

2 Metodologías

En el presente capítulo se describirán las tres metodologías que se podrán utilizar en el programa SEENECK para la determinación de las deformaciones límites.

2.1 Diagrama límite de conformado

Un diagrama límite de conformado (DLC) es un diagrama que contiene los puntos para las deformaciones mayores/menores permitiendo hacer la distinción entre los puntos favorables y los puntos de estricción o de rotura. La frontera entre dichos puntos se define mediante la curva límite de conformado (CLC). En la práctica, se modifican los punzones utilizados en las embuticiones para conseguir que todos los puntos se encuentren en la zona favorable.

Las curvas del límite de conformado (CLC) se determinan para materiales específicos a fin de definir el nivel hasta donde se pueden deformar mediante embutición, estiramiento, o cualquier combinación de embutición y estiramiento. Esta capacidad queda limitada por la aparición de una rotura o de una estricción localizada. Existen muchos métodos para determinar el límite de conformado de un material.

Para obtener estas curvas es necesario realizar ensayos para diferentes caminos de deformación de la chapa. Esto se consigue variando la geometría de las probetas a fin de abarcar los distintos modos de deformación. En la figura 2-1 se puede observar los distintos caminos de deformación.

Atendiendo al convenio en el que la deformación principal ε_1 es aquella en la que la deformación es mayor, se tiene que todo punto del diagrama de deformaciones debe caer a la izquierda de la diagonal del primer cuadrante ($\beta \leq 1$) definiéndose el parámetro $\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}$. El segundo límite se obtiene considerando que en un proceso de conformado de chapa deben aparecer tensiones de tracción. En el caso de límite se obtendría $\sigma_1 = 0$ por lo que $\sigma_2 \leq 0$, caso en el que se obtendría un valor de $\beta = -2$. De esta forma queda establecido que los límites de nuestro diagrama es el siguiente:

$$-2 \leq \beta \leq 1$$

Según el valor que se tenga de β , tendremos los distintos modos de deformación de la chapa. A continuación se explicaran de forma concisa estos caminos de deformación:

- Tensión biaxial ($\beta = 1$): En este caso las tensiones σ_1, σ_2 son iguales, por lo que el círculo inicial se expandirá obteniéndose otro círculo de mayores dimensiones.

- Deformación plana ($\beta = 0$): En este caso, el material en el plano de la chapa se deforma en una única dirección ($d\varepsilon_2 = 0$), manteniéndose prácticamente nula la otra.

Todos los estudios realizados en este proyecto utiliza este modo de deformación. Para ello se indicará la geometría de la probeta específica.

- Tracción uniaxial ($\beta = -1/2$): En este caso, la deformación ocurre con una $\sigma_2 = 0$.

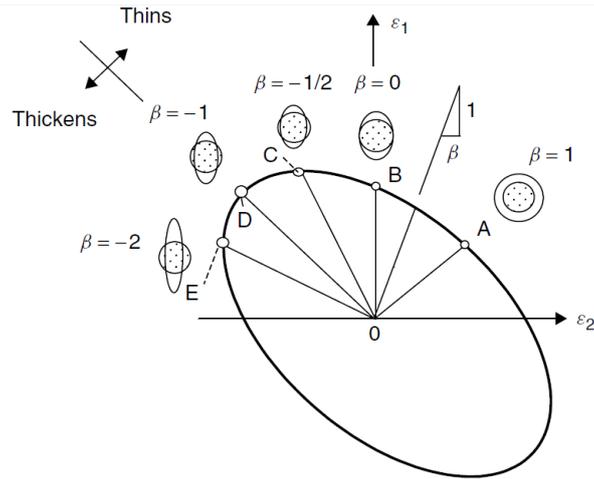


Fig. 2-1: Diagrama de deformaciones principales con diferentes modos de deformación

Dependiendo del tipo de fallo se puede distinguir entre la CLC en el inicio de la estricción localizada (CLCE) y la CLC al principio de la fractura dúctil (CLCF). La Fig. 2-2 muestra la evolución típica de las CLCE y CLCF que se observan en los experimentos. Como puede apreciarse, la CLCE normalmente presenta una curva en forma de V, decreciente en el lado de la izquierda ($\beta = d\varepsilon_2/d\varepsilon_1 < 0$) y creciente en el lado de la derecha ($\beta \geq 0$ o región de estirado biaxial). Las tendencias de la CLCF dependen otra vez de la ductilidad del material.

