

2 Revisión de metodologías experimentales

Como se ha dicho anteriormente, la determinación precisa del inicio de la estricción es fundamental para la obtención de las curvas límite de conformado CLCE. Históricamente se han propuesto una serie de metodologías experimentales para la detección del inicio de la inestabilidad plástica y la estimación de las deformaciones límite en procesos de conformado de chapa. Sin embargo, dichos modelos están enfocados fundamentalmente a ensayos tipo Marciniak o Nakajima, donde el gradiente de deformación a través del espesor de la chapa es despreciable. De hecho, ha sido en este contexto donde la normativa ISO 12004-2:2208 ha desarrollado y estandarizado una metodología basada en el análisis espacial de las deformaciones.

En la práctica real, condiciones de deformación no uniforme a través del espesor son situaciones habituales. La presencia de dicho gradiente de deformación afecta fuertemente la aparición de la estricción y consecuentemente a la forma en que éste puede ser experimentalmente detectado. La extrapolación de las metodologías anteriores a estos casos arroja resultados completamente inconsistentes. En cualquier caso, hasta el momento los estudios orientados a estudiar los efectos de la flexión son muy escasos y no se ha propuesto ningún método universal para tal fin.

Dichos métodos experimentales tienen como variable de entrada la distribución espacial de deformaciones en la cara exterior de la chapa, ya sea la evolución durante todo el ensayo hasta rotura o bien sólo en el instante anterior a la fractura. En la actualidad, existen programas comerciales basados en la técnica de correlación digital de imágenes que nos permiten obtener la evolución tanto temporal como espacial de dichas variables. Estos sistemas, cuyo uso se incita en la reciente ISO 12004-2:2008, están dotados de cámaras digitales que van capturando imágenes a una determinada frecuencia, para posteriormente evaluar deformaciones. La visión, seguimiento y evaluación de los desplazamientos, y posteriormente deformaciones, se consigue mediante la aplicación de un patrón estocástico en la superficie exterior de la probeta, de forma

que se pueda seguir la historia de desplazamientos de cada punto por comparación de las escalas de grises y a partir de ahí, se estiman las deformaciones.

En el presente capítulo se va a hacer una presentación de algunas de las metodologías existentes en la literatura para estimar deformaciones límite. Se verán tanto metodologías basadas en análisis espacial como aquellas basadas en el análisis temporal de los perfiles de deformaciones en secciones perpendiculares a la zona de fractura. La mayor parte de dichas metodologías están concebidas para ensayos sin influencia apreciable de la flexión, si bien es cierto que la última de todas ha sido recientemente propuesta y está enfocada a casos de estirado con flexión. En cualquier caso, en el primer apartado del capítulo se muestra más formalmente el concepto de diagrama límite de conformado y un esquema de cómo influye la ductilidad del material en la forma de los mismos.

2.1 El diagrama límite de conformado

Los Diagramas Límite de Conformado (DLC), desarrollados por Keeler (1964) y Goodwin (1968), son herramientas muy útiles para la evaluación de la capacidad de conformado de las chapas metálicas en la práctica. Se utilizan en todas las fases de la producción de un producto de chapa: en la simulación con elementos finitos durante el diseño del producto y del proceso, en las pruebas con las herramientas conformadoras y en el control de la calidad durante el proceso de producción. El DLC consiste en una gráfica que representa la deformación principal mayor (ε_1) frente a la menor (ε_2) y que muestra una línea denominada Curva Límite de Conformado (CLC) (Fig. 2-1), la cual divide los estados de deformación entre aquellos que permiten el correcto conformado de la chapa y los que producen el fallo. La CLC proporciona una medida simple de la severidad del conformado. En la práctica convencional se modifica el diseño de la matriz o punzón o el proceso de conformado hasta que las deformaciones en todos los puntos de la chapa estén dentro del margen de seguridad que proporciona la CLC.

