

5 Aplicación: Análisis de sensibilidad

Para realizar los ensayos de flexión de chapa, se utilizó una máquina universal de embutición de chapa del modelo Erichsen 142-20. Las probetas se deformaron mediante un punzon con movimiento vertical de subida con una velocidad de 1 mm/s. Para la correcta sujeción de las probetas, se fijaron con un prensa- chapa de 70 KN.

Para obtener los datos de deformación durante el ensayo, se utiliza un sistema de medición óptica sin contacto denominado ARAMIS. Consta de dos cámaras digitales de 1.3 MPx que graban la superficie exterior de las probetas ensayadas desde el inicio del ensayo hasta instantes posteriores a la fractura de la probeta. La frecuencia de la captura de las imágenes son de 10 fotogramas por segundo.

Las metodologías para la determinación de deformaciones, se realizan mediante el estudio de la cara exterior de la probeta a ensayar. Los primeros procedimientos se basaban en la medición de un padron de círculos de forma manual que se habían impreso en la probeta indeformada mediante diferentes procesos. Las deformaciones se obtenían de la medición de los ejes principales de las elipses en relación a los círculos originales impresos antes del ensayo.

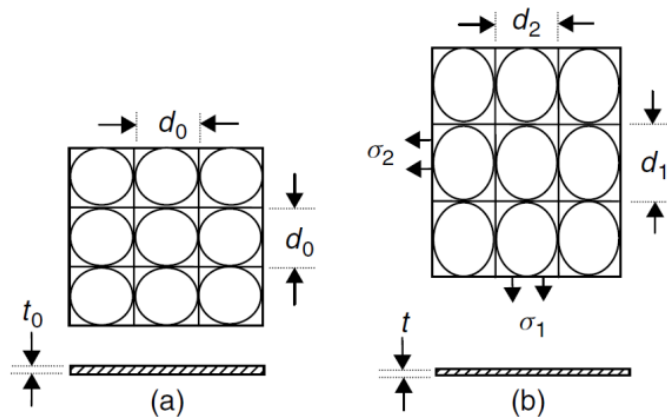


Fig. 5-1: Rejilla de círculos para medición de deformaciones

Deformación mayor $\varepsilon_1 = \ln (d_1/d_0)$

Deformación menor $\varepsilon_2 = \ln (d_2/d_0)$

El principal problema que plantea este procedimiento es el número discreto de información sobre la superficie de la probeta. Para evitar este inconveniente, aparecen procedimientos de medición óptica mediante patrones estocásticos. Este padrón se consigue mediante la aplicación de pintura en spray sobre la superficie de la probeta indeformada. Mediante la utilización de dos pinturas de diferente color, una blanca mate y otra de color negro, se llega a conseguir una distribución de puntos aleatorios a lo largo y ancho de toda la superficie a estudiar. Las dos cámaras digitales capturan por separado imágenes de la superficie de la chapa que se está deformando a la frecuencia anteriormente comentada. Estas imágenes se comparan con las siguientes mediante complejos algoritmos de correlación. La comparación de las imágenes se realiza gracias a la distribución de puntos aleatorios conseguidos mediante la pintura. Se configuran un área variable de estudio que se evaluará a lo largo del ensayo. Solo faltaría por conocer el procedimiento que utiliza aramis para seguir el desplazamiento de un punto a lo largo del ensayo. El área configurada se denomina faceta. Se determinará el tamaño de faceta y el patrón a seguir, es decir, la cuadrícula o malla en la que se coloca el punto central de cada faceta. Una vez que se determinan todas las facetas, dado que cada una de ellas tendrá una distribución de puntos negros, o lo que es lo mismo, una distribución de grises, estos se deben repetir a lo largo de todo el ensayo, solo que se separarán un poco en función de la deformación de tengan. El campo de desplazamientos será posteriormente calculado en cada una de estas facetas.

Es lógico suponer que con una mejor distribución de esta nube de puntos y cuanto más uniforme se distribuya, se obtendrán mejores resultados, por lo que se considera crítico el proceso de preparación de la pintura.

Se analizan tres probetas para cada tipo de punzón. Los punzones que se utilizan son los siguientes:

- Punzón hemisférico de diámetro 100 mm.
- Punzón cilíndrico de diámetro 20 mm.
- Punzón cilíndrico de diámetro 10 mm.

Para cada punzón utilizado, se obtendrán las deformaciones límites para distintos tamaños de facetas y pasos. La geometría de faceta utilizada es cuadrada, con los siguientes tamaños:

- Faceta 15x15 píxeles.
- Faceta 13x13 píxeles.
- Faceta 11x11 píxeles.

La separación entre las facetas se define a continuación:

- Paso 15x15 píxeles.
- Paso 13x13 píxeles.
- Paso 11x11 píxeles.
- Paso 7x7 píxeles.

El solapamiento se define como el porcentaje de introducción entre las facetas. En función del tamaño de faceta y del paso entre ellas se obtendrá un solapamiento diferente.

$$\text{Solapamiento} = \frac{(\text{Tamaño} - \text{Paso})}{\text{Tamaño}}$$

El estudio se podía haber realizado de dos formas diferentes. Una primera definiendo un paso determinado, por lo que el solapamiento sería variable, y la otra es fijando el solapamiento, por lo que con la faceta predefinida, el paso sería el parámetro variable. Dado que se establecen los parámetros de tamaño y paso, por consiguiente queda establecido el solapamiento entre las facetas.

Tamaño	Paso	Solapamiento
15	15	0
15	13	0,133
15	11	0,267
15	9	0,4
13	13	0
13	11	0,154
13	9	0,308
11	11	0
11	9	0,182
11	7	0,364

Tabla 5-1: Diferencia entre tamaño de faceta y paso de malla

Existe algún antecedente donde se realizan estudios parecidos de modificación de parámetros, comparándose los diferentes resultados obtenidos. Más concretamente, en el artículo publicado por Arrieux se realiza un estudio modificando los parámetros de tamaño de faceta y de malla. En la siguiente tabla se muestra los valores objeto de estudio.

Parameters 7D	Grid step	Pattern size
Sizing 1	10	14
Sizing 2	15	14
Sizing 3	20	14
Sizing 4	25	14
Sizing 5	30	14
Sizing 6	14	10
Sizing 7	14	15
Sizing 8	14	20
Sizing 9	14	25
Sizing 10	14	30

Tabla 5-2: Selección de parámetros de estudio realizado por Arrieux

Las conclusiones se basaron en orden a tener la mejor relación entre tiempo de cálculo computacional y precisión en los resultados. Se demostró que un paso de 10 y un tamaño de faceta de 20, es el que mejor resultados ofrecía. Los parámetros utilizados indican un solapamiento del 50%

La diferencia entre su estudio y el realizado en este proyecto es notorio. Se basó en una comparativa de los valores de deformación mayor frente a la posición, y no en las deformaciones límites obtenidas en la metodología.

5.1 Obtención de datos mediante software comercial

Para obtener los datos experimentales de los diferentes ensayos, se utiliza el software comercial ARAMIS. Como se ha comentado en capítulos anteriores, este software es capaz de extraer datos para diferentes parámetros en un mismo ensayo, los cuales serán posteriormente analizados con la aplicación desarrollada. En la figura 5-2, se muestra la pantalla principal de ARAMIS con un ensayo ya realizado para extraer la información para la metodología ISO 12004-2.

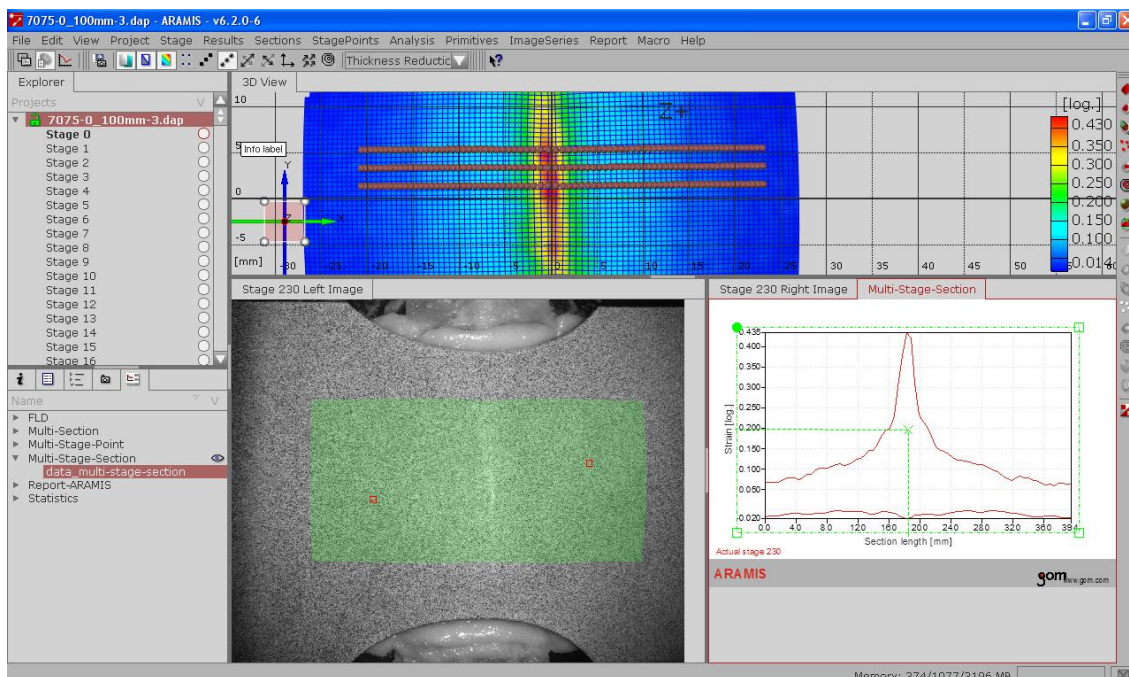


Fig. 5-2: Pantalla principal de ARAMIS

Como se puede observar, la pantalla se divide en cinco ventanas; En la parte superior izquierda aparecen todos los stages calculados, seleccionandose el stage objeto de estudio. En la parte superior derecha aparece la visualización de las deformaciones en la probeta, así como las

secciones generadas para su evaluación. En la ventana inferior izquierda se muestran las diferentes opciones para extracción de datos. En la parte central se ofrece la imagen de una de las cámaras. Y por último, en la parte inferior derecha se muestra una gráfica con el tipo de análisis seleccionado.

