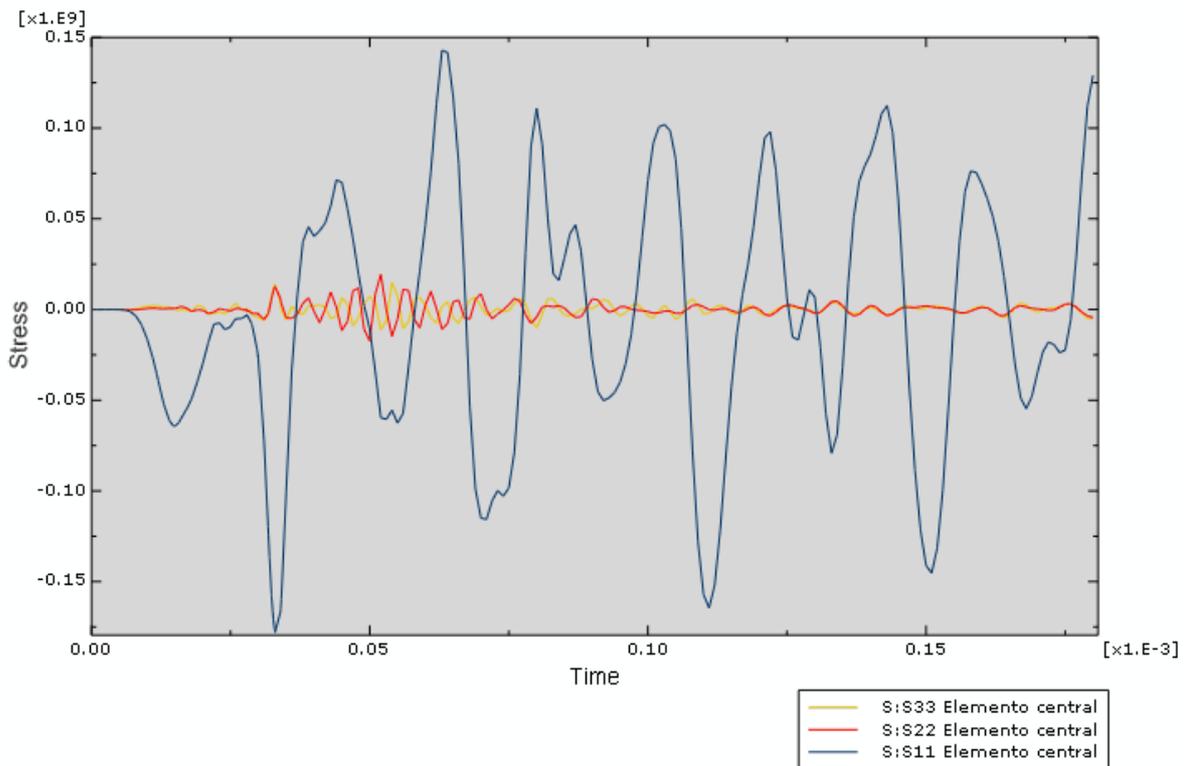


Figura 0.135 Tensiones del elemento central

La Figura 0.135 muestra la comparación de las tensiones en el elemento central obteniéndose una tensión media σ_{11} de 125Mpa 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 15 y 7MPa respectivamente, un valor considerable pero despreciable al compararlo con el valor de σ_{11} .