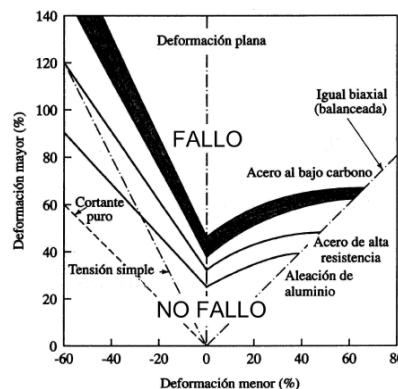


Fig. 2-1: Esquema del DLC experimental para varios materiales

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. Así, para chapas con una ductilidad relativamente alta, la CLCF tiende a tener una forma lineal (Fig. 2-2, izquierda). En cambio, los materiales con relativa baja ductilidad exhiben una CLCF con “forma compleja” (Fig. 2-2, derecha). En estos casos, la CLCF también muestra una forma parecida a una curva en V, ligeramente creciente en la región de estirado y acercándose a la CLCE cuando se acerca a las trayectorias de deformación equi-biaxial ($\beta = 1$).

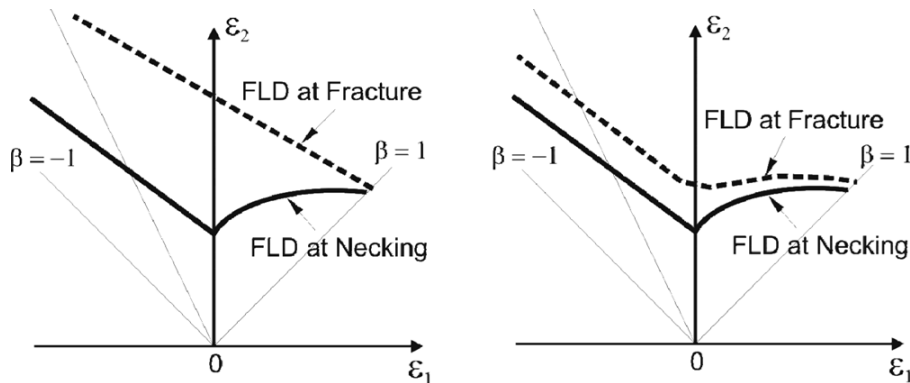


Fig. 2-2: Esquemas del FLD experimental con las curvas de fallo típicas

En la actualidad, tanto la evaluación numérica del proceso de conformado de chapa como una estimación numérica del FLD son tareas importantes en la industria de conformado de chapa. Entre otras cosas, estas tareas necesitan la utilización de un criterio adecuado de fallo que tenga en cuenta el material que se está conformando y el proceso de conformado que se está utilizando. Existe una amplia variedad de criterios de fallo dúctil en la literatura científica. Algunos estudios han demostrado que los criterios de fractura continua (criterios integrales) predicen satisfactoriamente la CLCF lineal. No obstante, estos criterios no son capaces de reproducir la CLCF observada para las chapas de metales de baja ductilidad, con una curva, bien en forma de V o bien en forma compleja, en la región de estirado. En estos casos, los criterios de fallo basados en la tensión tangencial, como el de Tresca o el Bressan y Williams (1983), se ha comprobado que proporcionan una buena aproximación a la CLCF experimental en un rango amplio de relaciones de deformación.

2.2 Metodologías experimentales de Arrieux et al.

El trabajo de Arrieux et al. (2008) trata de generalizar y extender el concepto de diagrama límite de conformado a chapas metálicas de pequeño espesor, de alrededor de 0,1mm. Concretamente procesos de embutición basados en ensayos Marciniak sobre aluminios 1050 en estado recocido. A fin de caracterizar esta tipología de chapas, propone cuatro metodologías para la determinación de las deformaciones límite para el inicio de la estricción, basadas en:

- ✚ la aparición de un defecto visible;
- ✚ el análisis de la evolución de la ruta de deformación en las cercanías a la zona de fractura, asociando el comienzo de la estricción con un cambio brusco en la pendiente de la misma;
- ✚ el ajuste polinómico de la curva de deformación mayor ε_1 en una sección perpendicular a la fractura mediante un polinomio de grado 6, basándose en el tradicional método de Bragard;
- ✚ el análisis de la evolución absoluta y relativa de los perfiles de deformaciones en una determinada sección, y estableciendo el comienzo de la estricción cuando el ancho de la zona de crecimiento de la deformación se ha confinado.