La metodología para el análisis se augumenta en las siguientes líneas. Se parte de tres ensayos ya realizados con los tres punzones comentados anteriormente (100, 20 y 10 mm respectivamente). Esto quiere decir que se tienen todos los fotogramas necesarios durante el proceso de fractura de las distintas probetas para poder ser analizados posteriormente, indiferentemente del tipo de metodología a analizar o parámetros a configurar. Una vez que se tiene toda la secuencia de fotogramas, se procede al estudio de las deformaciones.

En primer lugar se establecen los parámetros de análisis de las probetas. Estos son los que se definen a continuación:

- **Tamaño:** Dimensiones de la faceta que calculada en píxeles. La selección del tamaño de la faceta depende del patrón en la superficie del espécimen. Dentro de una faceta, una distribución de nivel de gris claramente reconocible deberá estar presente.
- **Paso:** Distancia entre los dos centros de dos faceta consecutivas.

Como valor predeterminado, ARAMIS aconseja como tamaño de faceta el de 15 píxeles, pudiéndose ajustar solo los valores impares. Por defecto también se adopta una superposición de dos píxeles, por lo que los ajustes por defecto quedan de la siguiente manera (tamaño de faceta = 15 y paso = 13). En la figura 5-3 se muestran estos ajustes.

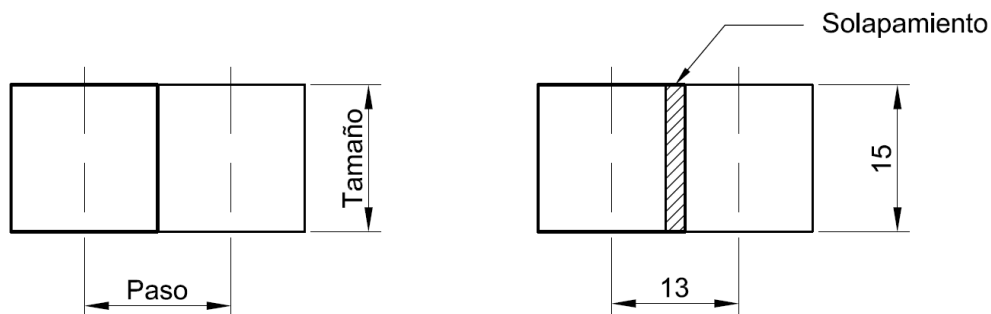


Fig. 5-3: Diferencia entre tamaño de faceta y paso de malla

Los parámetros definidos con anterioridad (tamaño de faceta y paso), se pueden modificar en el software comercial ARAMIS tal y como se muestra en la siguiente imagen:

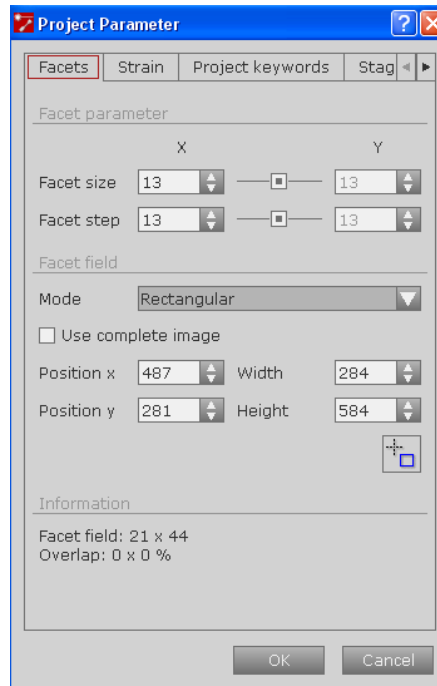


Fig. 5-4: Selección del tamaño de faceta y del paso en ARAMIS

Una vez que se tienen establecidos los parámetros de estudio, se procede a seleccionar el tipo de análisis. ARAMIS ofrece diferentes tipos de análisis, de los cuales solo se usaran dos de ellos:

- FLD
- Multi section
- Multi stage section
- Multi stage point
- Report Aramis
- Statistics

Multi stage section

Con este modo se extraeran los datos para realizar el estudio de la metodología ISO 12004-2. En primer lugar se procede a generar tres secciones perpendiculares a la línea de fractura de una longitud total aproximadamente de 40 mm y espaciadas entre ellas Se genera un único fichero con los datos en el stage seleccionado por el usuario:

```
# <defaultcodec>utf-8</defaultcodec>
Multistage section export
Section: Section 3
Strain stage: 0 -> 236
Point stage: 236
Point position X coordinate diagram [mm]Major Strain [log.]Minor Strain [log.]
```

Los datos necesarios para realizar el estudio son los que aparecen en la última línea de la cabecera de los archivos generados (punto, coordenada X, deformación mayor y deformación menor). Estos datos se tienen que seleccionar en el editor, ya que se ofrecen diferentes opciones. De entre ellas se comentarán las más importantes.

- Eje X: longitud de la sección en mm.
- Eje Y: Deformación. Se elige la logarítmica.

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) = \ln (1 + e)$$

- Referencia del stage del eje X: Por defecto aparece en el stage 0 pero habrá que seleccionar el stage en el que se evalúan los datos. En función del ensayo realizado obtendremos un stage diferente.

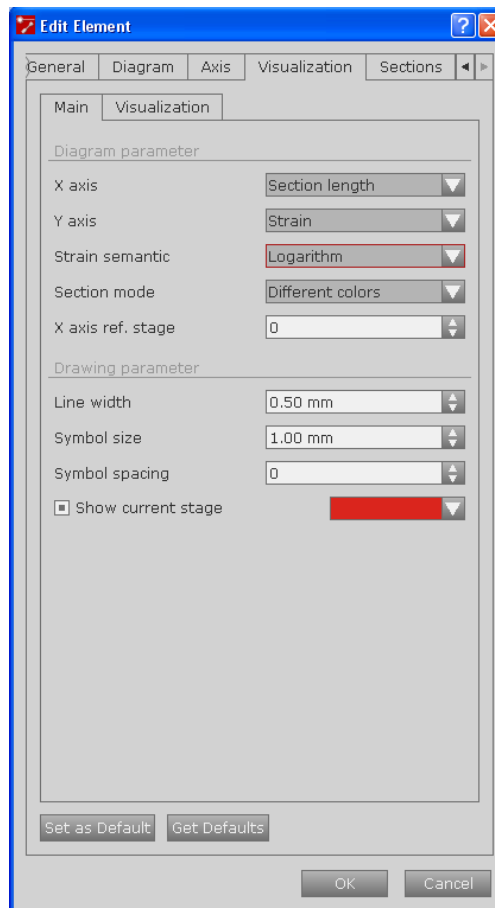


Fig. 5-5: Selección de datos a exportar en metodología ISO 12004-2

Multi stage section

Con este modo se extraerán los datos para realizar el estudio de la metodología temporal. Se genera dos archivos con los datos de todos los stages hasta el momento justo antes de la fractura seleccionado por el usuario:

```
# <defaultcodec>utf-8</defaultcodec>
Multistage Point Export
X axis Time [s]
Y axis Major Strain [log.]

Stage x   y0   x   y0...
```

Los datos necesarios para realizar el estudio son los que aparecen en la última línea de la cabecera de los archivos generados (stage, tiempo y deformación). Estos datos se tienen que seleccionar en el editor, ya que se ofrecen diferentes opciones. De entre ellas se comentarán las más importantes.

- Eje X: Tiempo [s].
- Eje Y: Deformación. Se elige la logarítmica.

5.2 Criterios para toma de datos en las diferentes metodologías

En la metodología ISO, dado que es un sistema robusto y totalmente automatizado, el usuario no tiene que “tomar decisiones” a la hora de adquirir los resultados. Esto es lo más conveniente, ya que si no fuese así, cada individuo influenciaría en los resultados obtenidos, siendo menos objetivo el procedimiento.

Para la metodología Temporal, se otorga al usuario poder de decisión para la obtención de datos. Por este motivo, se considera oportuno el unificar unos criterios para de esa forma estandarizar aún más la metodología y homogeneizar los resultados aunque se obtuvieran mediante diferentes usuarios. Estos criterios se resumen en dos puntos importantes.

- Elección de curva óptima
- Obtención del máximo de la curva óptima.

5.2.1 Elección de la curva óptima

A la hora de seleccionar la curva, la metodología indica que se debe escoger aquella que alcanza velocidad nula justo un instante antes de la fractura. De acuerdo con la evidencia experimental, se establece que el proceso de estricción comienza cuando la velocidad de deformación de estas curvas alcanza un máximo. Es decir, se obtendrán curvas ascendentes que alcancen un máximo y que descendan hasta un valor nulo. El problema radica cuando estas curvas no alcanzan un cero, sino que se paran antes. En estos casos se debe decidir si este tipo de curvas se deben seleccionar como curva óptima, o por el contrario considerar que no lo son. Para facilitar esta decisión al usuario, se establece el siguiente criterio:

Desestimación de curva

Este es el caso en el que la curva con tendencia a tener una velocidad de deformación no obtiene el valor cero y se se queda en un tercio de la altura de la misma.

