

6 Resultados experimentales y análisis comparativo entre metodologías

En el presente apartado se presentan tanto los resultados experimentales como un análisis comparativo de las predicciones obtenidas para las deformaciones límite usando las siguientes metodologías:

- ✚ Propuesta de la normativa ISO 12004-2:2008.
- ✚ Método formulado por Situ et al (2006). Además, como se explicó en el apartado 2.3, se ha considerado oportuno incluir una variante de este método, cuya única diferencia respecto al original consiste en emplear la deformación ε_3 como variable de análisis (Método de Situ modificado).
- ✚ Criterio de Kitting et al. (2009).
- ✚ Metodología temporal propuesta en sus dos variantes (ε_1 y ε_3).

Se analizarán tanto los ensayos tipo Nakajima con punzón de Ø100mm como los realizados con punzones cilíndricos de Ø10mm y Ø20mm. Como se mencionó en apartados anteriores, las deformaciones analizadas para cada probeta fueron medidas en la cara exterior de la chapa, siendo éste un factor a tener muy en cuenta cuando los efectos de la flexión son importantes.

6.1 Ensayos sin influencia apreciable de la flexión (tipo Nakajima)

La Tabla 6-1 muestra las predicciones de las deformaciones límite usando los métodos descritos anteriormente para los ensayos realizados en condiciones cercanas a deformación plana. En estas circunstancias, se ensayaron 4 especímenes distintos (I-IV). Se presentan las deformaciones límite estimadas para cada probeta, el valor medio y la desviación estándar. De acuerdo al procedimiento de la normativa ISO 12004-2:2008, los resultados mostrados para cada probeta concreta corresponde al promedio de los resultados obtenidos sobre tres secciones distintas en el espécimen y perpendiculares a la zona de fractura.

Dado que el método ISO 12004-2:2008 está optimizado para ensayos tipo Nakajima, los resultados obtenidos con este método se consideran como los valores de referencia. Por tanto, éstos se usarán para comparar la idoneidad y capacidad del resto de metodologías para la correcta predicción del inicio de la estricción.

Tabla 6-1. Resultados obtenidos con ensayos Nakajima y condiciones de deformación plana

Test piece	ISO 12004-2		Proposed method ε_1		Proposed method ε_3		Kitting et. al		Situ et al.		Situ et al. modified.	
	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}
I	0,274	-0,024	0,261	-0,026	0,261	-0,026	0,270	-0,018	0,324	-0,030	0,324	-0,030
II	0,231	-0,016	0,246	-0,019	0,246	-0,019	0,254	-0,018	0,305	-0,023	0,314	-0,024
III	0,245	-0,010	0,245	-0,012	0,245	-0,012	0,262	-0,013	0,305	-0,016	0,302	-0,015
IV	0,264	-0,021	0,255	-0,021	0,255	-0,021	0,273	-0,019	0,319	-0,027	0,319	-0,027
Mean	0,254	-0,018	0,252	-0,020	0,252	-0,020	0,265	-0,017	0,313	-0,024	0,315	-0,024
σ	0,019	0,006	0,008	0,006	0,008	0,006	0,009	0,003	0,010	0,006	0,009	0,007

De igual forma, en las Tabla 6-2 y Tabla 6-3 se presentan los valores obtenidos para los ensayos en zona biaxial y en estados cercanos a tracción pura respectivamente, a fin de validar las metodologías en un rango más amplio. En el caso de zona biaxial, se ha considerado oportuno considerar más especímenes como muestra representativa, en concreto seis, dada la gran dificultad generalizada existente para una satisfactoria rotura de las probetas dentro de los márgenes indicados en la norma.

Tabla 6-2. Resultados obtenidos con ensayos Nakajima y condiciones biaxiales

Test piece	ISO 12004-2		Proposed method ε_1		Proposed method ε_3		Kitting et. al		Situ et al.		Situ et al. modified.	
	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}
I	0,230	0,090	0,217	0,086	0,216	0,086	0,215	0,098	0,350	0,086	0,350	0,086
II	0,232	0,098	0,267	0,094	0,269	0,094	0,249	0,099	0,320	0,095	0,320	0,095
III	0,244	0,108	0,259	0,100	0,257	0,100	0,234	0,108	0,376	0,102	0,378	0,102
IV	0,246	0,080	0,242	0,082	0,235	0,081	0,230	0,080	0,340	0,080	0,355	0,080
V	0,219	0,081	0,244	0,077	0,243	0,077	0,248	0,084	0,358	0,079	0,364	0,078
VI	0,235	0,119	0,276	0,113	0,271	0,113	0,264	0,117	0,373	0,115	0,379	0,115
Mean	0,234	0,096	0,251	0,092	0,249	0,092	0,240	0,098	0,353	0,093	0,358	0,093
σ	0,010	0,015	0,021	0,013	0,021	0,013	0,017	0,014	0,021	0,014	0,022	0,014

Tabla 6-3. Resultados obtenidos con ensayos Nakajima y condiciones cercanas a tracción pura