En el primero de ellos, el objetivo consiste en encontrar la última imagen grabada antes del inicio de la estricción. A tal fin, se inspeccionan cronológicamente todas las imágenes, empezando desde el instante de fractura hacia atrás, hasta encontrar la primera en las cuales se visiona todo el campo de deformaciones sin existencia de reflexiones, la cual se identificará como instante en que comenzó la inestabilidad. (Fig. 2-3)

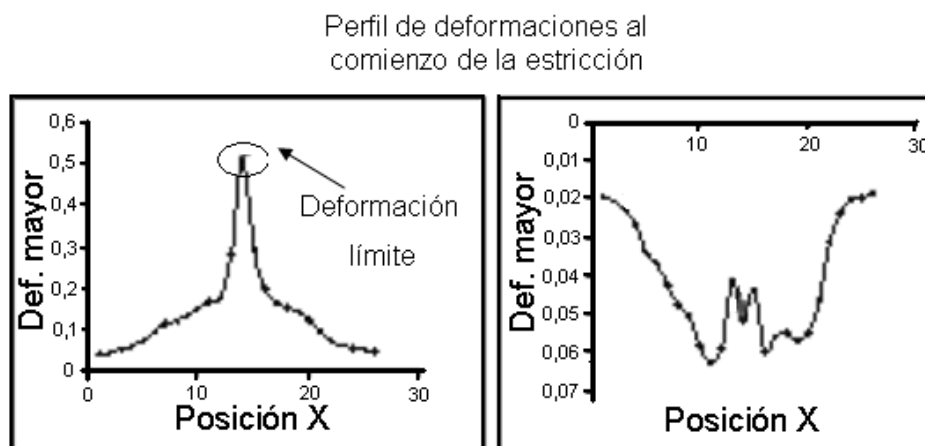


Fig. 2-3: Perfil de deformaciones principales en el instante de comienzo de la estricción

La idea es asociar el comienzo de la estricción a la aparición de un píxel blanco en el sistema de adquisición con imágenes, ya que la fuerte reducción de espesor local generada por el comienzo de la inestabilidad hace que la pintura se desprenda y se genere la citada reflexión. Una vez se conoce el fotograma, basta con localizar el punto con máxima deformación mayor siendo ésta la deformación mayor límite. Por último el valor de deformación menor límite corresponde a aquella que tiene el punto anteriormente identificado. Obviamente esto es un método muy subjetivo, dependiente de muchos parámetros externos (luminosidad, pinturas empleadas, etc...) y en absoluto dependiente de la física de la estricción.

El segundo método toma como base la última imagen antes del comienzo de la fractura. Se seleccionan una serie de puntos alrededor de la zona de fractura y se representa toda su historia en un diagrama de deformaciones mayores frente a deformaciones menores. Inicialmente cada una de las evoluciones son aproximadamente lineales pero llega un instante en que todas las curvas cambian sus pendientes drásticamente, haciéndose prácticamente verticales, esto es, tienden hacia condiciones locales de deformación plana. Dicho método está en consonancia con el hecho de que la evolución de la estricción se desarrolla únicamente bajo dicha condición de deformación plana, si bien es cierto que algunos estudios propuestos por Situ et al. pusieron de manifiesto que la localización no ocurre necesariamente bajo dicha condición. Por ello, si analizamos la evolución de distintos puntos cercanos a la zona de fractura en un diagrama de deformaciones principales, el inicio de la estricción se asocia al instante en que la curva modifica su pendiente hacia condiciones locales de deformación plana. En Fig. 2-4 se muestra dicha tendencia para varios ensayos realizados por Hotz et al. (2008).

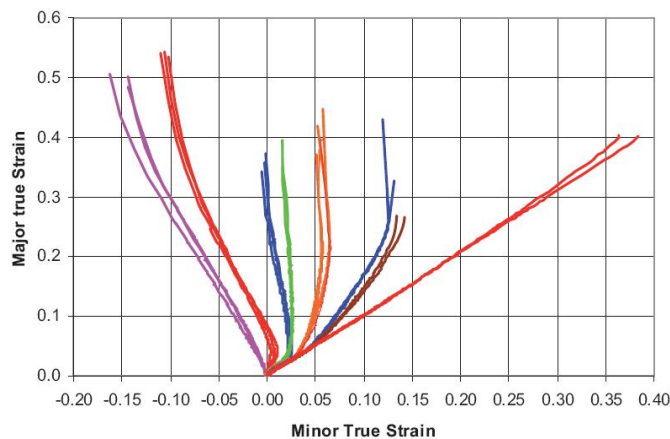


Fig. 2-4: Tendencia de las rutas deformación en varios ensayos realizados por Hotz et al. (2008)