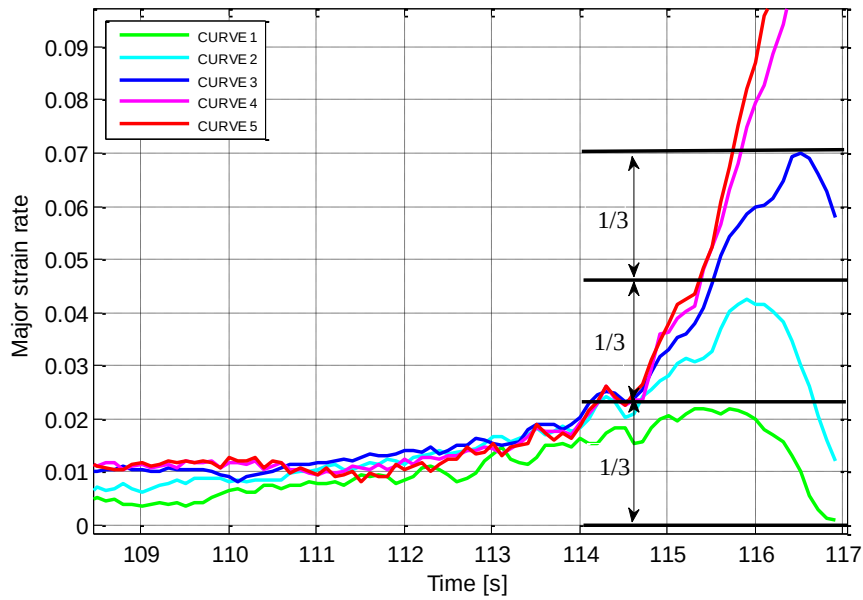


Fig. 5-6: Ensayo 20_2_15x13_sec1

Obtención del máximo mediante media de dos curvas

Este es el caso en el que la curva con tendencia a tener una velocidad de deformación no obtiene el valor cero pero se queda en dos tercios de la altura de la misma.

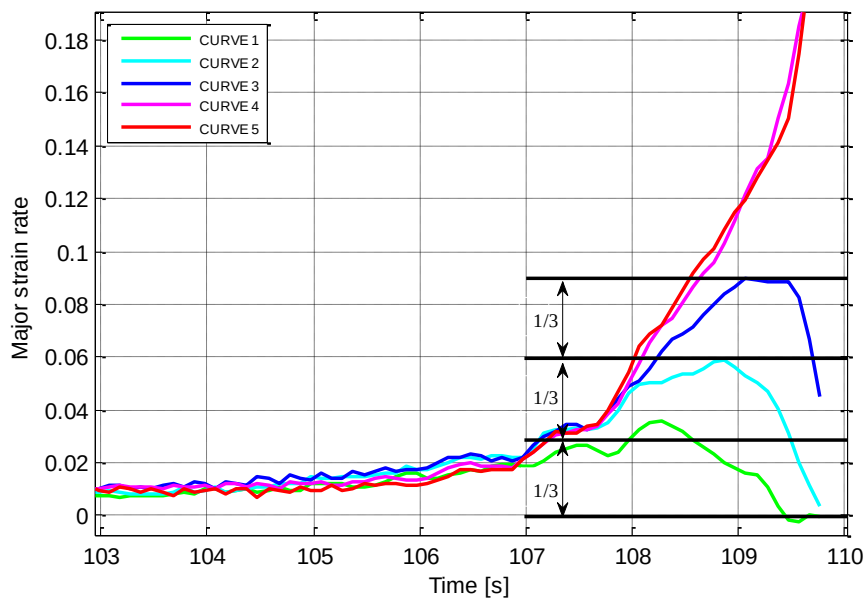


Fig. 5-7: Ensayo 20_3_13x11_sec2

En este caso, como se puede observar, la curva azul nº 3 tiende a cero y posee un máximo. Como se encuentra dentro del segundo tercio se establece que hace media con la curva inmediatamente inferior /en este caso la curva celeste nº 2, siempre y cuando esta tenga una velocidad de deformación nula.

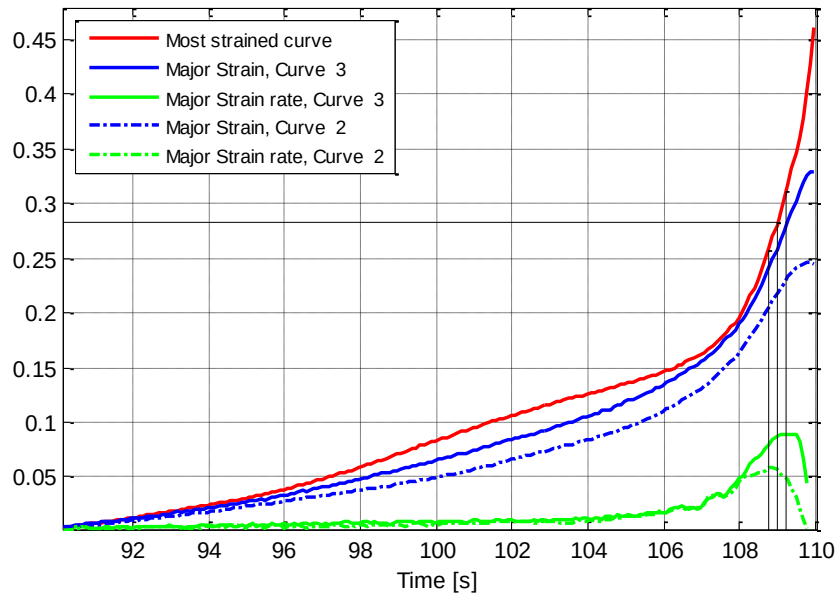


Fig. 5-8: Resultados para media de curvas

Obtención del máximo mediante una única curva

El caso más común y que se da en más ocasiones es el que la última curva que alcanza un máximo y luego disminuye su velocidad de deformación alcanza un valor nulo o muy próximo a él, encontrándose en el tercer tercio.

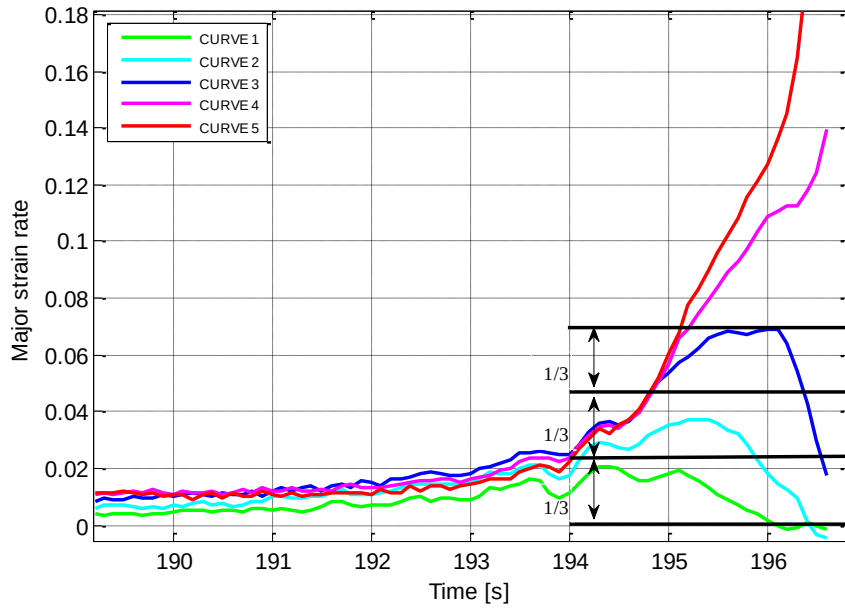


Fig. 5-9: Ensayo 20_1_15x13sec1

5.2.2 Obtención del máximo de la curva seleccionada

Para obtener el máximo basta con realizar el ajuste polinómico mediante la aplicación implementada. El problema recae cuando los datos experimentales se salen un poco de lo establecido, por lo que se tiene que decidir los valores de inicio y fin del ajuste para obtener el máximo en el lugar correspondiente.

Curvas homogéneas

La mayoría de las curvas obtenidas para la velocidad de deformación, presentan una forma suave con poco ruido, en las que se ajustan fácilmente polinomios de grado 4 y 5. Además suelen presentar un máximo muy definido, facilitando enormemente el procedimiento de cálculo de la deformación límite.

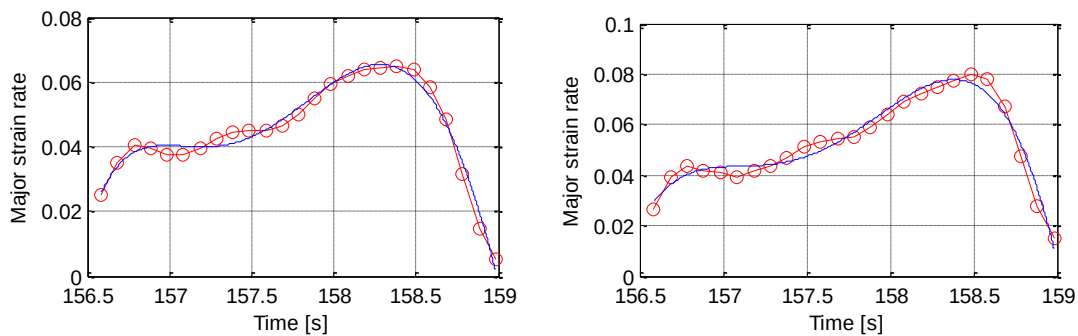


Fig. 5-10: Ensayo 1 de Ø 100. Malla 15x15 en lado izquierdo, malla 13x13 en lado derecho.