Test piece	ISO 12004-2		Proposed method ε_1		Proposed method ε_3		Kitting et. al		Situ et al.		Situ et al. modified.	
	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}
I	0,323	-0,101	0,303	-0,101	0,306	-0,102	0,330	-0,086	0,422	-0,130	0,435	-0,128
II	0,314	-0,106	0,322	-0,103	0,322	-0,103	0,339	-0,102	0,425	-0,128	0,414	-0,118
III	0,346	-0,115	0,310	-0,100	0,319	-0,103	0,316	-0,099	0,514	-0,134	0,514	-0,134
Mean	0,328	-0,107	0,312	-0,101	0,316	-0,103	0,328	-0,096	0,454	-0,131	0,454	-0,127
σ	0,017	0,007	0,010	0,002	0,009	0,001	0,012	0,009	0,052	0,003	0,053	0,008

Como se puede apreciar, en todos los casos, las estimaciones de la metodología temporal propuesta, en sus dos alternativas (ε_1 and ε_3), son prácticamente coincidentes. Además, dichos resultados están muy en concordancia con los estimados por la ISO 12004-2:2008, los cuales se consideran como valores de referencia, presentando unas desviaciones máximas entre ambos de un 5% - 7%. Igualmente ocurre con las predicciones del criterio de Kitting et al, presentando unas desviaciones respecto a la ISO 12004-2:2008 del mismo orden. Sin embargo, tanto las predicciones del método de Situ et al. como los de la variante introducida, método de Situ modificado, están sustancialmente por encima de los límites de conformado definidos por el método normalizado ISO 12004-2:2008, quedando dichos resultados del lado de la inseguridad.

A tenor de lo anterior, se concluye que tanto los métodos temporales propuestos como el método de Kitting et al. son capaces de predecir adecuadamente el inicio de la estricción y consecuentemente las deformaciones límite de conformado en los ensayos en los que el gradiente de deformación a través del espesor es despreciable. En comparación con la propuesta de la ISO 12004-2:2008, el método temporal desarrollado tiene como ventaja fundamental que al ser un método local y con fuerte base física puede, por tanto, extrapolarse directamente a situaciones en las que el gradiente de deformación a lo largo de la chapa y a través del espesor es relevante. Sin embargo, como se verá, dicha extensión en el método de Kitting et al. no arroja resultados consistentes.

En la Fig. 6-1 se representan gráficamente los puntos experimentales obtenidos con cada metodología y un ajuste lineal de los mismos para establecer la frontera entre la zona de deformación estable y aquella en la que el proceso de localización se ha producido y consecuentemente el fallo del material (CLCE). Dada la práctica coincidencia de resultados entre ambas variantes del criterio temporal propuesto (ε_1 ó ε_3), sólo se representa por claridad la primera de ellas. De igual forma se procede con los criterios de Situ y Situ modificado.

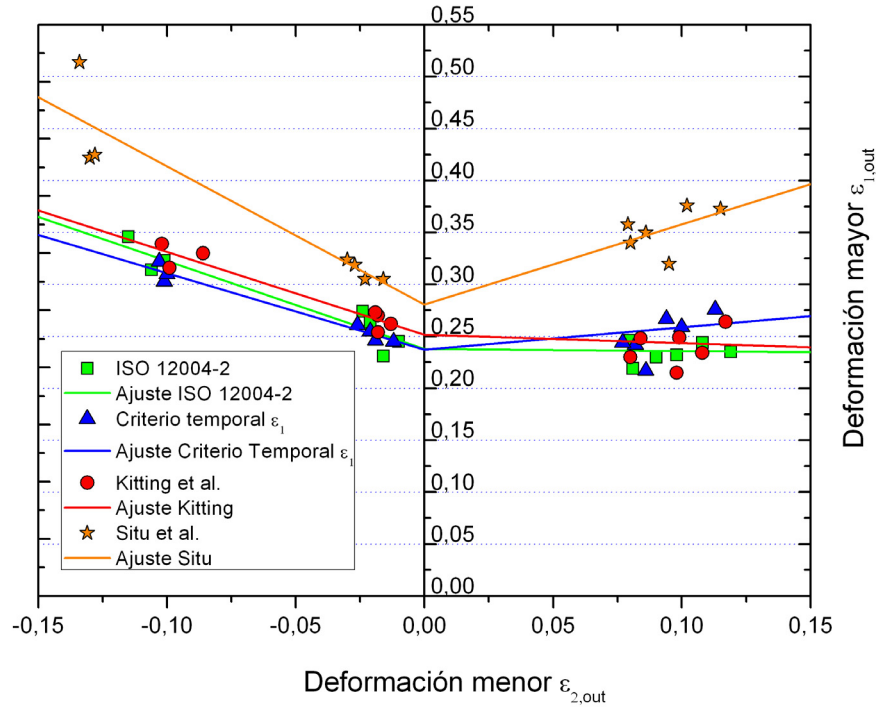


Fig. 6-1: Diagrama Límite de Conformado con punzón 100mm

6.2 Ensayos CON influencia apreciable de la flexión

En las Tabla 6-4 y Tabla 6-5 se muestran las deformaciones límite predichas en la cara exterior de la probeta para los ensayos con punzones cilíndricos de $\varnothing 20$ y $\varnothing 10$ mm (stretch-bending tests). En ambos casos, el estado de deformación en la zona de fractura es cercano a deformación plana, con una relación de deformación local $\beta = \epsilon_2 / \epsilon_1$ ligeramente negativa. En cada caso, se han ensayado tres probetas distintas (I-III). Al igual que antes, se presenta la deformación límite para cada espécimen (valor promedio sobre tres secciones en el mismo), el valor medio y la desviación standard.