3. Plano 50%

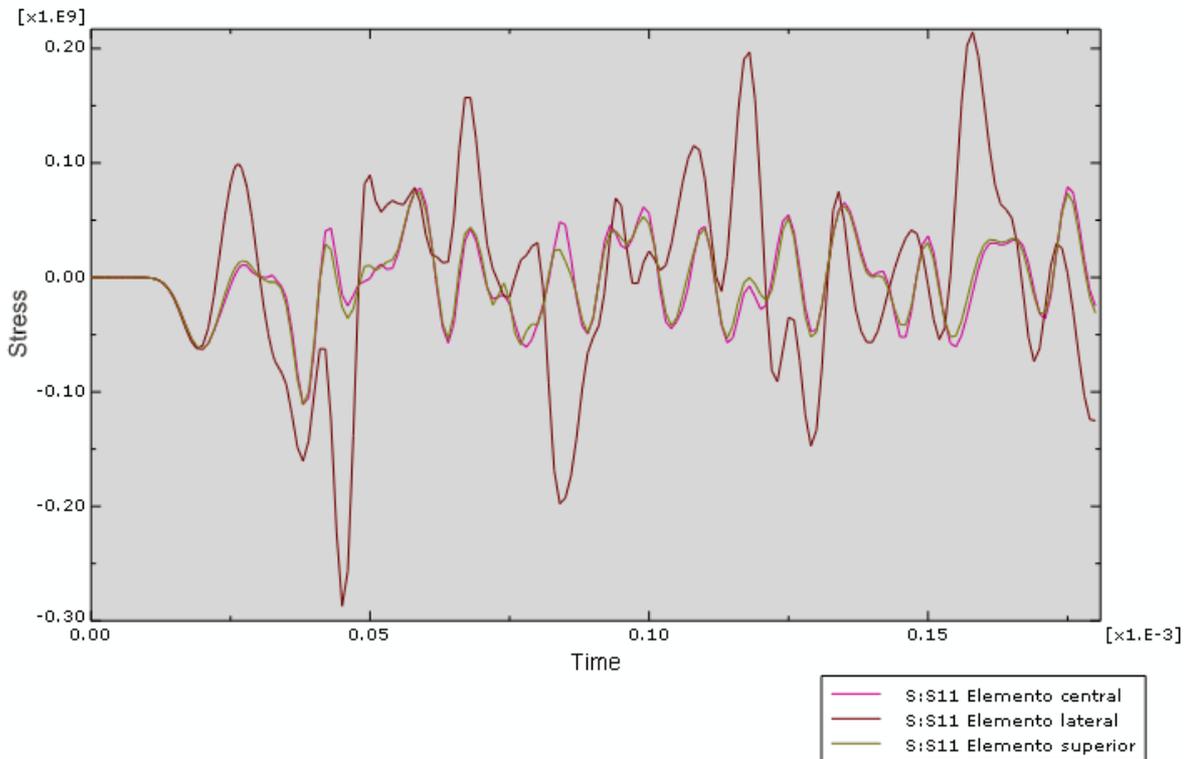


Figura 0.136 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Como sucede en el plano anterior, la magnitud de la tensión en el elemento lateral es mayor que en los otros dos elementos. Si se compara esta gráfica con sus homónimas de casos anteriores, se puede comprobar que la magnitud de la tensión en los elementos se mantiene.