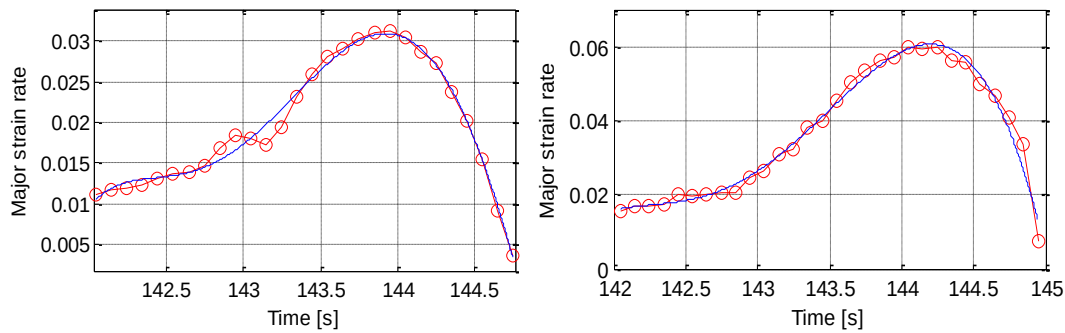


Fig. 5-11: Ensayo 1 de $\varnothing$ 100. Malla 15x15 en lado izquierdo, malla 13x13 en lado derecho.

Curvas con valle en zona de máximo

Se contemplan principalmente dos opciones. La primera es que una de las crestas, sea considerablemente más alta que la otra, por lo que se toma esta como principal, y por tanto se establece el máximo en ese punto. Para conseguirlo se considera adecuada un ajuste polinómico de grado 5 en el que se cogen el mismo número de puntos desde los máximos a sus exteriores.

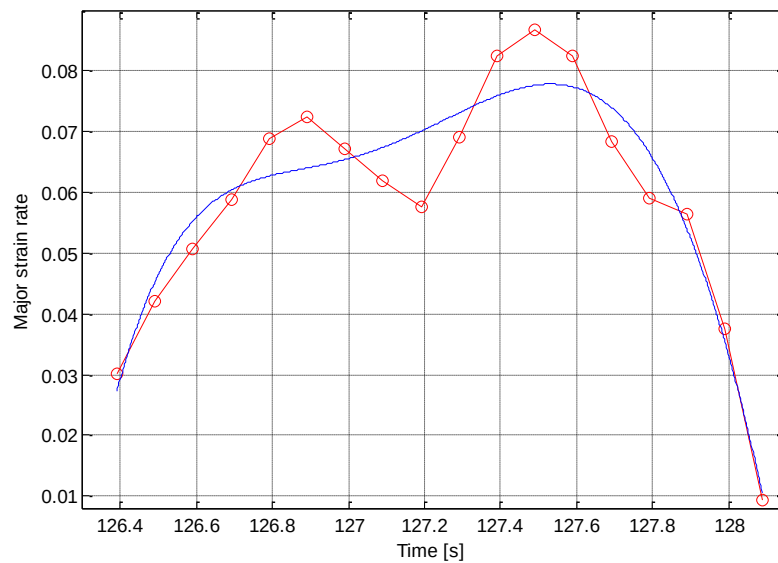


Fig. 5-12: Ajuste con polinomio de 5º grado.

La segunda es que las dos crestas obtengan los máximos de valores similares, por lo que crea la incertidumbre de saber seleccionar el óptimo. En este caso se establece que el óptimo se encuentra en la zona central del valle. Para que la curve de ajuste se considere aceptable, se establece que se tienen que tomar un total de más de 30 datos o de 3 segundos.

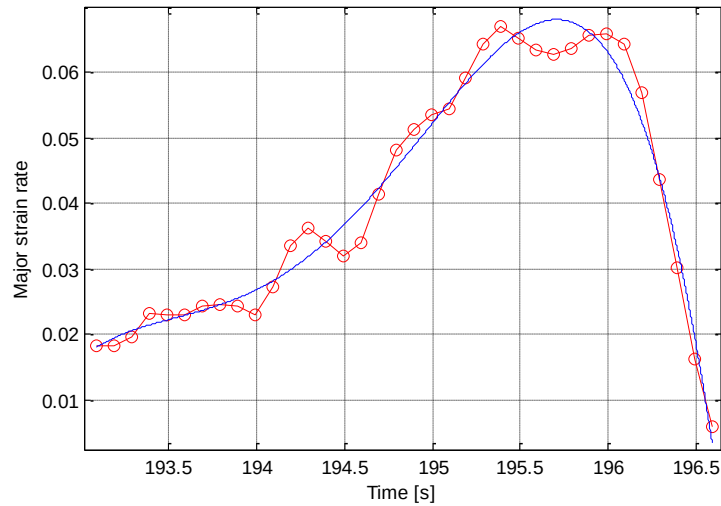


Fig. 5-13: Ajuste de curvas con valle en la zona de máximo.

Hay que hacer constar que este tipo de casos se han producido en contadas ocasiones, y que no se considera un aspecto crítico e influenciable para obtener resultados fuera de contexto.

Ruido en curvas

Tras los análisis realizados en la batería de ensayo, se aprecia un aumento del ruido de forma excesiva para pasos inferiores a 7. En la siguiente figura se muestra uno de estos casos. Es una gráfica obtenida del ensayo con diámetro de punzón de 10 mm y con una malla 9x5.

Dado la gran cantidad de ruido obtenido en estos ensayos, se decide realizar un ajuste polinómico con un gran número de puntos. En este caso se toma un valor de no menos de 6 segundos o 60 datos, obteniéndose de esta forma una curva de ajuste con la evolución histórica de los datos experimentales y siendo de esta forma menos variable frente a datos fuera de rango.

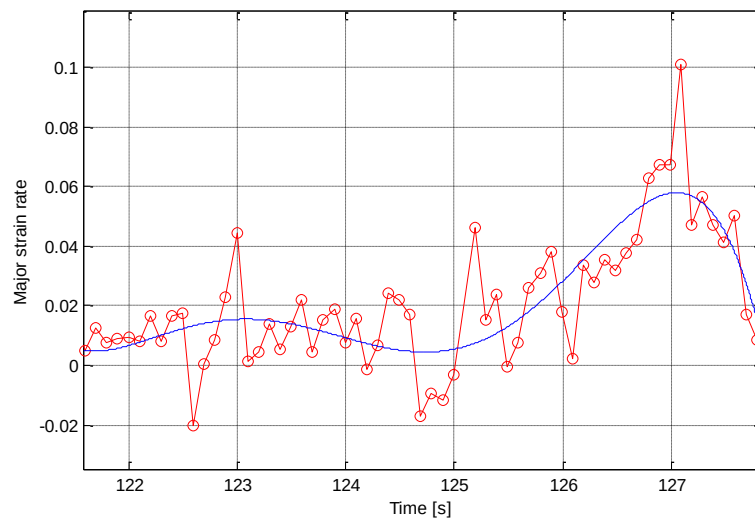


Fig. 5-14: Ajuste polinómico en curvas con ruido. Ensayo 10_3_9x5_sec1

5.3 Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados, tanto para la metodología ISO 12004-0 como para la metodología temporal.

Otro parámetro que también influye considerablemente es el diámetro del punzón. Para ensayos en los existen gradientes de deformación elevados, se obtienen curvas de deformación menos homogéneas y más irregulares que en ensayos con punzones de mayor diámetro.

5.3.1 Metodología ISO 12004-2

Los resultados obtenidos para la metodología ISO 12004-2 para el punzón hemisférico de diámetro 100 mm se presentan en las tablas siguientes. Se mostrarán en primer lugar los resultados obtenidos para cada uno de las tres probetas, representándose al final una tabla con los valores medios. Se tomaran en cuenta dos consideraciones; en primer lugar y enfocando el estudio a las probetas independientemente, se evaluará en que paso se obtienen las desviaciones más pequeñas. Esto nos dará información de cómo de estable es una malla en concreto. En segundo lugar y enfocando el estudio a un análisis más general del conjunto, se evaluará la convergencia de la faceta. De este modo se garantizará que las deformaciones tienden a un valor constante por mucho que se reduzca la malla.

Malla	<i>15x15</i>	<i>15x13</i>	<i>15x11</i>	<i>15x9</i>	<i>13x13</i>	<i>13x11</i>	<i>13x9</i>	<i>11x11</i>	<i>11x9</i>	<i>11x7</i>
Probeta I	0,2415	0,2425	0,2591	0,257	0,2523	0,2579	0,2579	0,2487	0,2686	0,2583
Probeta II	0,2171	0,2408	0,2422	0,2357	0,2212	0,2319	0,2403	0,2403	0,2454	0,2438
Probeta III	0,2024	0,2311	0,2249	0,2273	0,222	0,2307	0,2312	0,2225	0,2333	0,2379
Media	0,2203	0,2381	0,2421	0,2400	0,2318	0,2402	0,2431	0,2372	0,2491	0,2467
σ	0,0197	0,0062	0,0171	0,0153	0,0177	0,0154	0,0136	0,0134	0,0179	0,0105

Tabla 5-3: Resultados obtenidos con ensayos Nakajima

Para obtener una idea más clara de los resultados obtenidos, se representan los valores de la tabla en un gráfico.