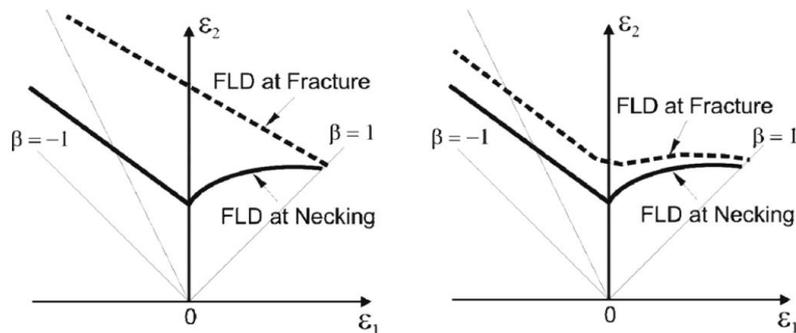


Fig.2-2: Esquemas del FLD experimental con las curvas de fallo típicas

2.2 Metodología ISO 12004-2

La metodología ISO 12004 basada en el análisis espacial, establece un procedimiento estandarizado para la determinación de las deformaciones límites. Está enfocado a ensayos tipo Nakajima o Marciniak. En el caso del ensayo tipo Nakajima, se utiliza un punzón hemisférico, mientras que en el de Marciniak, el punzón es plano. En ambos casos, se utilizan punzones con geometrías estandarizadas.

En la figura 2-3 se muestran los punzones anteriormente comentados. A la izquierda se representa el montaje del ensayo tipo Nakajima, mientras que la figura de la derecha representa el montaje del ensayo tipo Marciniak.

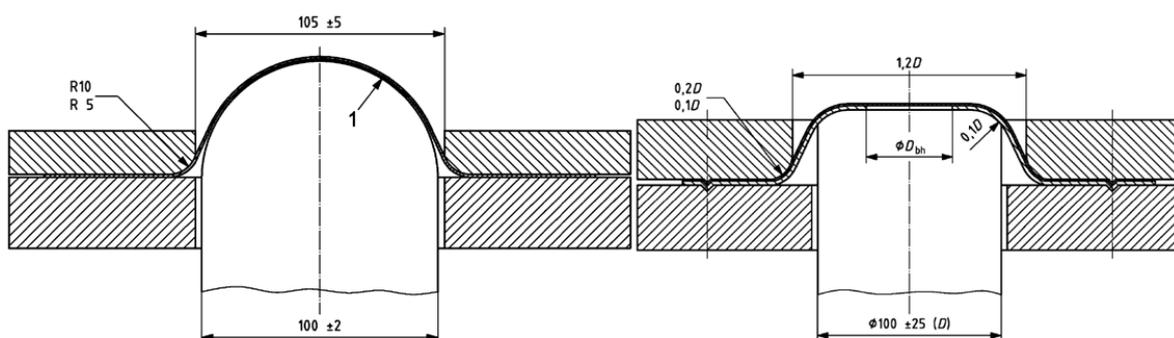


Fig. 2-3: Montaje de ensayos Nakajima y Marciniak

Esta parte de la Norma ISO 12004 especifica las condiciones de ensayo que se han de utilizar cuando se determina la curva del límite de conformado (CLC) a temperatura ambiente y utilizando trayectorias de deformación lineal. El material que se considera es plano, metálico y de espesor comprendido entre 0,3 mm y 4 mm, siendo para el acero un valor aconsejado de 2,5 mm.

También se estandariza el resto de condiciones de ensayo, como pueden ser el tipo de lubricación, la velocidad del punzón, direcciones de los ensayos o geometrías de las probetas.