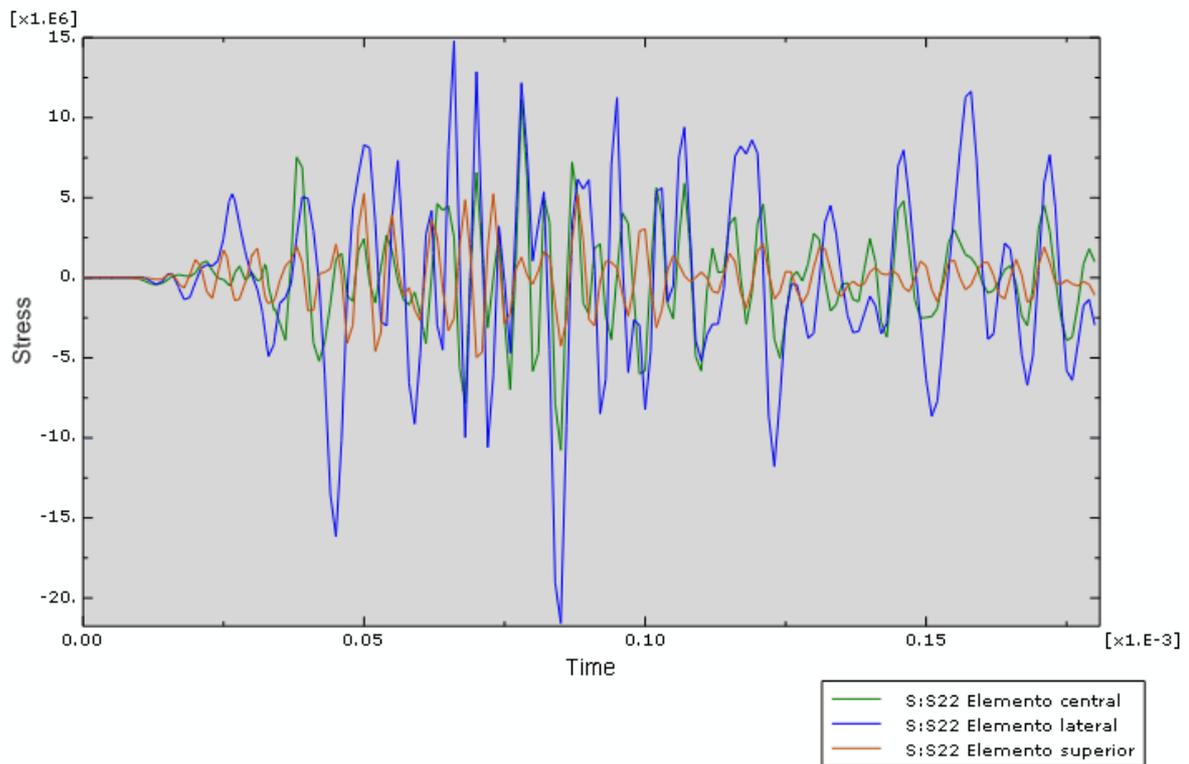


Figura 0.137 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

La Figura 0.137 muestra las mismas características que las mismas gráficas de los demás casos, es decir, el elemento lateral está sometido a una mayor tensión σ_{22} que los otros mientras que la tensión en los elementos central y superior se puede considerar la misma.

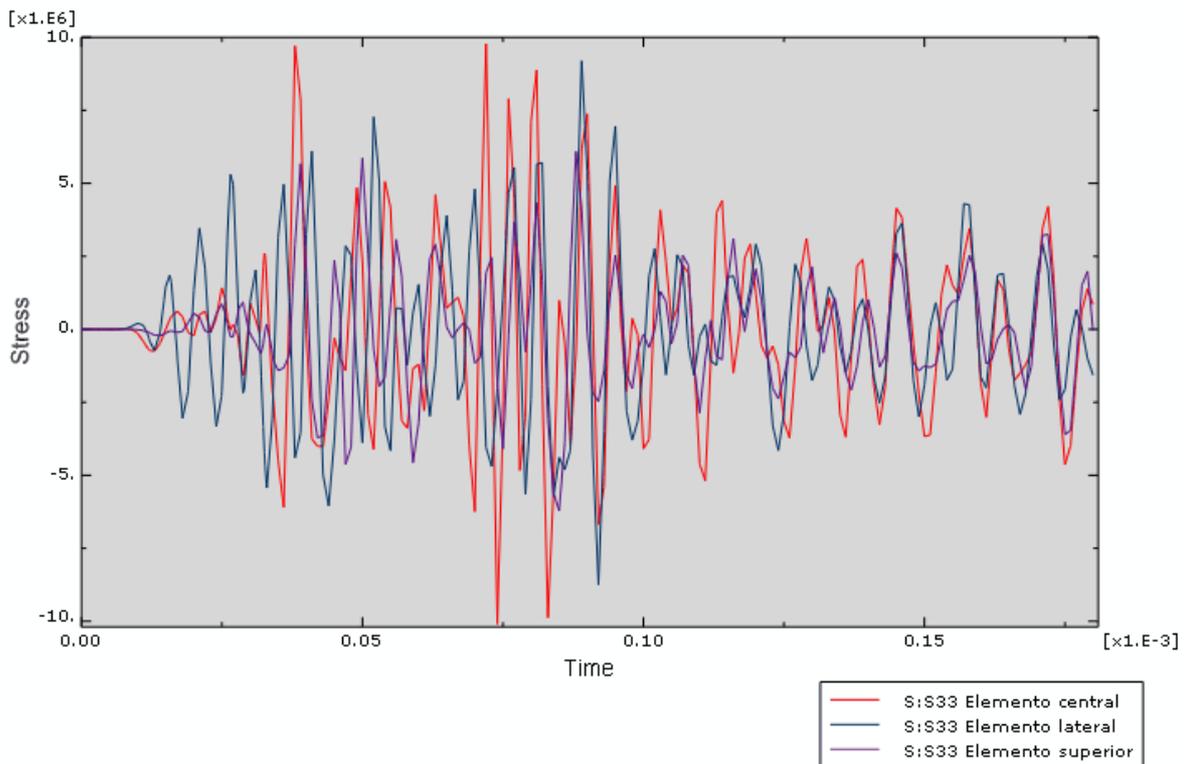


Figura 0.138 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

La Figura 0.138 muestra como 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, está sometido a una tensión menor. Sin embargo, esta diferencia de tensiones es mucho menor en este plano ya que es un plano más alejado del plano de impacto y, por tanto, la onda está más estabilizada.

