

Métodos temporales para determinar deformaciones límite en chapas metálicas

Time-dependent methods for limit strains determination of sheet metal

Martín Eduardo Leonard^{1,2}, Javier Walter Signorelli^{1,3}
Michael George Stout¹, Analía Roatta^{1,3}

¹ División Materiales, Instituto de Física Rosario, CONICET/UNR, Bv. 27 de Febrero 210b, Rosario, Santa Fe, Argentina.

² Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, Rosario, Santa Fe, Argentina.

³ Escuela de Formación Básica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, Rosario, Santa Fe, Argentina.

e-mail: leonard@ifir-conicet.gov.ar; signorelli@ifir-conicet.gov.ar; stout_michael@yahoo.com; roatta@ifir-conicet.gov.ar

RESUMEN

El diagrama límite de conformado (DLC), ampliamente utilizado para caracterizar la formabilidad de chapas metálicas, se elabora midiendo deformaciones en la superficie de probetas ensayadas y determinando posteriormente un valor de deformación límite asociado al inicio de la estricción. Actualmente la medición de deformaciones se realiza mediante análisis de correlación de imágenes digitales (CID). El método tradicional para evaluar la deformación límite, dependiente de la posición, se adapta fácilmente a los datos obtenidos por CID pero no es aplicable a materiales con estricciones múltiples u otras formas de deformación inhomogénea. La disponibilidad de técnicas CID ha permitido el surgimiento de métodos dependientes del tiempo, basados en el análisis de la evolución temporal de las deformaciones para definir el inicio de la estricción. En este trabajo se comparan tres técnicas temporales propuestas recientemente para determinar la deformación límite: el método de control del espesor, el método del gradiente de deformaciones y el método de correlación de la aceleración. Para ello se realizaron ensayos de tracción uniaxial de chapa de acero inoxidable dúplex 2205 de 0,92 mm de espesor. Los resultados se comparan con los valores obtenidos mediante el método posicional estándar (norma ISO 12004-2). La dispersión hallada en los valores de deformación límite, atribuibles a la dificultad de fijar objetivamente los parámetros de cada método, muestra que aún restan aspectos a mejorar para disponer de una metodología precisa capaz de ser utilizada en forma general.

Palabras clave: Formabilidad, análisis CID, métodos temporales, acero inoxidable dúplex 2205.

ABSTRACT

The forming limit diagram (FLD) –broadly used to characterize sheet-metal formability– is made by means of strain measurement over the surface of stretched samples and the subsequent determination of limit-strain values associated with the onset of necking. Currently, researchers can make strain measurements with digital image-correlation analysis (DIC). Data measured by DIC easily adapt to the traditional position-dependent method for evaluating limit strains, but this method is not applicable to materials that exhibit inhomogeneous deformation, like multiple necking. DIC analysis allows for the application of time-dependent methods, which are based on analysis of the temporal evolution of strains to define the onset of necking. This article compares three recently proposed time-dependent techniques for determining limit strains: a thickness-control method, the strain-control method and an acceleration-correlation method. For experimental purposes, duplex 2205 stainless-steel sheet, 0.92mm thick, was tested in uniaxial tension. The standard position-dependent method (ISO 12004-2) provides a reference for comparing results. We attribute differences in limit-strain values to the difficulty in objectively setting each method's parameters. These differences show that there are still aspects of the temporal analyses that must be improved on before a precise and generalized

methodology is available.

Keywords: Formability, DIC analysis, time-dependent methods, duplex stainless steel 2205.