Tabla 6-4. Resultados usando punzón cilíndrico $\varnothing 20$ mm

Test piece	ISO 12004-2		Proposed method ϵ_1		Proposed method ϵ_3		Kitting et. al		Situ et al.		Situ et al. modified.	
	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}
I	0,478	0,294	0,356	-0,022	0,356	-0,022	0,362	-0,016	0,425	-0,029	0,414	-0,029
II	0,239	0,201	0,298	-0,024	0,305	-0,024	0,294	-0,029	0,385	-0,024	0,371	-0,027
III	0,188	0,037	0,329	-0,028	0,328	-0,028	0,337	-0,021	0,406	-0,035	0,397	-0,037
Mean	0,302	0,177	0,328	-0,025	0,330	-0,025	0,331	-0,022	0,405	-0,029	0,394	-0,031
σ	0,155	0,130	0,029	0,003	0,026	0,003	0,034	0,007	0,020	0,006	0,022	0,005

Tabla 6-5. Resultados usando punzón cilíndrico Ø 10 mm

Test piece	ISO 12004-2		Proposed method ε_1		Proposed method ε_3		Kitting et. al		Situ et al.		Situ et al. modified.	
	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}	ε_{1lim}	ε_{2lim}
I	0,102	0,049	0,331	-0,008	0,331	-0,008	0,285	-0,012	0,411	-0,008	0,405	-0,007
II	0,442	0,268	0,356	-0,027	0,356	-0,027	0,300	-0,026	0,444	-0,022	0,444	-0,022
III	0,236	0,017	0,333	-0,025	0,332	-0,025	0,240	-0,020	0,431	-0,045	0,431	-0,045
Mean	0,260	0,111	0,340	-0,020	0,340	-0,020	0,275	-0,019	0,429	-0,025	0,427	-0,025
σ	0,171	0,137	0,014	0,010	0,014	0,010	0,031	0,007	0,017	0,019	0,020	0,019

A la vista de los resultados, se pueden extraer una serie de consideraciones importantes. Primeramente, se puede observar que los resultados de la ISO 12004-2:2008 exhiben una gran dispersión en ambos casos, mientras que el resto de metodologías arrojan una dispersión similar a la observada en los anteriores ensayos Nakajima. Además, el método ISO estima valores positivos de deformación menor, lo cual es inconsistente con la evolución experimental real de las deformaciones durante el ensayo. En el resto de metodologías, se obtienen valores coherentes. De nuevo, como ya se apuntó anteriormente, la justificación de este comportamiento parece estar relacionado con los gradientes de deformación a lo largo de la superficie y a través del espesor, al ser éstos bastante relevantes en esta tipología de ensayos, a diferencia de lo que ocurría con el punzón hemiesférico de Ø100 mm. El tamaño de las ventanas de ajuste propuesto en el método ISO 12004-2:2008 es demasiado grande para punzones de Ø20 y Ø10 mm. En otras palabras, la zona de proceso en estos ensayos es mucho más pequeña, al estar la deformación muy localizada, en comparación con los parámetros empleados en ISO 12004-2:2008 para la detección del inicio de la estricción. Por esta razón, las metodologías locales basadas en la evolución temporal de las variables, como por ejemplo la aquí presentada, es adecuada tanto para pequeños como para grandes radios de curvatura.

Por otro lado, la evidencia experimental muestra que las deformaciones límite en la cara exterior para el inicio de la estricción son más grandes a medida que los gradientes de deformación a través del espesor son mayores (p.e. radios de punzones más pequeños). Por ejemplo, estudios anteriores realizados por Tharret y Stoughton (2003) para determinar la influencia de la flexión en los límites de conformado en aceros y aluminios, están en concordancia con dicha tendencia, al igual que otros muchos (p.e. Ghosh & Hecker, 1974; Charpentier, 1975). De nuevo, esta tendencia experimental no se reproduce ni con el método de la ISO ni con la metodología de Kitting et al., mientras que si se observa en la metodología

temporal propuesta. En la Fig. 6-2 se presentan los valores medios de deformación mayor en la cara exterior con cada una de las metodologías frente al parámetro t/R , el cual cuantifica la severidad de la flexión (a medida que es más grande, más severidad en el gradiente de deformación inducido). En dicha gráfica, se puede observar la correcta tendencia de los valores estimados por la metodología aquí presentada.