Para el caso de la geometría, se recomienda probetas entalladas con una parte central calibrada, de longitud superior al 25% del diámetro del punzón (para un punzón de 100 mm: con longitud del eje preferentemente entre 25 y 50 mm; el radio de acuerdo entre 20 y 30 mm). En la figura 2-4 se representa la geometría de la probeta utilizada con las características anteriormente comentadas.

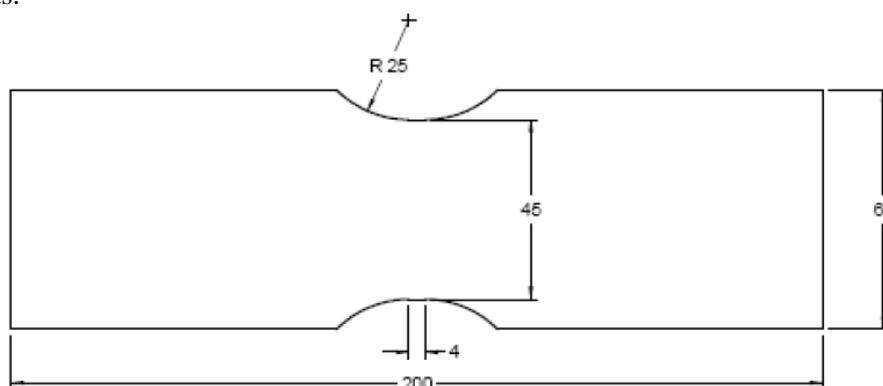


Fig. 2-4: Dimensiones de probetas de deformación plana

Según las indicaciones descritas por la ISO, el procedimiento para determinar las deformaciones límites se articulan cinco pasos:

- Definición de la posición de la grieta. En primer lugar se calcula la posición del valor más alto de ε_1 . Una vez obtenida, se toman todos los valores comprendidos entre una ventana de 4 mm a cada lado del valor ε_1 calculado anteriormente. Se realiza un ajuste parabólico de esta serie de datos, siendo el máximo la posición de la grieta.
- Determinación de los límites interiores. Se determina la segunda derivada, filtrada y sin filtrar (según se comentará en capítulos posteriores) a cada lado de la fractura. Se calcula la posición de los máximos (para la derivada filtrada y sin filtrar) a cada lado. Si existen menos de dos puntos de diferencia de los máximos locales de los datos filtrados o sin filtrar, se toma la posición del valor sin corregir.
- Determinación de los límites exteriores. Se calcula la ventana de ajuste por la siguiente expresión:

$$\omega = 10\left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}_2}{\bar{\varepsilon}_1}\right)$$

donde $\bar{\varepsilon}_1$ y $\bar{\varepsilon}_2$ son los valores medios de la deformación principal en cada uno de los límites. Por ventana de ajuste se entiende el espacio comprendido entre los límites exteriores y los interiores, a cada lado de la posición de la grieta

- Determinación de la deformación principal límite $\varepsilon_{1,lim}$. Se toman los valores existentes dentro de las ventanas de ajuste y se realiza el ajuste de una parábola inversa en el sentido de los mínimos cuadrados. El valor de dicha parábola en la posición de la grieta determina el valor de la deformación principal límite.
- Determinación de la deformación en el espesor límite $\varepsilon_{3,lim}$. Con las ventanas de ajuste obtenidas anteriormente, se procede a calcular el valor de la deformación en el espesor de la misma manera que para la deformación principal límite. En este caso se realiza el mejor ajuste en el sentido de los mínimos cuadrados de la parábola inversa a los datos experimentales de la deformación en el espesor. Una vez obtenida $\varepsilon_{3,lim}$, se calcularía la deformación menor límite según la conservación de volumen.

$$\varepsilon_{1,lim} + \varepsilon_{2,lim} + \varepsilon_{3,lim} = 0$$

Todo este procedimiento se comprende mucho mejor si se visualizan los resultados experimentales, así como todas las condiciones para determinar las deformaciones límites.