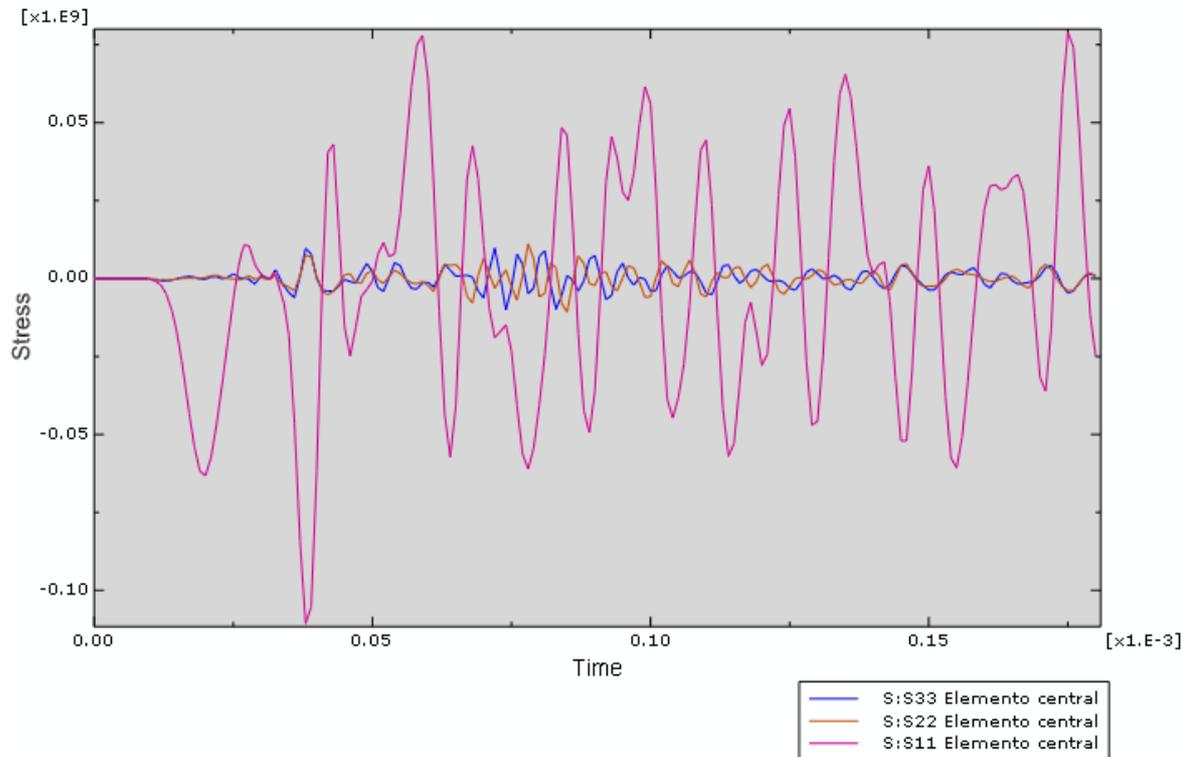


Figura 0.139 Tensiones del elemento central

Como sucede en todos los casos analizados la tensión σ_{11} es mucho mayor que las tensiones σ_{22} y σ_{33}

La Figura 0.135 muestra la comparación de las tensiones en el elemento central obteniéndose una tensión media σ_{11} de 125MPa 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 15 y 7MPa respectivamente, un valor considerable pero despreciable al compararlo con el valor de σ_{11} .