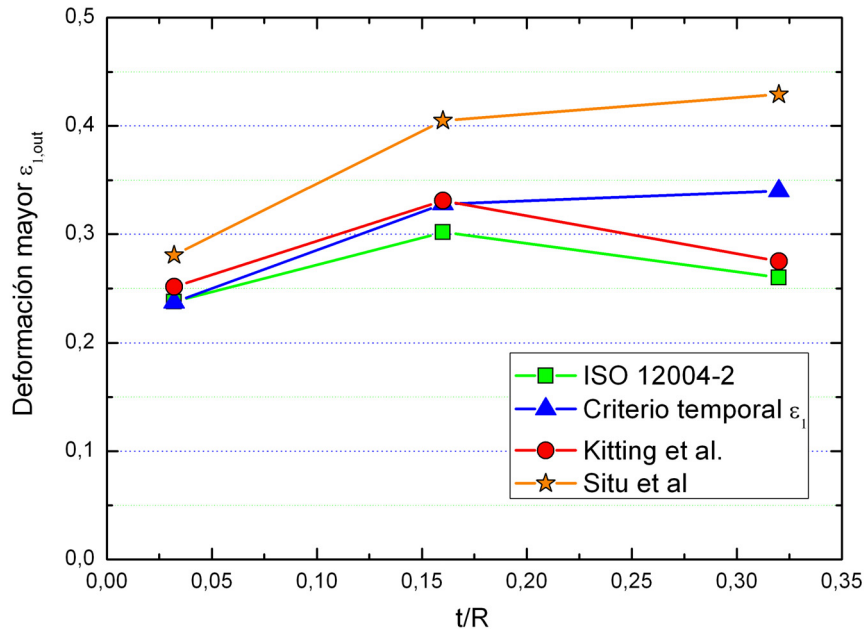


Fig. 6-2: Dependencia de la deformación mayor límite con la severidad de la flexión

La metodología de Kitting et al. era inicialmente esperanzadora al estar diseñada para ensayos de estirado con flexión (stretch-bending), pero parece ser que a medida que la severidad del gradiente es más fuerte deja de ser aplicable. Una de las principales limitaciones del criterio de Kitting et al. es que determina las deformaciones límite basándose en lo que ocurre en la línea que delimita la zona de deformación estable de la zona de estricción, suponiendo intrínsecamente que la deformación en ésta es uniforme. Sin embargo, cuando existe un gradiente impuesto por el propio punzón, existen diferencias entre la deformación en el centro de la estricción y en el límite de la zona de estricción. De hecho, la ISO 12004-2:2008 propone precisamente ajustar una parábola inversa en esa zona para reconstruir el perfil de deformación y a partir de éste extrapolar la deformación límite. Además, dicha metodología no trata de identificar el instante en que comienza la inestabilidad a partir de la evolución de las variables, sino que al igual que la ISO 12004-2:2008, estima la deformación para el inicio de la estricción a partir de los valores de deformación existentes en el instante anterior a la fractura.

Finalmente, se puede comprobar que no hay diferencias significativas entre las predicciones de la metodología temporal propuesta en sus dos variantes, ε_1 o ε_3 . Igualmente, tanto el criterio

original de Situ et al. como la variante aquí propuesta, basada en ϵ_3 , predice valores prácticamente idénticos. Sin embargo, al igual que ocurría en los ensayos Nakajima, el método de Situ et al. estima deformaciones límite consistentemente mayores que la nueva metodología presentada (Fig. 6-2).

6.3 Validación de la metodología temporal propuesta en ensayos con influencia de la flexión: Método del Valle

La aplicación de la ISO 12004-2:2008 en ensayos tipo Nakajima, establece una referencia adecuada para corroborar la idoneidad del resto de metodologías presentadas, al estar dicho método enfocado precisamente a esta tipología de ensayos. En cambio, tras haberse comprobado que los resultados obtenidos con dicha norma ISO 12004-2:2008 en ensayos con gradiente de deformación a través del espesor no son adecuados, se plantea la duda de que referencia podría usarse para decidir si el método temporal propuesto y el resto de metodologías reproducen adecuadamente el inicio de la estricción en estos casos.

La estricción comienza cuando se produce una reducción localizada e inestable del espesor de la chapa. A fin de visualizar el proceso de concentración de la reducción de espesor, en la Fig. 6-3 se representa el perfil de desplazamiento perpendicular al plano de la probeta indeformada (eje Z) en una sección perpendicular a la zona de fractura, para distintos instantes de tiempo consecutivos hasta el fallo (t_1 lejos de la estricción y t_4 justo antes de la fractura).

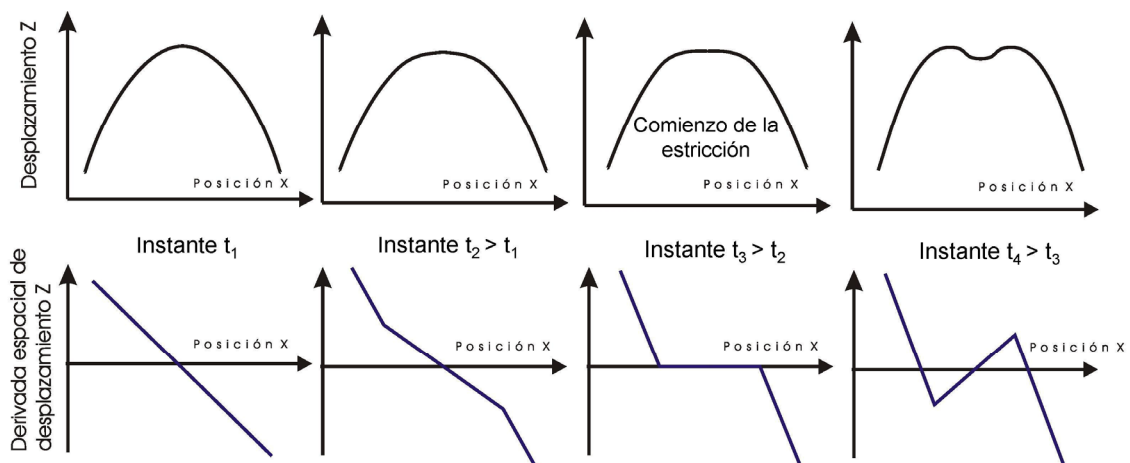


Fig. 6-3: Evolución del perfil de desplazamiento y derivada espacial en distintos instantes hasta el fallo. Método del Valle