El tercer método, basado en el tradicional criterio de Bragard, consiste en el ajuste polinómico del perfil de deformación principal máxima (ϵ_1) a lo largo de una sección perpendicular a la

fractura justo en el instante anterior del comienzo de la misma. Sin embargo, no se definen claramente los puntos a incluir para dicho ajuste polinómico. Dicho método se estructura en tres partes: (1) cálculo de un primer polinomio de ajuste de sexto grado; (2) eliminación de aquellos puntos que quedan por encima de la primera curva de ajuste; (3) cálculo de un nuevo polinomio de ajuste con los puntos restantes. Se considera que la deformación límite es el valor máximo del último polinomio ajustado (Fig. 2-5). La deformación principal mínima límite es la que corresponde al punto en que se alcanzó aquel máximo. El método es muy automatizable, a diferencia de los dos anteriores, pero presenta una indefinición en sí.

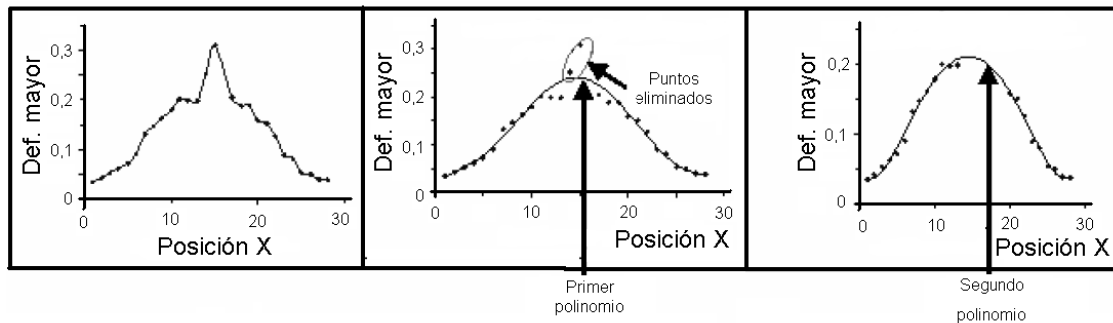


Fig. 2-5: Ajustes polinómicos para la obtención de las deformaciones límite

En el último criterio de Arrieux, las deformaciones mayores y menores se representan a lo largo de una sección perpendicular a la fractura para todos los instantes de tiempo hasta la rotura. El análisis se realiza por un lado en valores absolutos de deformación, es decir cada imagen se compara con la imagen de referencia inicial y por otro lado, en valores relativos, esto es, se representa el incremento de deformación existente entre una imagen y la inmediata anterior.

En las etapas más tempranas se observa la existencia de una zona amplia en la que el nivel de deformación crece. Sin embargo llega un instante en que el área donde se concentra la deformación se ha reducido significativamente a una banda, asignándose dicho instante como comienzo de la estricción. La deformación mayor límite para el comienzo de la estricción corresponde al máximo de la curva seleccionada anteriormente en valor absoluto. La deformación principal mínima límite es la que corresponde al punto en que se alcanzó aquel máximo. Este método tampoco presenta ningún criterio objetivo claro para la detección experimental del inicio de la estricción, quedando en manos de quien analiza los datos la bondad del resultado.

A modo de referencia, en la Fig. 2-6 se presentan, en variables absolutas, las últimas etapas antes de la fractura de un ensayo realizado con punzón cilíndrico Ø40mm por Kitting et al. (2009). Se puede observar claramente que a partir de un instante, toda la deformación se ha concentrado en una banda central.

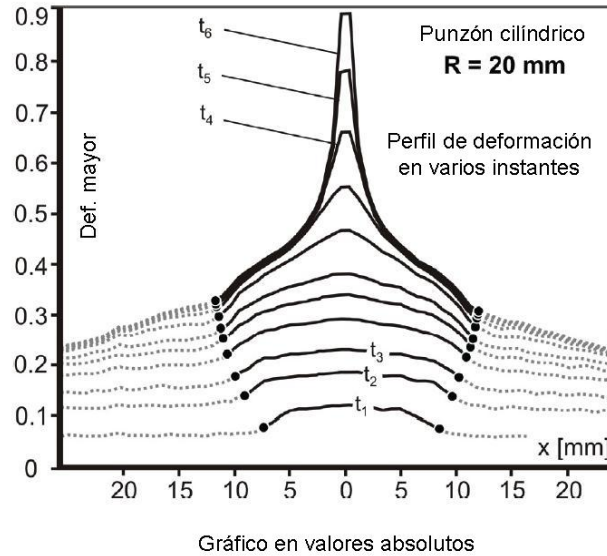


Fig. 2-6: Evolución de deformaciones ε_1 en varios instantes en variables absolutas (Kitting et al., 2009)