Como se puede observar en la figura 2-5, en primer lugar se representa con el número 1 los datos experimentales de la deformación principal obtenidos en laboratorio. Tal y como se indica en el paso 2, se procede a obtener los límites interiores, para ello se calculan los valores de la derivada filtrada y sin filtrar (número 4) determinándose de esta manera los límites interiores. Estos límites se representan con el número 5. A continuación se calculan las ventanas de ajuste según las indicaciones establecidas en el paso 3. Estas ventanas contendrán los datos para

realizar el mejor ajuste de la parábola inversa en el sentido de los mínimos cuadrados. Este ajuste se representa en la figura por el número 6.

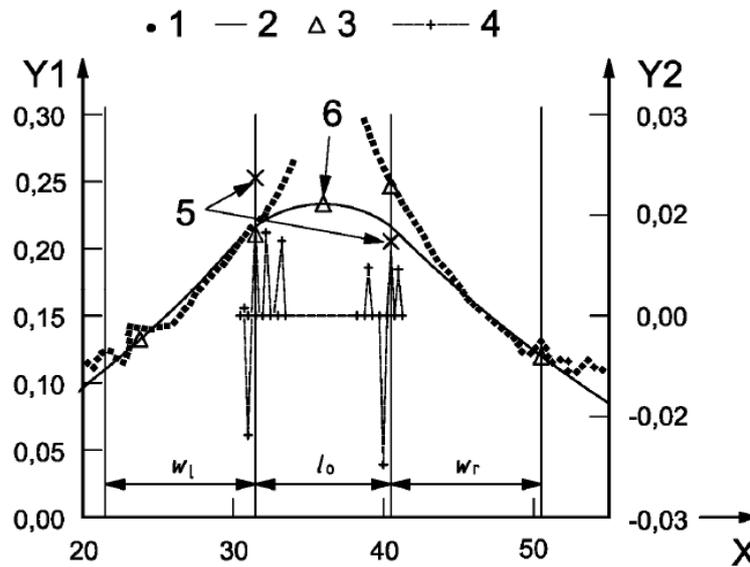


Fig. 2-5: Aplicación de la metodología ISO 12004-2

El principal objeto es realizar una automatización que realice este procedimiento automáticamente, ya que la gran cantidad de valores que se manejan hacen engorroso el cálculo manual. Para proceder a la automatización, la norma ya aporta un diagrama de flujo simplificado para tal fin. Este diagrama inicial se modificará considerablemente obteniéndose un algoritmo complejo que garantice su correcto funcionamiento. En capítulos posteriores se mostrará, tanto el diagrama de flujo utilizado, como los resultados obtenidos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo para la aplicación de la ISO 12004-2:2008.