Cada una de las curvas simboliza la geometría de la cara exterior de la probeta en una sección concreta en distintos instantes de tiempo. Se puede observar que en instantes lejanos al fallo, la probeta se deforma reproduciendo adecuadamente la curvatura impuesta por el punzón

cilíndrico (Instante t_1 en Fig. 6-3). En cambio, llega un momento en que la curva empieza a achatarse en una zona localizada (Instante t_2 en Fig. 6-3), para después hacerse plana (Instante t_3 en Fig. 6-3) y finalmente aparecer el valle de la estricción (Instante t_4 en Fig. 6-3).

Dicha deformada se empieza a achatar como consecuencia de que en esa zona central la reducción de espesor aumenta mucho más rápidamente que en los puntos adyacentes. Ese instante en que la probeta comienza a deformarse independientemente de la curvatura y el perfil se hace plano, se asocia con el comienzo de la estricción (Instante t_3 en Fig. 6-3). El proceso de achatamiento y posterior comienzo de la estricción se puede visualizar más cómodamente empleando la primera derivada espacial del desplazamiento. Esto se manifiesta gráficamente con un cambio local de la pendiente de la curva “derivada espacial de desplazamiento” en la zona de localización, como se aprecia en la Fig. 6-3. Con esta metodología planteada, llamada “Método del Valle”, se puede visualizar físicamente el proceso de localización de la deformación (estricción) y determinar en que instante ha comenzado la misma para cualquier tipología de ensayo.

A continuación, se debe localizar el punto más solicitado de la zona de estricción, es decir, aquel en el que se producirá posteriormente la fractura (Punto B en Fig. 6-4). Finalmente, se considera que la deformación límite corresponde al nivel de deformación ϵ_1 y ϵ_2 del punto más solicitado en la zona de estricción en el instante determinado anteriormente (Instante t_3 en Fig. 6-3 y Fig. 6-4).

Dicha metodología, al tener en cuenta simultáneamente tanto la evolución temporal como espacial de la deformación, se puede considerar como un “position-time dependent method”.

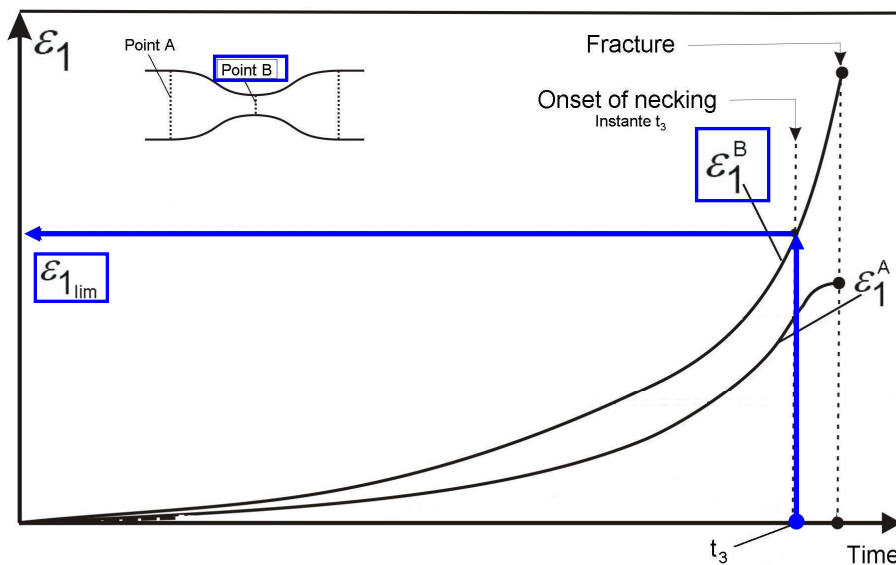


Fig. 6-4: Método del Valle. Determinación de la deformación límite ϵ_1 una vez conocido el instante de comienzo de la estricción, t_3

En la Fig. 6-5 se representan las curvas en distintos instantes de tiempo y se indica el instante de comienzo de la estricción para los valores experimentales correspondientes al ensayo II con punzón cilíndrico de Ø20mm.