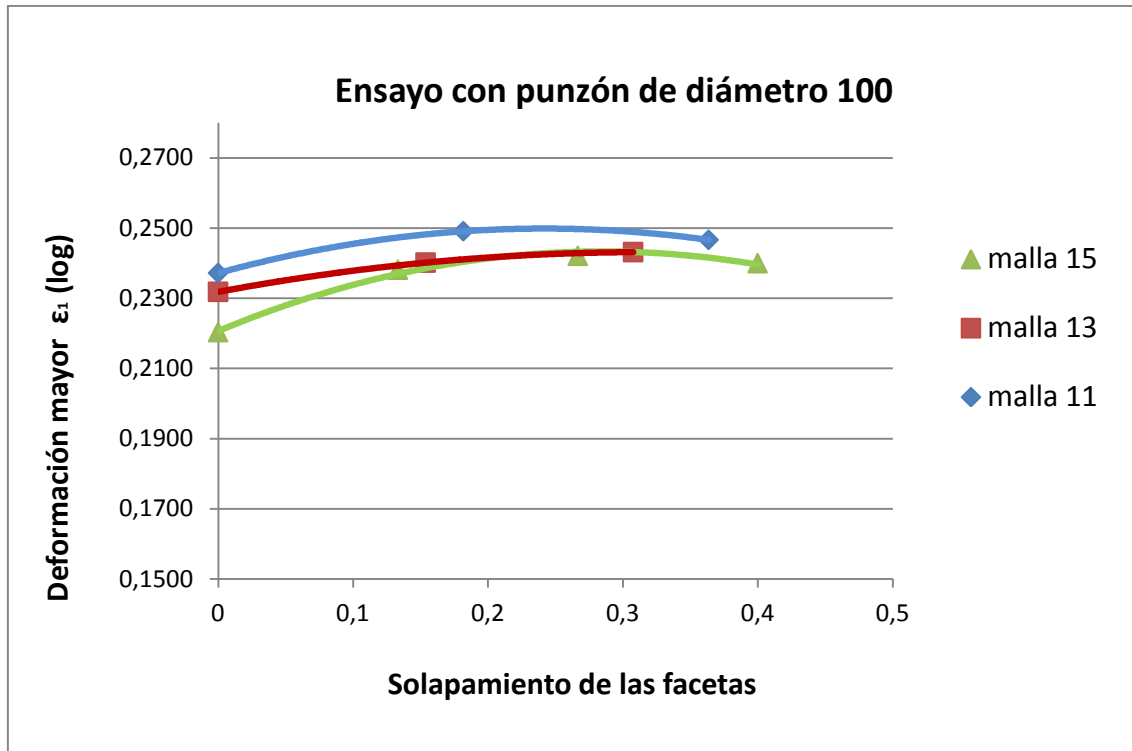


Fig. 5-15: Resultados de análisis con punzón hemisférico de diámetro 100 mm para metodología ISO 12004-2

A tenor de los resultados anteriores, se puede observar que para las tres mallas analizadas, se obtienen curvas convergentes que tienden a un valor constante de la deformación límite. También se observa que a medida que se disminuye el tamaño de faceta (malla 15,13 y 11), las deformaciones se van incrementando. Por ello, y dado , que cuanto mayor es el tamaño de la faceta y del paso, el tiempo de análisis computacional es menor, y considerando que para un mayor solapamiento la estabilidad de los resultados es peor, se da por idónea la utilización de una malla de 15x11.

5.3.2 Metodología Temporal

Para poder entender los resultados obtenidos para la metodología temporal, se representa en primer lugar un estudio visual de la tipología de las curvas obtenidas en función del tipo de malla utilizada. Por eso se comenta en un primer apartado, como afecta el solapamiento y la reducción del tamaño de faceta de la malla con una inspección visual, para pasar posteriormente a un análisis más exhaustivo de los resultados.

5.3.2.1 Consideraciones generales

Como se podrá observar en las figuras representadas en este apartado, para solapamientos del 0 % se obtienen curvas bastante homogéneas presentando los datos experimentales una morfología bastante similar a la esperada. Conforme se aumenta el solapamiento, el ruido en las

curvas aumenta considerablemente. De manera similar, aunque de forma menos progresiva, conforme se disminuye el tamaño de faceta aumenta el ruido.

A continuación se muestra un conjunto de gráficas en las que se comparan estas apreciaciones, mostrándose las mallas con tamaños de faceta de 15, 13, 11 y con solapamientos de 0 % al máximo analizado en cada tipo de malla, todos ellos para el punzón de 20 mm.

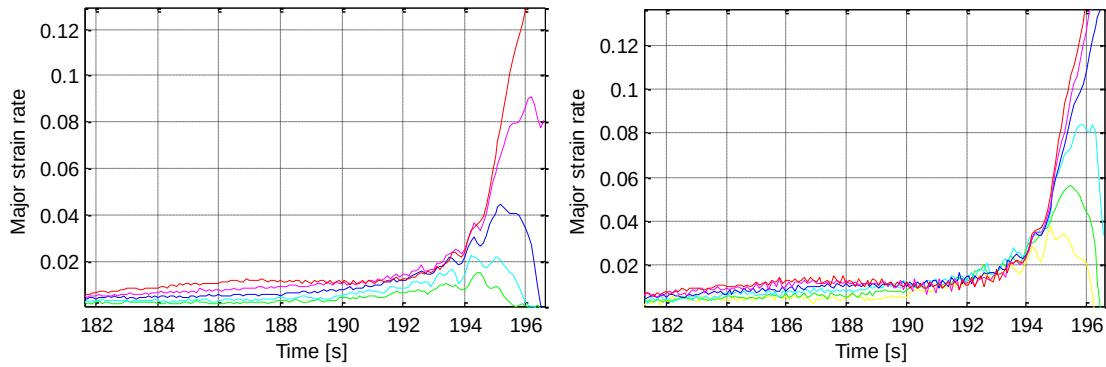


Fig. 5-16: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 20 mm y mallas 15x15 (izquierda) y 15x9 (derecha)

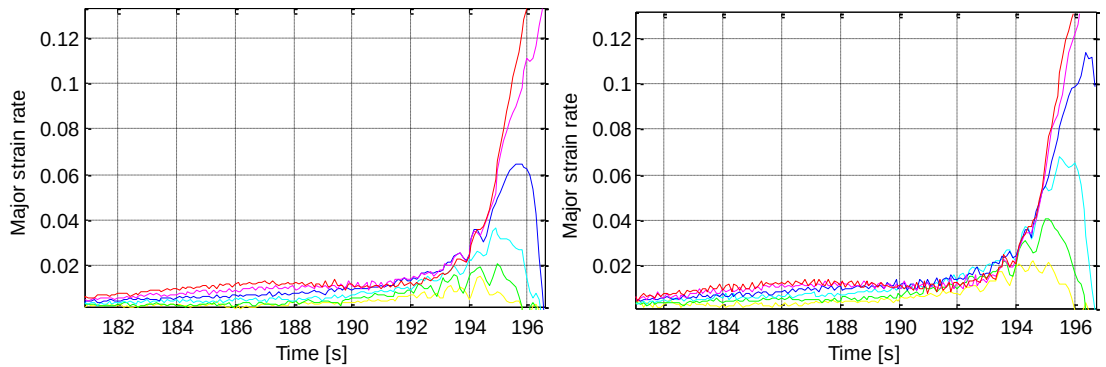


Fig. 5-17: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 20 mm y mallas 13x13 (izquierda) y 13x9 (derecha)

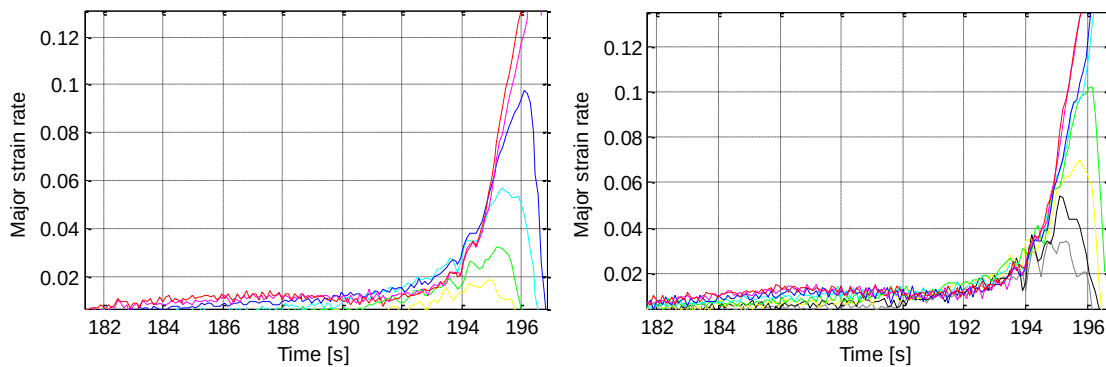


Fig. 5-18: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 20 mm y mallas 11x11 (izquierda) y 11x7 (derecha)

Para no desvirtuar las gráficas, se representan todas con las mismas dimensiones de los ejes, garantizando de esta forma una misma escala y pudiéndose comparar así el ruido producido en las mismas.

De la misma forma, se muestran en el siguiente grupo de gráficas los ensayos realizados para el punzón de $\varnothing$ 10 mm.

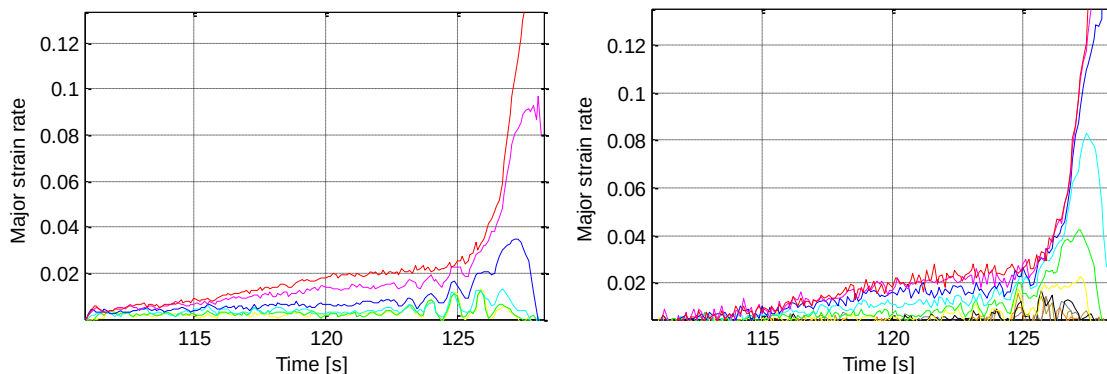


Fig. 5-19: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 10 mm y mallas 15x15 (izquierda) y 15x7 (derecha)