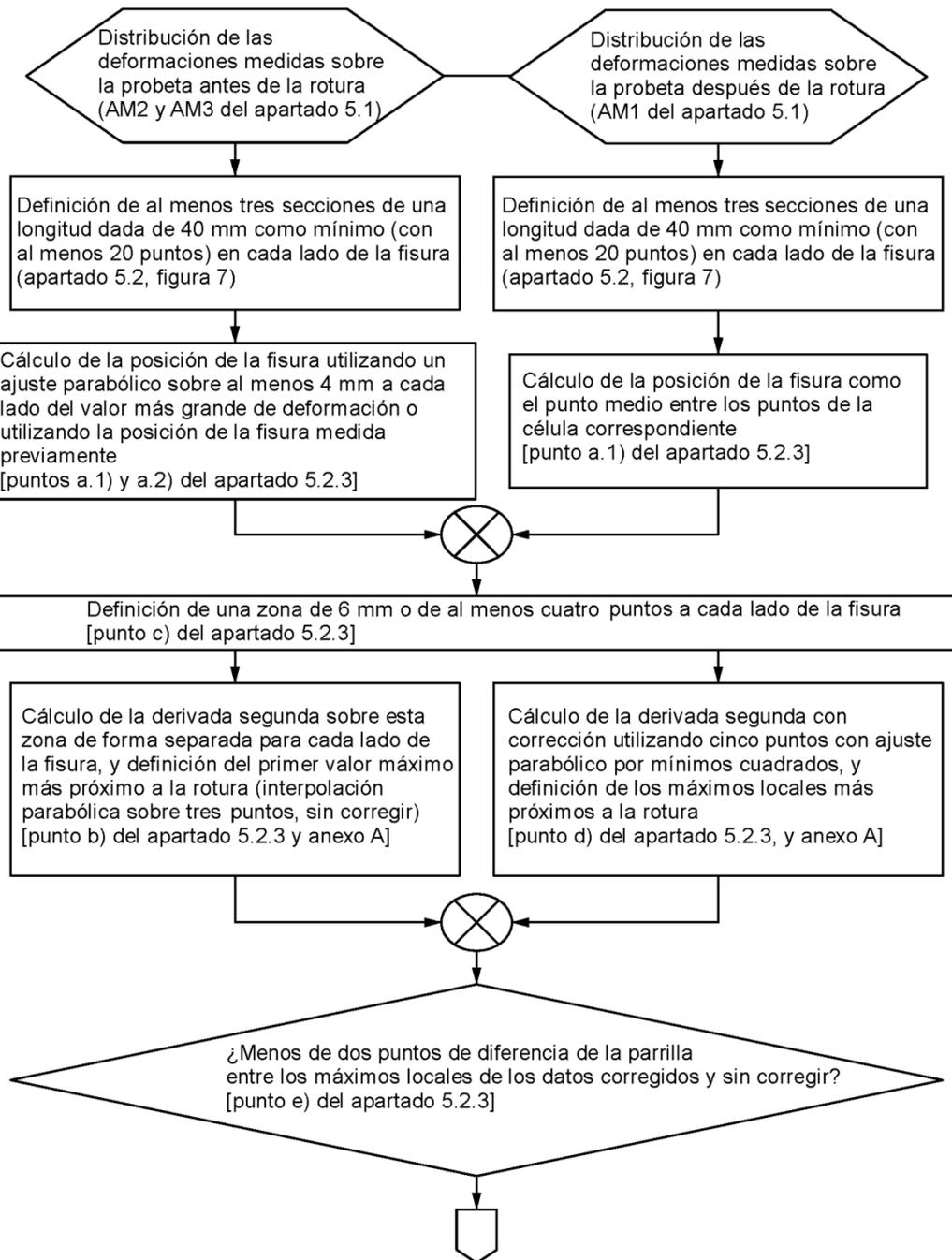


Fig. 2-6: Diagrama de flujo para metodología ISO 12004-2

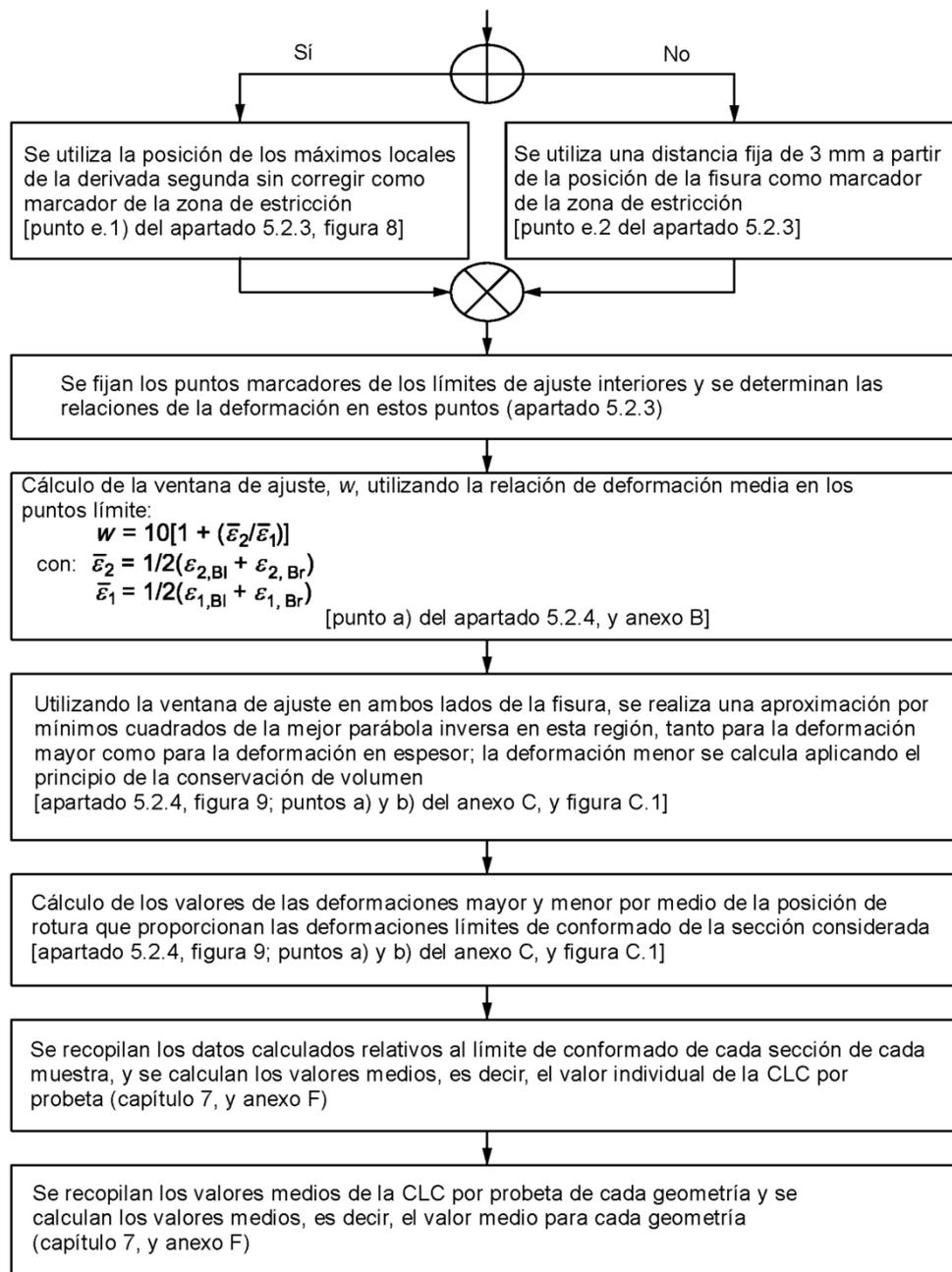


Fig. 2-7: Diagrama de flujo para metodología ISO 12004-2

2.3 Metodología temporal

Este método se basa en el estudio temporal de la distribución de la deformación principal ϵ_1 y su primera derivada (también llamada velocidad de deformación o strain rate) respecto al tiempo. Los datos son tomados discretamente en diferentes secciones perpendiculares a la zona de fractura.

La metodología se ha estructurado en 5 pasos para una mejor comprensión. A continuación se detalla el procedimiento:

- Obtención del ancho de la zona de estricción. El objetivo es identificar los dos últimos puntos que dejen de deformarse (uno a cada lado de la grieta) y que alcancen un cero en la velocidad de deformación justo antes de la aparición de la fractura. La región entre dichos puntos define el área donde se ha desarrollado la inestabilidad plástica. Típicamente, en la zona de estricción aparecen dos gradientes superpuestos, por un lado el impuesto por la curvatura del punzón a lo largo de la chapa y por otro el inherente al desarrollo de la inestabilidad. Por ello, dentro de la zona de estricción, habrá puntos que aumenten su velocidad hasta la rotura (punto B), otros que empiecen a reducirla pero no consigan llegar a cero en la fractura y por último aquellos que alcanzan velocidad nula justo un instante antes de la fractura, los cuales definen el ancho de estricción.
- Detección del inicio de la estricción. Se establece que el proceso de estricción se inicia cuando la velocidad de deformación en la frontera que define el área de la inestabilidad (Punto A) alcanza un máximo. Dicho máximo revela que la deformación ha empezado a localizarse en el interior de la zona de estricción (puntos entre A-B en Fig. 4-3). Por tanto, la reducción progresiva en la velocidad de deformación en dichos puntos frontera es consecuencia de que los puntos interiores a la zona de estricción han comenzado a deformarse inestablemente por el desarrollo de la estricción. Este suceso define claramente el instante de tiempo en que comienza la inestabilidad plástica ($t_{necking}$).
- Identificación del punto de fractura. El punto de fractura se obtiene identificando la curva de deformación más solicitada dentro de la zona de estricción, es decir, la que se encuentra por encima del resto durante el proceso.
- Determinación de la deformación principal máxima límite ($\epsilon_{1,lim}$): Esta se define como el punto más solicitado de la zona de estricción (punto B) el instante de comienzo de la estricción $t_{necking}$.
- Determinación de la deformación principal mínima límite ($\epsilon_{2,lim}$): De la misma forma se obtiene el valor para ϵ_2