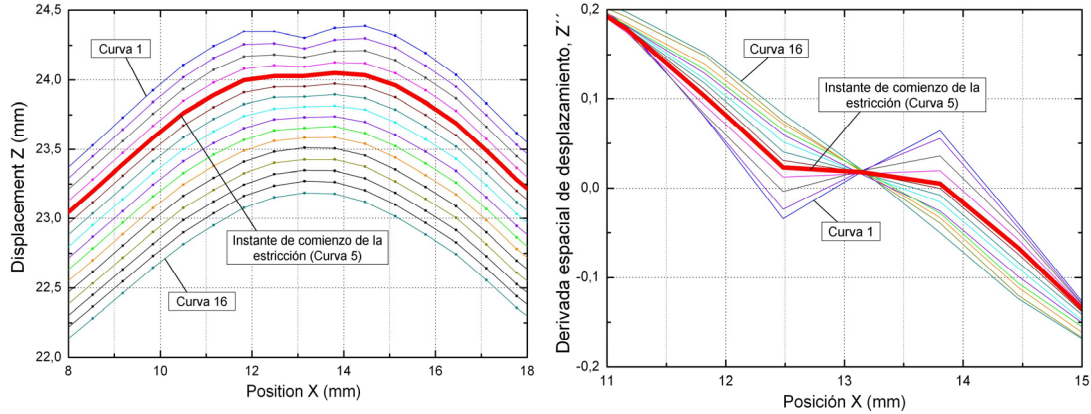


Fig. 6-5: Representación gráfica de la estricción en ensayo II con punzón 20mm.

En las Tabla 6-6 y Tabla 6-7 se presentan las estimaciones de las deformaciones límite en la cara exterior mediante la aplicación del “Método del Valle” en los ensayos con influencia de la flexión (stretch-bending tests). A fin de comparar resultados, se presentan igualmente las estimaciones del resto de metodologías. Los valores presentados con el “método del Valle” corresponden a un promedio realizado, sobre tres secciones perpendiculares a la zona de fractura, en cada una de las probetas.

El método del valle será una referencia fiable para estimar la validez de nuestro criterio temporal y del resto de metodologías, al estar basado, como se ha explicado anteriormente, en la materialización física del proceso de estricción.

Tabla 6-6. Resultados incluyendo Método del Valle en ensayos con punzón cilíndrico Ø 20 mm

Test piece	<u>Valley method</u>		Proposed method \mathcal{E}_1		Proposed method \mathcal{E}_3		Kitting et. al		Situ et al.		Situ et al. modified.	
	\mathcal{E}_{1lim}	\mathcal{E}_{2lim}	\mathcal{E}_{1lim}	\mathcal{E}_{2lim}	\mathcal{E}_{1lim}	\mathcal{E}_{2lim}	\mathcal{E}_{1lim}	\mathcal{E}_{2lim}	\mathcal{E}_{1lim}	\mathcal{E}_{2lim}	\mathcal{E}_{1lim}	\mathcal{E}_{2lim}
I	0,314	-0,016	0,356	-0,022	0,356	-0,022	0,362	-0,016	0,425	-0,029	0,414	-0,029
II	0,282	-0,024	0,298	-0,024	0,305	-0,024	0,294	-0,029	0,385	-0,024	0,371	-0,027
III	0,337	-0,028	0,329	-0,028	0,328	-0,028	0,337	-0,021	0,406	-0,035	0,397	-0,037
Mean	0,311	-0,023	0,328	-0,025	0,330	-0,025	0,331	-0,022	0,405	-0,029	0,394	-0,031
σ	0,028	0,006	0,029	0,003	0,026	0,003	0,034	0,007	0,020	0,006	0,022	0,005

Tabla 6-7. Resultados incluyendo Método del Valle en ensayos con punzón cilíndrico Ø 10 mm

Test piece	<u>Valley method</u>		Proposed method ϵ_1		Proposed method ϵ_3		Kitting et. al		Situ et al.		Situ et al. modified.	
	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}	ϵ_{1lim}	ϵ_{2lim}
I	0,353	-0,008	0,331	-0,008	0,331	-0,008	0,285	-0,012	0,411	-0,008	0,405	-0,007
II	0,405	-0,030	0,356	-0,027	0,356	-0,027	0,300	-0,026	0,444	-0,022	0,444	-0,022
III	0,394	-0,027	0,333	-0,025	0,332	-0,025	0,240	-0,020	0,431	-0,045	0,431	-0,045
Mean	0,384	-0,022	0,340	-0,020	0,340	-0,020	0,275	-0,019	0,429	-0,025	0,427	-0,025
σ	0,027	0,012	0,014	0,010	0,014	0,010	0,031	0,007	0,017	0,019	0,020	0,019

Se pueden extraer una serie de conclusiones a partir de las tablas anteriores. Como cabía esperar, el método del valle reproduce adecuadamente la tendencia experimental de obtener deformaciones límites más grandes a medida que la severidad de la flexión es creciente. Además, se puede observar que la dispersión encontrada en dichas predicciones es igualmente pequeña. Las estimaciones de la metodología temporal propuesta, en sus dos variantes, están muy en concordancia con las obtenidas en el método del valle. Para ambos niveles de severidad del gradiente, esto es, punzones cilíndricos de Ø20 mm y Ø10 mm, las máximas desviaciones encontradas entre ambos, en valores medios, oscilan en torno a un 5-12 %. Por otro lado, los resultados del criterio de Kitting et al. difieren, respecto al método del valle, del orden de un 5% en el caso de menos severidad del gradiente de deformación (punzón cilíndrico Ø20 mm), mientras que la diferencia para el caso Ø10 mm se dispara drásticamente hasta un 40 %. Además, como se comentó con anterioridad, la tendencia es contraria a la esperable, ya que estima deformaciones límite decrecientes a medida que el gradiente de deformación se acentúa. La razón para tal tendencia se justifica por la falta de física en el propio proceso de evaluación y que ya ha sido puesta de manifiesto con anterioridad. Por último, en lo relativo a la propuesta de Situ et al. y la variante introducida (Método de Situ modificado), se puede comprobar que en ambos casos se sobreestiman las deformaciones límite. Dichos resultados presentan unas diferencias porcentuales respecto al método de referencia (Método del valle) de un 30% para el caso de Ø20 mm y de alrededor de un 11% en el caso de Ø10 mm.