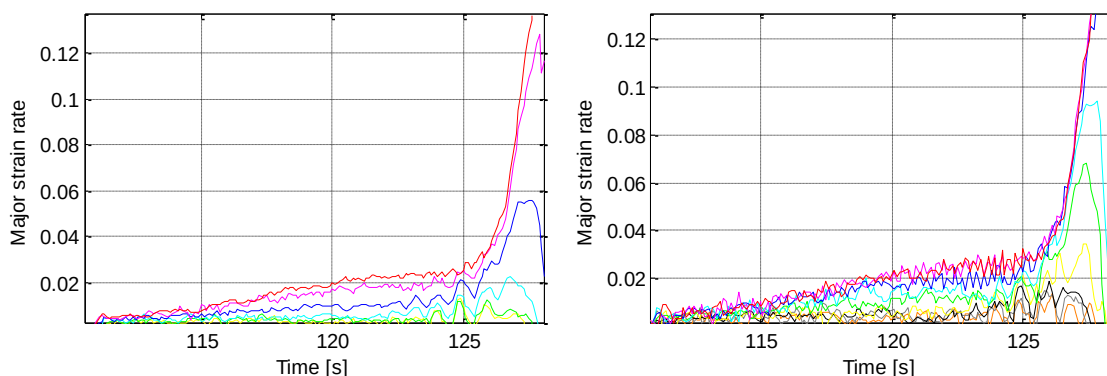


Fig. 5-20: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 10 mm y mallas 13x13 (izquierda) y 13x7 (derecha)

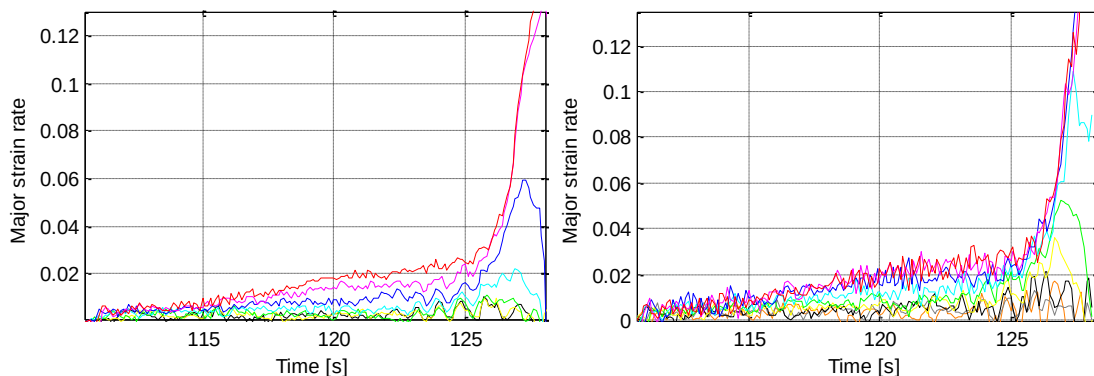


Fig. 5-21: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 10 mm y mallas 11x11 (izquierda) y 11x7 (derecha)

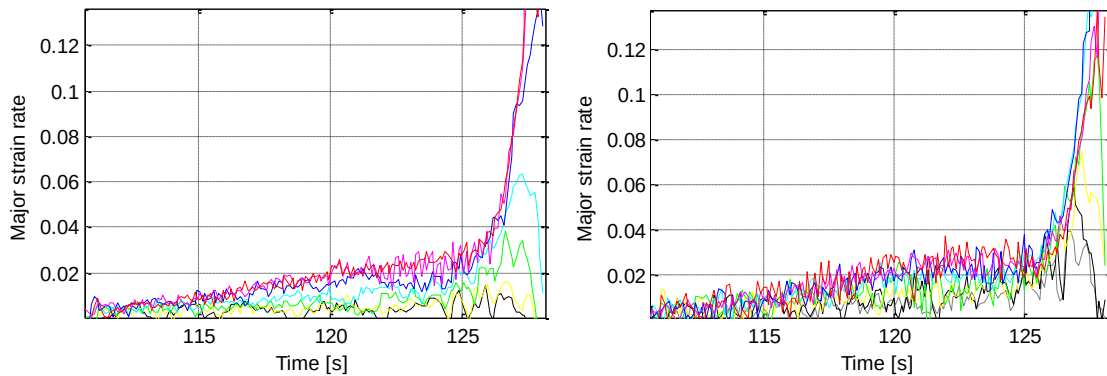


Fig. 5-22: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 10 mm y mallas 9x9 (izquierda) y 9x5 (derecha)

En este caso, se analizaron mallas de tamaños de hasta 9 mm y con niveles de solapamiento superiores (paso de hasta 7 píxeles). De las diferentes gráficas analizadas, tanto para el punzón de 20 mm como el de 10, se aprecian diferentes conclusiones. En primer lugar se aprecia un aumento considerable del ruido cuando se aumenta el nivel de solapamiento. De la misma forma aunque de forma menos considerable, cuando se disminuye el tamaño de faceta vuelve a aumentar el ruido en las curvas. Esto plantea la siguiente conclusión; es lógico suponer que las curvas óptimas serán aquellas con el tamaño de faceta y paso adecuado, es decir, entre dos curvas seleccionables, se elegirán aquellas con tamaño de faceta mayor y nivel de solapamiento menor, disminuyendo de esta forma el posible ruido y con esto posibles errores.

Una vez analizada la influencia entre el tamaño de faceta y el paso, sería lógico investigar la influencia del gradiente de deformación y el tamaño de faceta. Para ello se representan en las siguientes gráficas y para las probetas ensayadas con punzones de 20 y 10 mm las curvas obtenidas con diferentes tamaños de faceta y solapamiento fijo del 0 %.

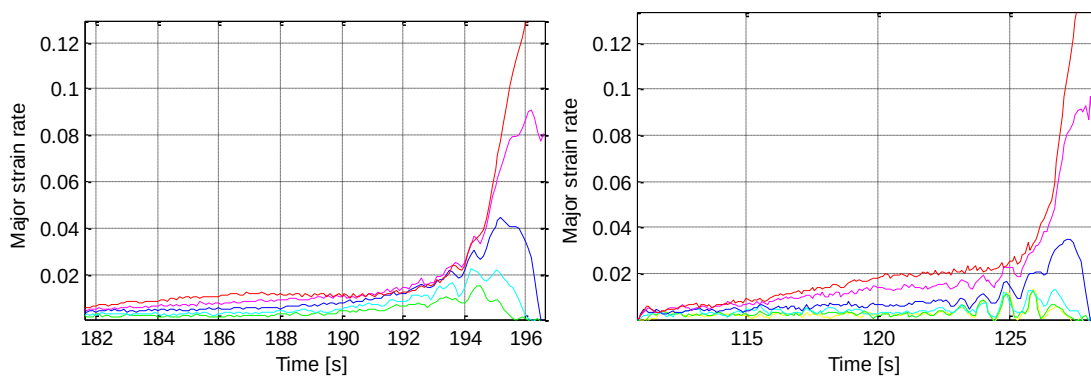


Fig. 5-23: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 20 mm (izquierda) y 10 mm (derecha), con mallas de 15x15

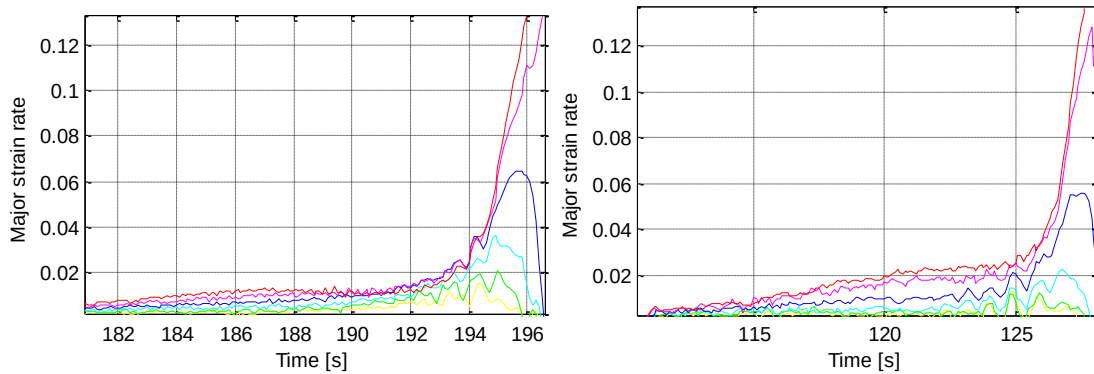


Fig. 5-24: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 20 mm (izquierda) y 10 mm (derecha), con mallas de 13x13

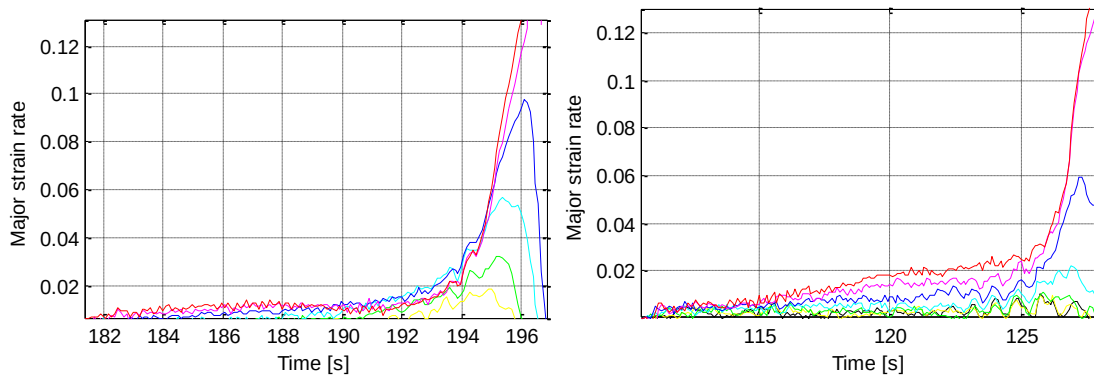


Fig. 5-25: Velocidad de deformación para ensayos con punzón 20 mm (izquierda) y 10 mm (derecha), con mallas de 11x11

Este último conjunto de gráficas nos indica una gran apreciación. El ruido aparecido en las diferentes curvas casi no depende del gradiente de deformación de las probetas ensayadas.