4. Plano 75%

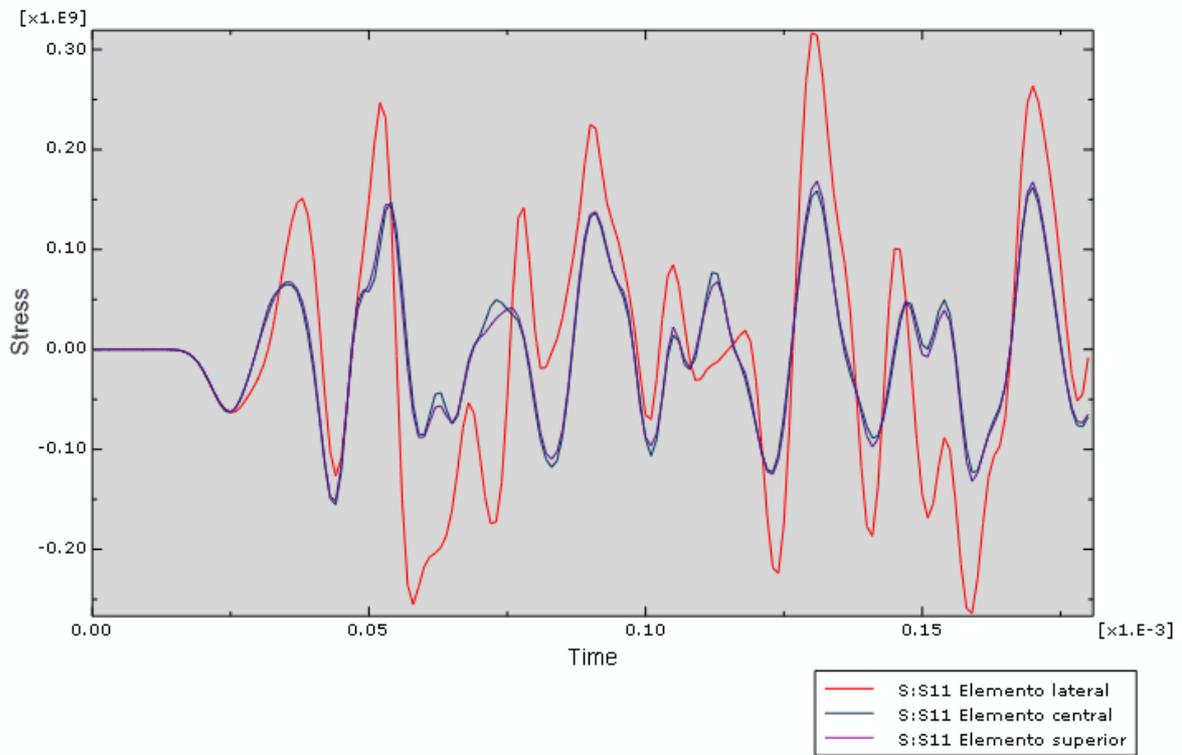


Figura 0.140 Comparación en los elementos de la tensión σ_{11}

Siguiendo las mismas características de los planos anteriores, la máxima tensión se da en el elemento lateral como muestra la Figura 0.140. Sin embargo, se observa que hay menos picos que en las otras gráficas y, a su vez, éstos son menores, lo que indica que en este plano ya se ha producido el cruce de la onda reflejada con la transmitida.