Por tanto, se concluye que la aplicación del método del valle a los ensayos con efectos apreciables de la flexión pone de manifiesto que la metodología temporal propuesta en el presente artículo es adecuada, al obtenerse unas desviaciones porcentuales dentro de un rango razonable, del orden de un 5-10 % en cualquiera de los casos planteados. En el resto de metodologías, no se obtienen resultados consistentes.

6.4 Distribución de la deformación en los ensayos con punzón hemisférico y cilíndrico: existencia de un gradiente.

Uno de los aspectos débiles de la metodología ISO 12004-2:2008 al extrapolarse a los casos con influencia apreciable de la flexión era que el tamaño de las ventanas de ajuste que proponía eran demasiados grandes cuando se emplean punzones cilíndricos de pequeño radio, al estar la deformación muy localizada y existir un alto gradiente a lo largo de la chapa y a través del espesor, desde etapas muy tempranas del ensayo. Igualmente, parece ser que la existencia de ese gradiente era la causante de la incorrecta predicción de los límites de conformado mediante método de Kitting et al. A continuación se pretende mostrar la existencia del mismo.

En la Fig. 6-6 izqda. se presenta, para el caso de punzón hemisférico Ø100mm, la evolución temporal de la deformación mayor para distintos puntos alineados en una sección perpendicular a la zona donde se generará posteriormente la fractura, mientras que la Fig. 6-6 dcha. muestra el campo de deformaciones en la cara exterior de la probeta en un instante concreto. Como se aprecia la deformación es bastante homogénea a lo largo de la chapa. De hecho, las evoluciones de las deformaciones están casi superpuestas durante la mayor parte del ensayo y sólo cerca del fallo, como consecuencia de la estricción, dichas curvas se separan.

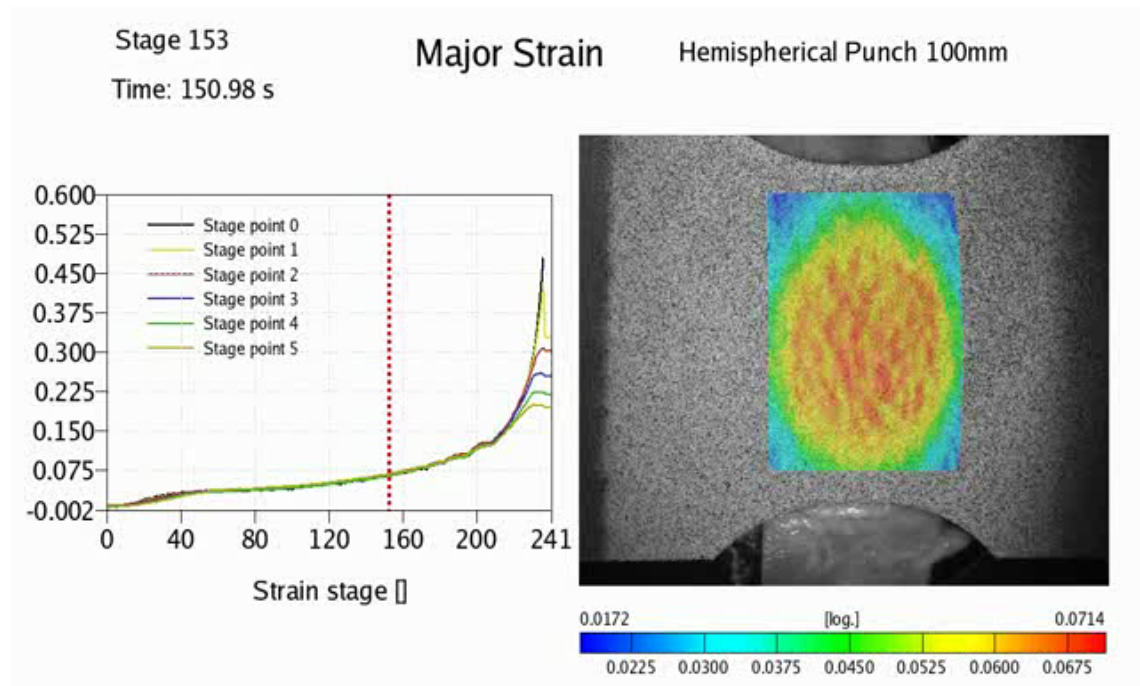


Fig. 6-6: Distribución de deformaciones en ensayo con punzón hemisférico de Ø100mm

Sin embargo, en los casos con punzones cilíndricos, se observa que la deformación está muy localizada en una zona determinada, existiendo un alto gradiente de deformación a lo largo de la chapa (Fig. 6-7 y Fig. 6-8). Las curvas que representan las evoluciones temporales de las deformaciones, incluso desde etapas muy tempranas, están sustancialmente separadas, poniéndose así de manifiesto el gradiente inducido por los punzones de pequeño radio.