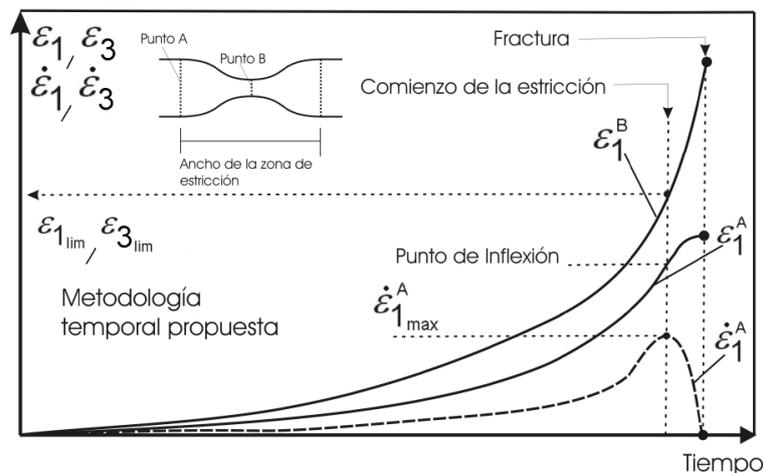


Fig. 2-8: Aplicación de la metodología Temporal

2.4 Metodología del valle

Dado que la estricción comienza cuando se produce una reducción del espesor de la chapa en una zona localizada, el utilizar un procedimiento que permita generar la geometría de la sección de la probeta en cada instante de tiempo y por consiguiente, poder visualizar el inicio de la estricción de la chapa, sería la mejor forma de poder comparar cualquier metodología.

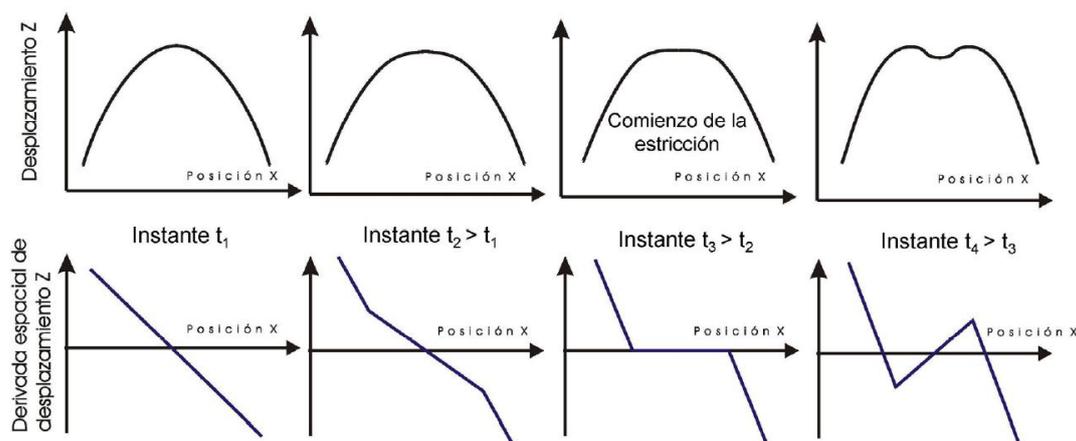


Fig. 2-9: Evolución del perfil de desplazamiento y derivada espacial en sección perpendicular a la fractura de la probeta.