5.3.2.2 Resultados para los distintos punzones

Tras el análisis general realizado para los diferentes ensayos, se procede a cuantificar las deformaciones obtenidas, así como a realizar un análisis más exhaustivo de los datos generados por el software SEENECK. Se analizarán los datos para distintos punzones, diámetro 100, 20 y 10 mm respectivamente. La información se mostrará de dos maneras; en primer lugar se indicaran las deformaciones límites en una tabla con la media de las tres probetas para tres secciones, y para todas las mallas analizadas. Posteriormente se representarán mediante curvas los datos anteriormente obtenidos. Estas curvas se corresponderán con los tamaños de faceta utilizados. En el eje X se muestra el solapamiento, mientras que en el eje Y se colocan los valores de la deformación mayor límite.

Ensayo con punzón de diámetro 100.

Malla	15x15	15x13	15x11	15x9	13x13	13x11	13x9	11x11	11x9	11x7
Sección I	0,2384	0,2415	0,2471	0,2461	0,2458	0,2496	0,2490	0,2510	0,2568	0,2556
Sección II	0,2410	0,2315	0,2375	0,2453	0,2439	0,2436	0,2480	0,2452	0,2598	0,2572
Sección III	0,2449	0,2293	0,2344	0,2404	0,2391	0,2435	0,2479	0,2384	0,2466	0,2639
Media	0,2414	0,2341	0,2397	0,2439	0,2429	0,2456	0,2483	0,2449	0,2544	0,2589
σ	0,0033	0,0065	0,0066	0,0031	0,0035	0,0035	0,0006	0,0063	0,0069	0,0044

Tabla 5-4: Resultados obtenidos con punzón hemiesférico de Ø 100 mm

A la vista de los resultados, se pueden extraer algunas conclusiones. En primer lugar, se aprecia una tendencia de incremento de la deformación conforme aumenta el porcentaje de solapamiento. En segundo lugar también se observa que conforme se disminuye el tamaño de faceta, las deformaciones límites también se incrementan. De todas formas, estas dos apreciaciones se observan mucho mejor en la figura 5-26 que posteriormente se mostrará.

De los datos que aparecen en la tabla, se puede comprobar que los valores se encuentran entre unos valores del 23.41 % y 25.89 %, es decir, que todos los datos se encuentran en un margen de un 2.48 % de deformación mayor límite.

Las gráficas obtenidas se muestran en la siguiente tabla. Se representan tres curvas (cada una para un tamaño de faceta analizada) y cada curva está compuesta por los datos obtenidos para distintos niveles de solapamiento.

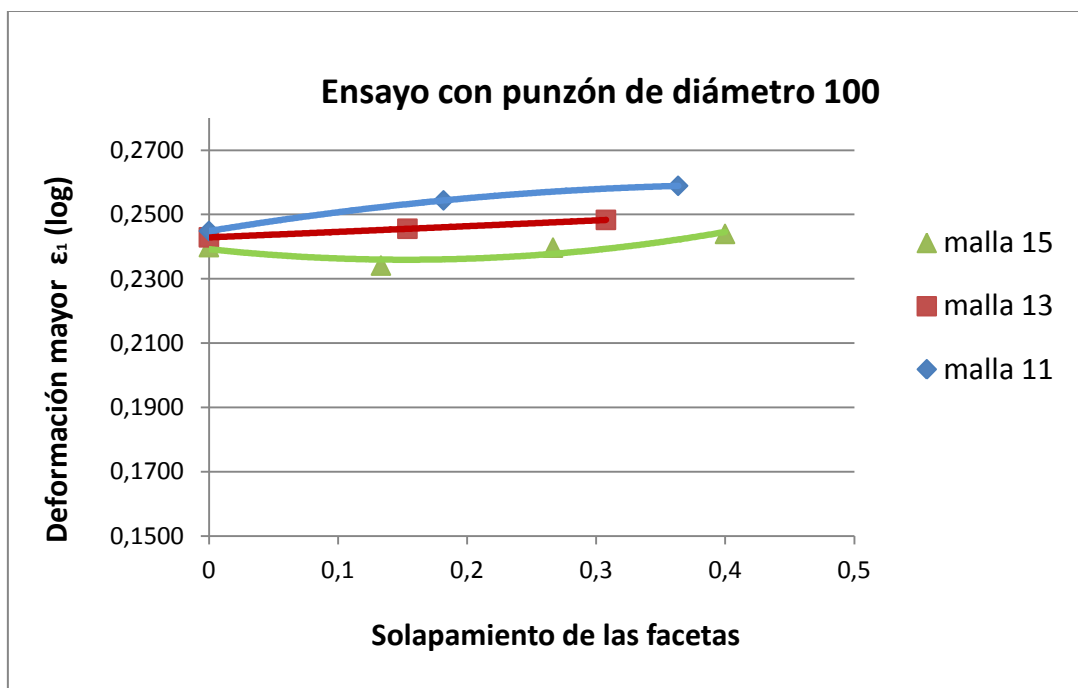


Fig. 5-26: Resultados de análisis con punzón hemiesférico de Ø 100 mm para metodología temporal

Los comentarios que se indicaron tras el análisis de la tabla 5-4, se confirman en la gráfica 5-26. Se aprecia notablemente como conforme se disminuye el tamaño de faceta, el valor de las deformaciones aumenta. De hecho, no solo ocurre este acontecimiento, sino que se hace en bloque independientemente del nivel de solapamiento. Esto quiere decir, que la malla con tamaño de faceta 15, sea cual sea el solapamiento, se encuentra con unos niveles de deformación mayor límite inferiores a la malla con tamaño de faceta 13. De la misma forma ocurre entre las curvas correspondientes a tamaños de faceta de 13 y 11.

Aparte de las anotaciones anteriormente aportadas que se confirman con los datos de las tablas y las gráficas, se aprecian en esta última una nueva aportación, y es la tendencia que presentan las mismas. Como se puede observar, para la malla de tamaño de faceta 15 se obtiene una curva divergente, es decir, no se puede garantizar a partir de qué porcentaje de solapamiento se obtiene un valor constante de deformación. Sin embargo, las dos curvas siguientes (tamaño de faceta 13 y 11) sí que presentan una tendencia convergente, por lo que tienden a un valor constante de la deformación mayor límite.

Ensayo con punzón de diámetro 20

De la misma manera que se realiza el estudio para las probetas ensayadas con punzón de diámetro 100 mm, se recopilan los resultados para las distintas probetas ensayadas con punzón de diámetro 20 mm. En este caso, los valores se muestran en la tabla 5-5.

Malla	15x15	15x13	15x11	15x9	13x13	13x11	13x9	11x11	11x9	11x7
Sección I	0,2600	0,2823	0,2827	0,3040	0,2775	0,2843	0,2840	0,2969	0,2998	0,3050
Sección II	0,2823	0,2676	0,2822	0,2844	0,2764	0,2802	0,2926	0,2777	0,3121	0,3019
Sección III	0,2740	0,2887	0,2948	0,3075	0,2829	0,2940	0,3319	0,3053	0,3233	0,3424
Media	0,2721	0,2796	0,2865	0,2986	0,2789	0,2861	0,3028	0,2933	0,3118	0,3164
σ	0,0113	0,0108	0,0071	0,0125	0,0035	0,0071	0,0256	0,0142	0,0118	0,0225

Tabla 5-5: Resultados obtenidos con punzón cilíndrico de $\varnothing$ 20 mm

En esta nueva tabla de resultados, se observan nuevamente las características comentadas para los ensayos con punzón de diámetro 100 mm. Se observa una tendencia ascendente en los valores de deformación mayor límite a medida que se aumenta el nivel de solapamiento y se disminuye el tamaño de faceta. Todos los valores de deformación se encuentran en un margen entre el 27.21 % y el 31.64 %, es decir un 4.43 %. En este caso es un poco superior al rango obtenido para probetas ensayadas con punzón de diámetro 100.

Para un completo estudio de los datos, en la gráfica 5-27 se muestran los datos obtenidos de las diferentes mallas.