2.3 Metodología de Situ et al.

Con otra filosofía para la detección del inicio de la inestabilidad plástica, cabe resaltar los trabajos de Situ et al. (2006). Dichos autores han propuesto un método dependiente del tiempo (time-dependent method) para detectar el inicio de la estricción. Éste método se basa en la evolución temporal de la deformación ε_1 y sus derivadas temporales en el punto más cercano a la zona de fractura. El comienzo de la estricción se asocia al instante en que se observa un punto de inflexión en la primera derivada de la evolución temporal de ε_1 (strain rate), ó lo que es equivalente, cuando se alcanza un máximo en la segunda derivada de ε_1 (strain acceleration) (Fig. 2-7). Según los autores, la reducción de la aceleración desde un máximo hasta cero en el instante de fractura, representa el proceso de localización de la deformación.

Sin embargo, esta hipótesis no está claramente justificada desde un punto de vista físico y no queda lo suficientemente clara por el autor. Bajo nuestro punto de vista, un aspecto oscuro en la física del criterio, es la necesidad de una desaceleración de la deformación durante todo el desarrollo de la estricción, ya que parece entrar en conflicto con la idea generalizada de un proceso precisamente inestable.

La metodología propuesta por Situ et al. es un método local basado en un criterio objetivo, a diferencia de los presentados con anterioridad pero que sin embargo, como se verá, parece carecer de una base física adecuada al no ser capaz de detectar adecuadamente el comienzo de la estricción.

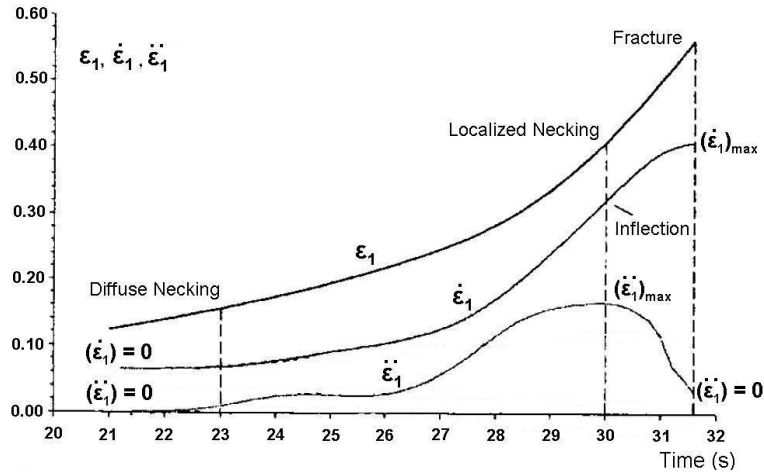


Fig. 2-7: Evolución de deformaciones y sus derivadas temporales. Método propuesto por Situ et al. (2006)

Los ensayos iniciales realizados por el autor para justificar su método fueron montajes tipo Nakajima con punzón hemiesférico de Ø100mm, sometidos a distintas condiciones de fricción, en los cuales existía un campo de deformación uniforme a través del espesor.

En la Fig. 2-8 se muestran los datos experimentales de evolución de deformación y sus derivadas correspondientes a un ensayo con punzón de Ø100mm. La aplicación del método de Jain trae algunas complicaciones al tener que evaluar un máximo en la segunda derivada temporal. Dado que la información de que se dispone es discreta, a medida que se aumenta el orden de diferenciación las curvas presentan más ruido (Fig. 2-8 dcha). Por otro lado, se comprobó que el ascenso hasta el máximo y posterior caída de la segunda derivada está localizado en un intervalo de tiempo muy estrecho y cercano al instante de fractura, a diferencia de lo presentado por el autor en Fig. 2-7. La opción de suavizado en el proceso de diferenciación no presentaba prácticamente mejoras, dando lugar en algunos casos a dificultades en la determinación del máximo.