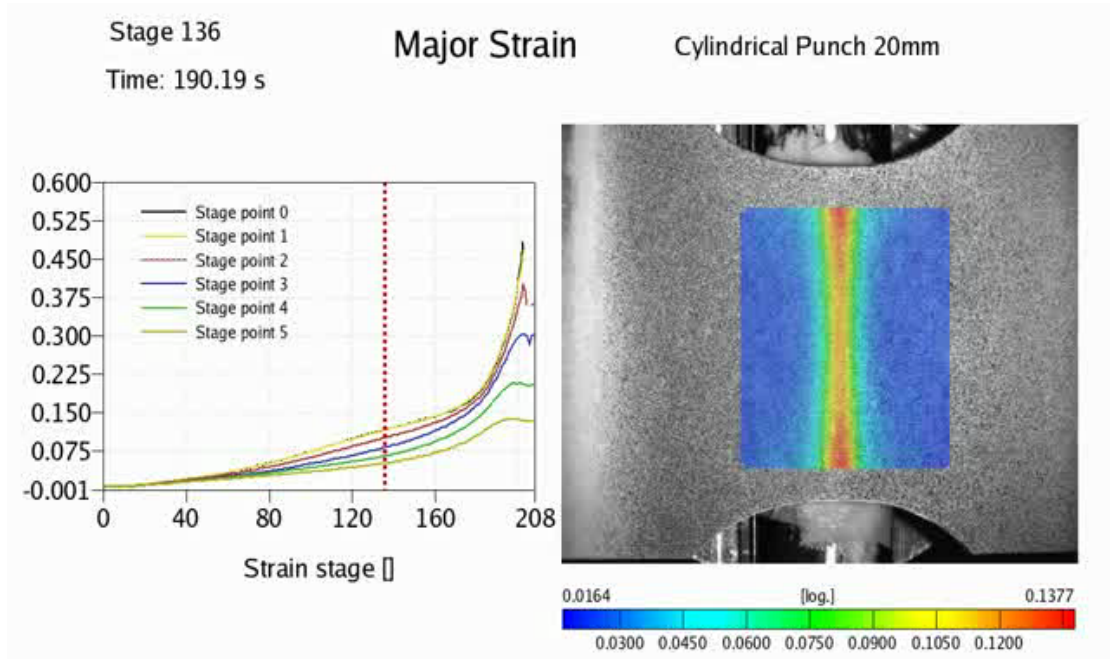


Fig. 6-7: Evolución de deformaciones en ensayo con punzón cilíndrico de Ø20mm

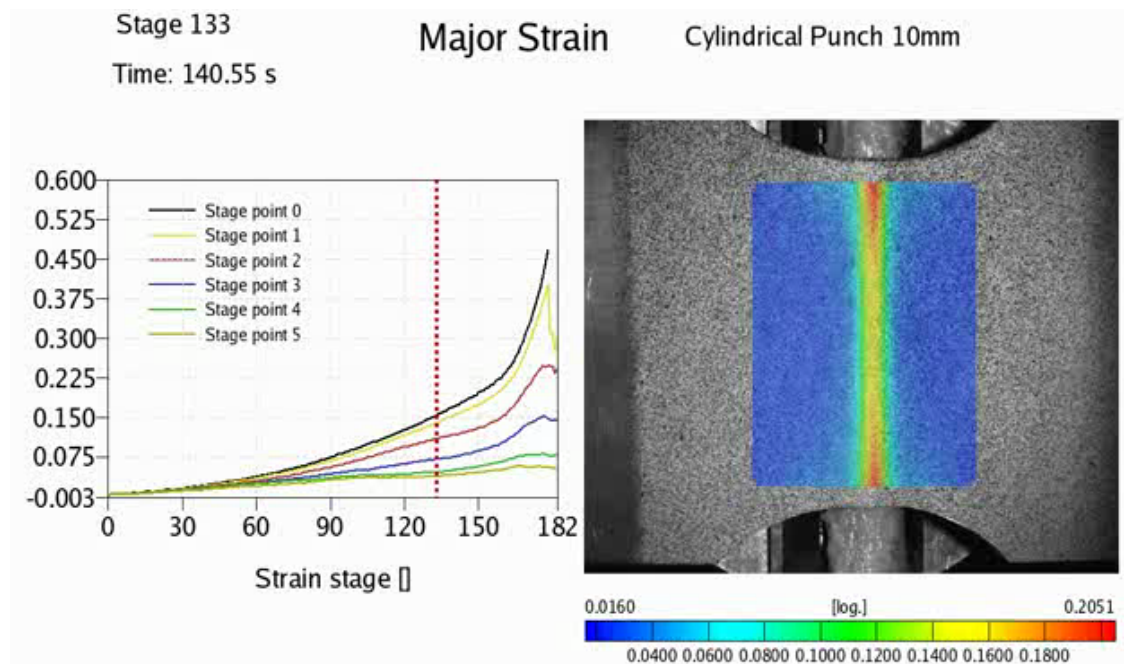


Fig. 6-8: Evolución de deformaciones en ensayo con punzón cilíndrico de Ø10mm.