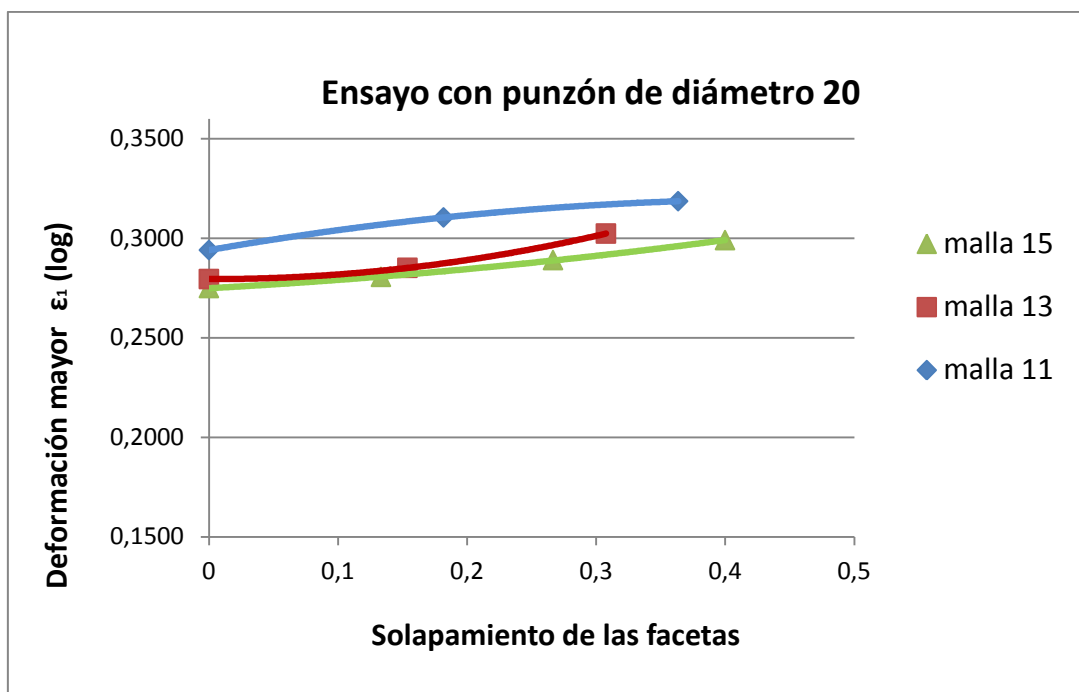


Fig. 5-27: Resultados de análisis con punzón cilíndrico de Ø 20 mm para metodología temporal

Las apreciaciones aportadas anteriormente vuelven a coincidir para estos nuevos datos. De nuevo se observan como las curvas obtenidas se posicionan en valores de deformación límite en orden ascendente para los tamaños de mallas de 15, 13 y 11 respectivamente. Sin embargo, en esta ocasión las curvas con tamaño de malla de 15 y 13 presentan una tendencia divergente, mientras que la de tamaño 11 es convergente.

Ensayo con punzón de diámetro 10

Los resultados obtenidos para el punzón de diámetro 10 mm son los que se representan en la siguiente tabla.

Malla	15x15	15x13	15x11	15x9	13x13	13x11	13x9	11x11	11x9	11x7
Sección I	0,2839	0,2889	0,2853	0,2947	0,2936	0,2911	0,3079	0,3006	0,2977	0,3189
Sección II	0,3017	0,3159	0,3106	0,3180	0,3052	0,3094	0,3031	0,3014	0,3153	0,3311
Sección III	0,3017	0,2885	0,3108	0,3202	0,3112	0,3076	0,3170	0,3086	0,3156	0,3273
Media	0,2957	0,2977	0,3022	0,3110	0,3033	0,3027	0,3093	0,3035	0,3095	0,3258
σ	0,0103	0,0157	0,0147	0,0141	0,0090	0,0100	0,0071	0,0044	0,0102	0,0062

Tabla 5-6: Resultados obtenidos con punzón cilíndrico de Ø 10 mm

Para este nuevo estudio, se observa una tendencia ascendente en los valores de deformación mayor límite a medida que se aumenta el nivel de solapamiento y se disminuye el tamaño de

faceta. Todos los valores de deformación se encuentran en un margen del 29.57 % al 32.58 %, es decir un 3.01 %.

En la gráfica 5-28 se muestran los datos obtenidos de las diferentes mallas para las probetas ensayadas con punzón de diámetro 10mm.

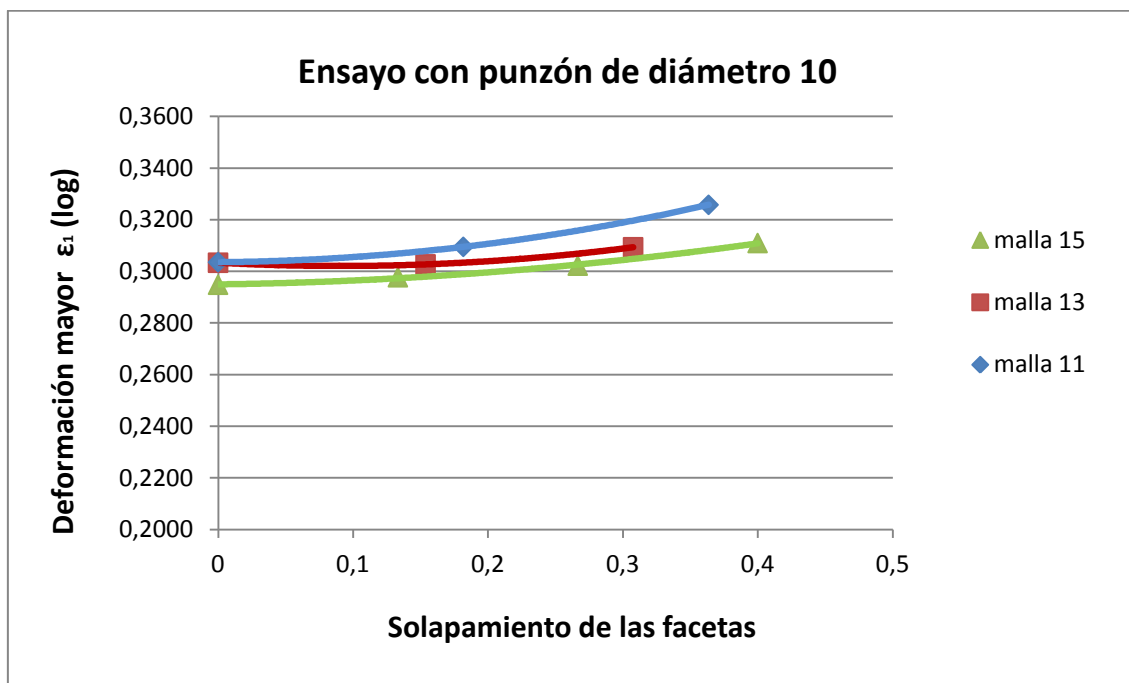


Fig. 5-28: Resultados de análisis con punzón cilíndrico de Ø 10 mm para metodología temporal

Como se observa en la figura 5-28, todas las mallas analizadas presentan una geometría divergente, lo que sugiere que no se puede estimar a que valor convergerían los resultados y no pudiéndose garantizar si los valores obtenidos son o no válidos.

Estos resultados plantean 2 modificaciones al estudio. El primero sería el de incrementar el solapamiento, aunque ello plantearía dos inconvenientes; elevar los tiempos de cálculo y la aparición de ruido en las curvas. El segundo es el disminuir el tamaño de faceta con los mismos solapamientos.

A raíz de estas dos opciones, se plantea realizar las dos conjuntas, es decir, a las mallas ya existentes se le añade una curva más con mayor solapamiento y aparte, se crea una malla con una faceta inferior a la más pequeña utilizada hasta el momento (tamaño de faceta 9). Los resultados se aprecian en la siguiente tabla.

Malla	15x15	15x13	15x11	15x9	15x7	13x13	13x11	13x9	13x7	11x11	11x9	11x7	9x9	9x7	9x5
Sección III	0,3017	0,2885	0,3108	0,3202	0,3464	0,3112	0,3076	0,3170	0,3458	0,3086	0,3156	0,3273	0,3068	0,3403	0,3514

Tabla 5-7: Resultados obtenidos con punzón cilíndrico de diámetro 10 mm en ensayo 3

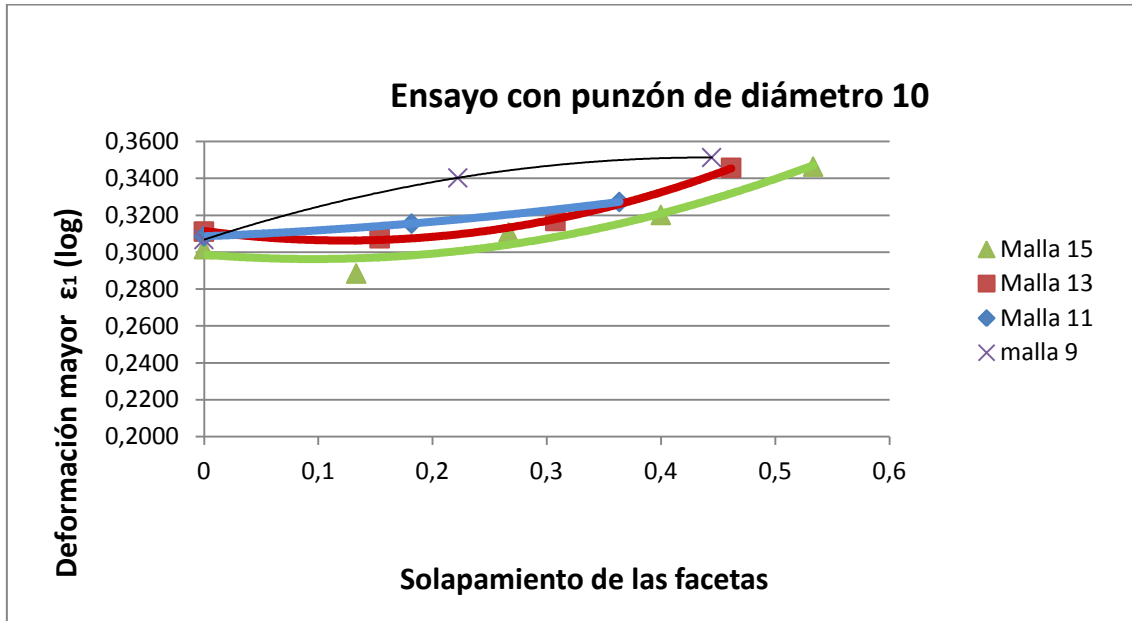


Fig. 5-29: Resultados de análisis con punzón cilíndrico de $\varnothing$ 10 mm para metodología temporal en ensayo 3.

A la vista de los resultados obtenidos, se obtienen dos conclusiones:

- En primer lugar, un aumento del solapamiento no tiene porqué producir beneficios, ni hace que las curvas tiendan a converger si el tamaño de malla no es el adecuado.
- En segundo lugar, a medida que se disminuye la malla (y por tanto la faceta), se obtienen resultados convergentes con poco nivel de solapamiento.