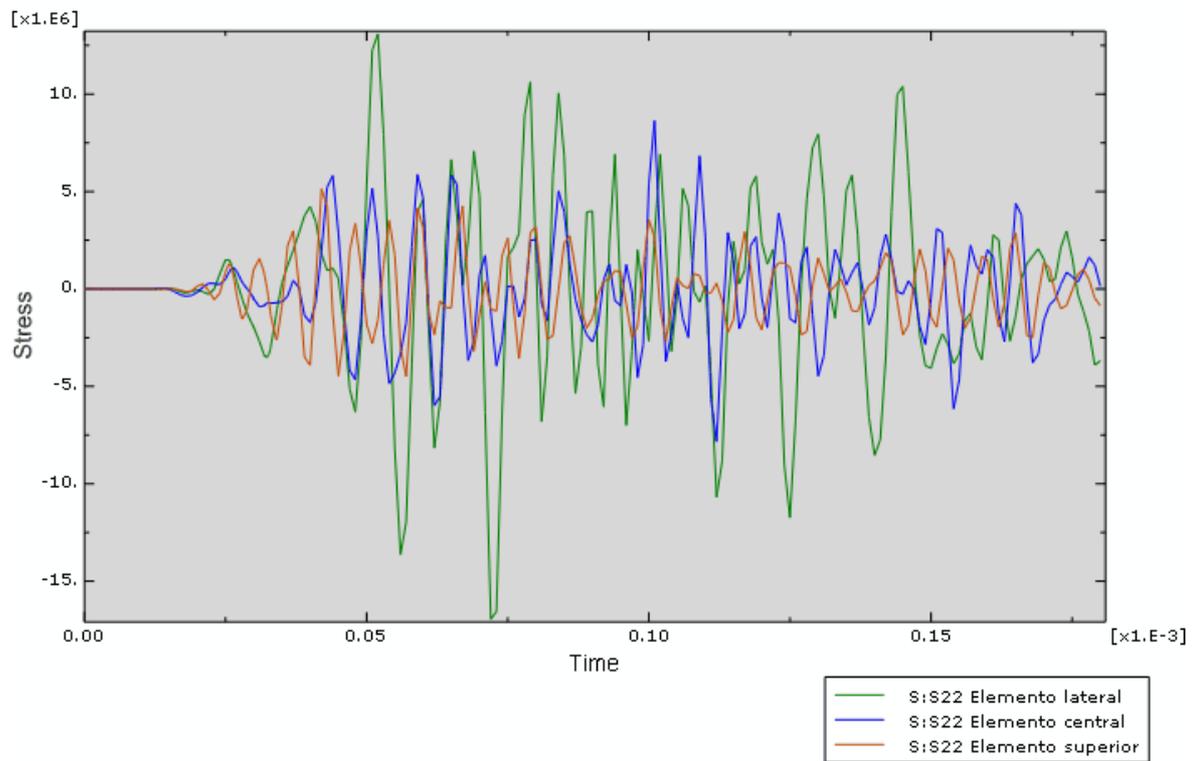


Figura 0.141 Comparación en los elementos de la tensión σ_{22}

Al igual que en los casos anteriores se cumple que el elemento lateral está sometido a una mayor tensión σ_{22} que los otros mientras que la tensión en los elementos central y superior se puede considerar la misma.