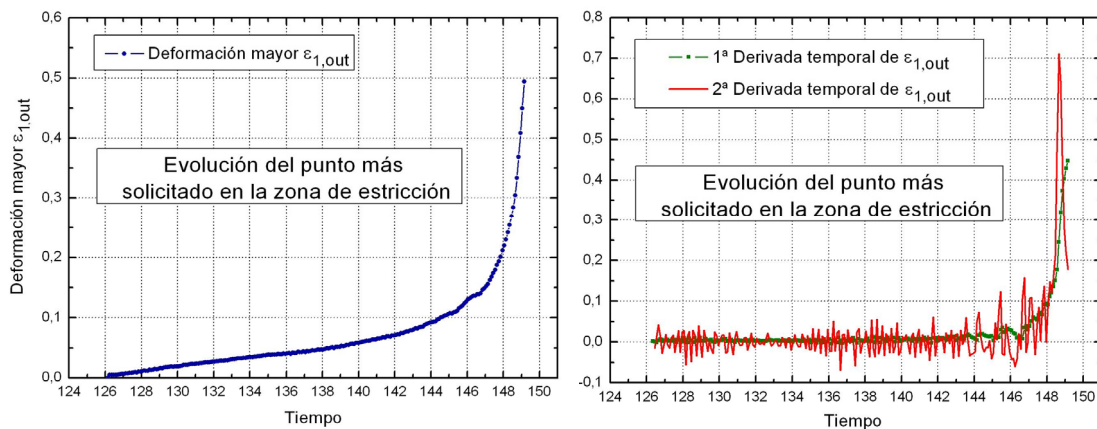


Fig. 2-8: Datos experimentales correspondientes al ensayo IV con punzón Ø100mm. Aplicación método de Situ et al.

Por otro lado, dado que la estricción se manifiesta como una reducción del espesor, parecería más razonable emplear la deformación ε_3 en el análisis, al ser ésta una variable más representativa del fenómeno físico de estricción. Por ello, se ha considerado oportuno incluir en el análisis, que se presenta más adelante, una variante del método de Situ et al. La única diferencia respecto al original consiste en emplear como variable de análisis la deformación ε_3 en vez de la deformación ε_1 . Dicha variante será referida a partir de ahora como “Método de Situ modificado”.

2.4 Metodología propuesta por Kitting et al.

En esta misma línea de métodos dependientes del tiempo (time-dependent methodologies), Kitting et al. (2009) han presentado muy recientemente un criterio para estimar las deformaciones límite en ensayos de estirado con flexión (stretch-bending tests). Dichos autores pusieron inicialmente de manifiesto que la metodología espacial propuesta por la normativa ISO 12004-2:2008, la cual se verá más adelante, es apropiada únicamente para determinar las deformaciones límite en ensayos en los que hay una deformación a través del espesor casi constante. Tras identificar esta limitación, han desarrollado un método de evaluación alternativo dependiente del tiempo con una teórica aplicabilidad a casos con gradiente de deformación.

Según esta metodología, una vez comienza la estricción se pueden diferenciar claramente dos zonas: (1) aquella en la que se concentra la deformación (zona de estricción), (2) las zonas adyacentes a esta (zona estable), en la cual el nivel de deformación deja de seguir creciendo (Fig. 2-9). Los puntos D y E están dentro de la zona de estricción, los A y B se encuentran en la zona estable de deformación y finalmente C se encuentra justo en el límite entre una y otra zona. Se considera que la deformación límite corresponde al máximo valor de deformación alcanzado en la zona estable más cercana a la zona de estricción (Punto C en Fig. 2-9).

Dado que la zona estable (fuera de la zona de estricción) deja de deformarse, la velocidad de deformación mayor en la zona de estricción y en la zona estable ha de presentar una tendencia bien distinta.