Cada una de las curvas situadas en la parte superior de la figura 2-9, representa la cara exterior de la probeta en distintos instantes de tiempo. En instantes lejanos al fallo, se observa que la probeta adquiere la forma del punzón, mientras que en instantes cercanos al fallo, la curva empieza a achatarse en una zona localizada, llegando a producir el valle de la estricción.

Las curvas situadas en la parte inferior de la figura 2-9, representan el cambio de pendiente en la posición de la sección perpendicular a la fractura. Gracias a esta representación se puede distinguir más fácilmente el comienzo de la estricción. Como se observa en los instantes lejanos al fallo, la curva presenta pendiente negativa o decreciente. Conforme se acerca más a instantes cercanos a la fractura, la pendiente de la zona central tiende a cero llegando un instante en el que se hace positiva. Es en ese momento en el que se produce el comienzo de la estricción. Con este procedimiento incluso sería mucho más fácil de automatizar el cálculo, ya que establecería las condiciones de selección de la curva óptima.

Para poder evaluar esta metodología, es necesario obtener tanto la evolución temporal como la espacial de las deformaciones, por lo que se considera una metodología “position-time dependent method”.

Los pasos para la utilización de la metodología del valle se resumen en los siguientes puntos:

- Determinación del instante de comienzo de estricción: La forma de la sección de la cara externa de la probeta será de parábola invertida debido a la curvatura impuesta por el punzón. Dicha curva, conforme el tiempo progresa y se acerca el comienzo de la estricción, comenzará a achatarse en la zona superior, indicio evidente del comienzo de la inestabilidad plástica.

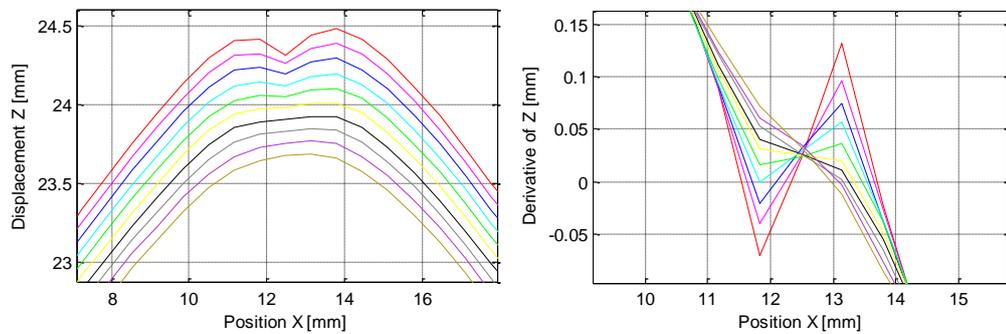


Fig. 2-10: Evolución del perfil de desplazamiento y de la derivada espacial en probeta de ensayo con punzón de 20 mm

- Selección del punto más solicitado. Se selecciona el punto más solicitado en la misma sección anteriormente comentada. Sin embargo la forma de localizarlo es representar la evolución temporal de distintos puntos a lo largo de esta sección.
- Obtención de la deformación mayor límite. Una vez que se establece el instante de comienzo de estricción, bastaría con identificar el stage seleccionado en la evolución temporal de la curva más solicitada.

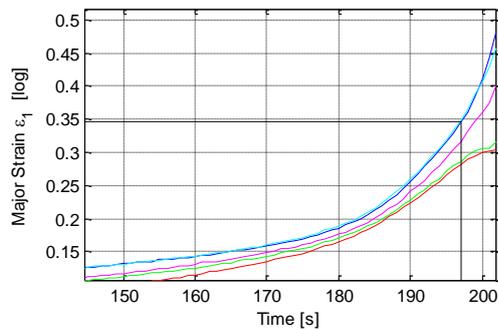


Fig. 2-11: Evolución de la de deformación mayor límite en los 5 puntos más próximos a la fractura.