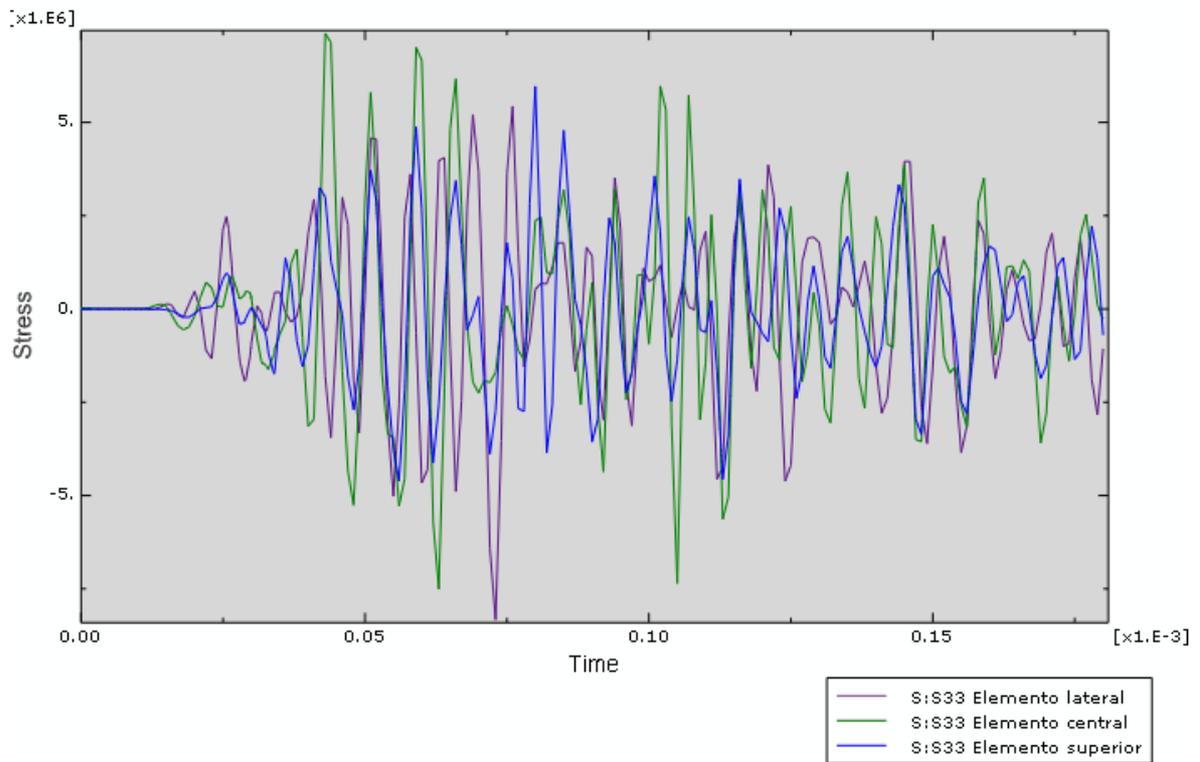


Figura 0.142 Comparación en los elementos de la tensión σ_{33}

Al ser este uno de los planos más alejados del de impacto, el frente de ondas es muy estable y se puede comprobar que, a diferencia de los planos anteriormente analizados y excepto algunos picos, la tensión σ_{33} se puede considerar la misma en todos los elementos.

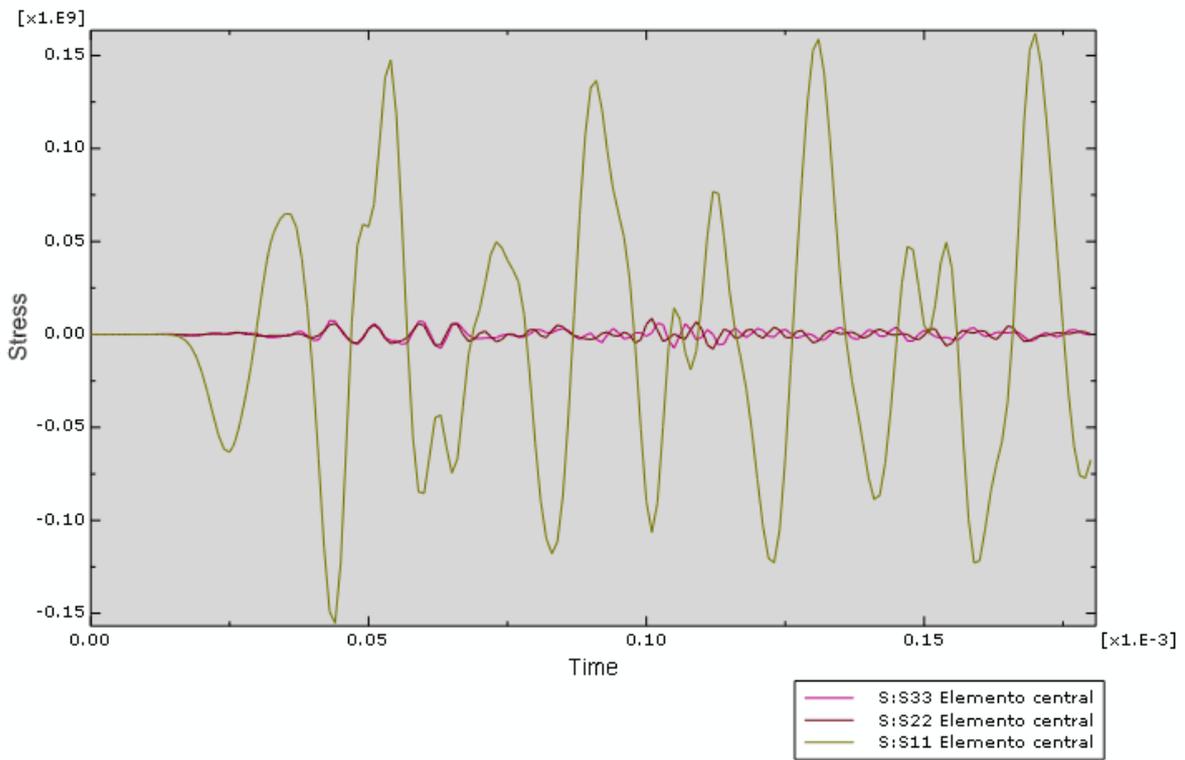


Figura 0.143 Tensiones del elemento central

La Figura 0.143 muestra la comparación de las tensiones del elemento central en este plano y, como sucede en todos los casos analizados, las tensiones σ_{22} y σ_{33} son mucho menores que la tensión σ_{11} .