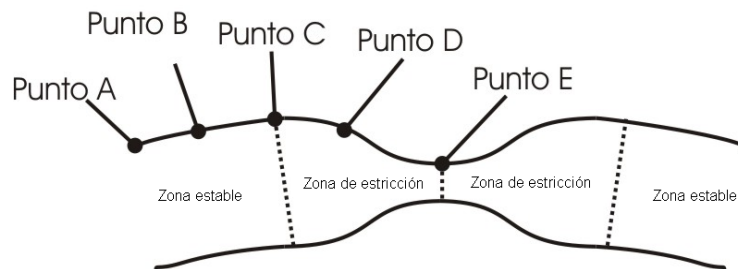


Fig 2-9: Detalle de la zona estable y de estricción

Por tanto, si se representa la velocidad de deformación mayor en las últimas etapas del ensayo a lo largo de una sección perpendicular a la fractura, será posible identificarse cual ha sido el área donde se ha desarrollado la estricción. Se observa que los puntos de la zona estable presentan una velocidad de deformación alrededor de cero, mientras que la zona de estricción o de crecimiento de deformación inestable tiene velocidades drásticamente positivas, y crecientes hacia la zona central del espécimen, debido al propio gradiente que existe en el interior de la zona de inestabilidad durante su desarrollo. En la Fig. 2-10 se representan las distribuciones de velocidad de deformación mayor (strain rate) en los ensayos realizados con punzones cilíndricos (stretch-bending) de R20mm y R7mm sobre chapas de acero H340LAD de 1,5mm de espesor. Como se aprecia, el incremento localizado de la distribución de velocidad de deformación revela el ancho de la zona de estricción. Los puntos indicados con flechas representan aquellos lugares más cercanos a la zona de inestabilidad, los cuales se emplearán para la obtención de las deformaciones límite.

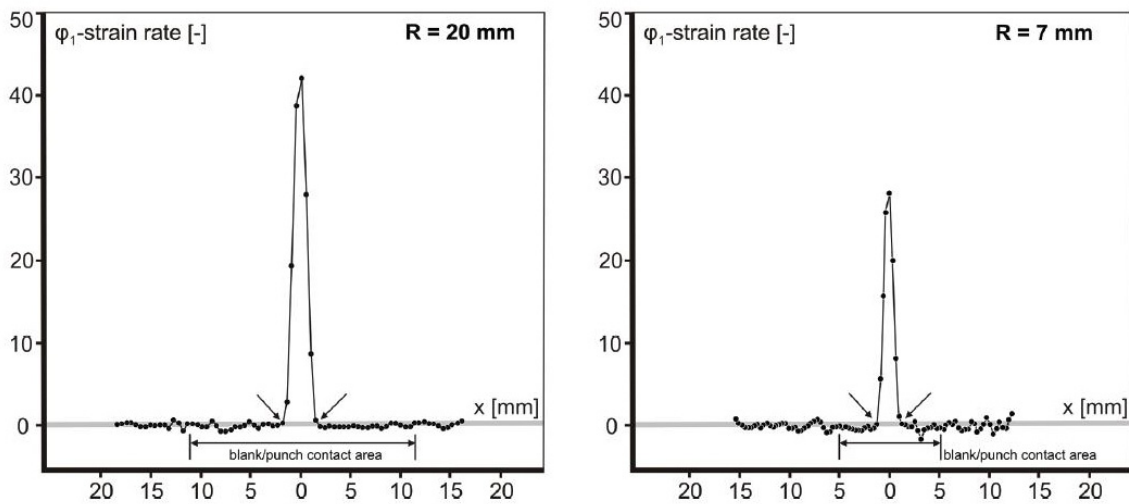


Fig. 2-10: Distribución de velocidades de deformación en ensayos de stretch-bending (Kitting et al.)

Basado en la distribución de velocidad de deformación mayor, es posible determinar los puntos de la zona estable, uno a cada lado, más cercanos a la estricción (indicados con flechas en Fig. 2-10). La media del máximo valor de deformación alcanzado en dichos puntos (es decir, en el instante anterior a la fractura) se define como la deformación límite de conformado.

Sin embargo, dicha estimación de las deformaciones límite no tiene una base física basada en la evolución temporal de las variables ni parece tener en cuenta el gradiente impuesto a lo largo de la chapa por los punzones, al tratar de estimar los límites de conformado basándose en los puntos límite que separan la zona de deformación estable de la inestable en vez de lo que ocurre

en la zona más solicitada de la estricción (Punto E en Fig. 2-9). Además, no trata de detectar en que instante ha comenzado la estricción sino que se basa directamente en el instante anterior a la fractura para estimar las deformaciones límite que existían al comienzo de la inestabilidad plástica.