1. INTRODUCCIÓN

El diagrama límite de conformado (DLC), desarrollado por KEELER [1] y GOODWIN [2], es una herramienta muy útil para caracterizar la formabilidad de chapas metálicas y tiene gran aplicación tanto desde el punto de vista experimental como tecnológico. El criterio de “límite” está asociado al nivel mínimo de deformación plástica que induce en la chapa una reducción abrupta y localizada del espesor (estricción) y su valor es comúnmente representado en el DLC por una curva denominada curva límite de conformado (CLC). Ésta muestra las distintas combinaciones de deformaciones principales (ε_1 - ε_2) que provocan la estricción, estableciendo un límite por debajo del cual el conformado será seguro. En la construcción de la CLC se emplean diversos tipos de ensayos mecánicos, entre los cuales dos se destacan por sobre el resto: el ensayo Nakajima con punzón hemisférico [3] y el ensayo Marciniak con punzón plano [4]. Ambos permiten evaluar todo el rango de deformaciones del DLC utilizando herramientas y procedimientos relativamente sencillos. La determinación de la deformación límite se realiza mediante el análisis posterior de los valores de deformación medidos en el material ensayado. Históricamente, la mayor parte de las mediciones de deformación se ha realizado mediante el método de grillado manual [5]. Éste consiste en grabar una grilla patrón circular sobre la superficie de la probeta a ensayar para luego medir la distorsión de los círculos producto de la deformación plástica. Para determinar el valor de deformación límite, el procedimiento propuesto por BRAGARD *et al.* [6] ha sido uno de los más utilizados [7]. En esta técnica se ajustan los valores de deformación medidos a lo largo de una recta perpendicular a la banda de estricción con una parábola inversa. Este tipo de análisis se denomina dependiente de la posición, puesto que la ventana de ajuste de la parábola se define observando el cambio de la deformación con respecto a la posición. En base a sucesivas modificaciones propuestas a lo largo de los años, varios grupos de investigación vinculados al IDDRG (The International Deep Drawing Research Group) desarrollaron una serie de lineamientos [7,8] que derivaron en el procedimiento estándar establecido por la norma ISO 12004-2 [9].

La medición por grillado manual tiene como desventaja una precisión relativamente baja, lo que redundaba en una variabilidad muy alta entre los resultados de los ensayos realizados en distintos laboratorios. Una mejora en este aspecto fue introducida por los métodos de medición automáticos mediante sistemas ópticos digitales, los cuales emplean grillas de formas diversas y con resoluciones mayores [5,10]. Por otro lado, con el avance de los sistemas de cámaras digitales y del equipamiento computacional, en la década del ochenta se desarrollaron métodos capaces de calcular las deformaciones a través de la correlación de imágenes digitales (CID); ejemplo de esto son los trabajos de SUTTON *et al.* [11]. Recién a fines de los noventa esta metodología comenzó a difundirse más ampliamente gracias a una mayor disponibilidad de la tecnología requerida [12, 13]. La utilización de CID requiere la aplicación sobre las probetas de un patrón gráfico aleatorio de manchas oscuras sobre un fondo blanco uniforme (“speckle”), del cual se toman imágenes sucesivas durante el ensayo. Las imágenes son luego procesadas mediante un software que resuelve el campo de deformaciones a partir de los desplazamientos relativos del patrón impreso.

En lo que respecta a la determinación de las deformaciones límite, los resultados del análisis CID pueden adaptarse fácilmente a la metodología tradicional dependiente de la posición, lo que proporciona una mayor precisión que la técnica manual. Por otro lado, la correlación de imágenes permite conocer la historia de las deformaciones durante el ensayo. Esto ha posibilitado el desarrollo de métodos basados en la evolución temporal del campo de deformaciones, cuya característica común es la definición de un instante de inicio de la estricción a partir del cual se obtiene el valor de la deformación límite. La utilidad potencial de estas metodologías se funda en las limitaciones que presenta el método dependiente de la posición para evaluar materiales con estricciones múltiples u otras formas de deformación inhomogénea [14, 15, 16]. Una revisión de la ISO 12004-2 [9] está siendo actualmente considerada para incluir las técnicas dependientes del tiempo [9, 14].

Uno de los primeros trabajos en proponer el análisis temporal fue el de MARRON *et al.* [12], el cual define el inicio de la estricción por la intersección de dos rectas ajustadas a la curva de la derivada temporal de la deformación mayor, una recta abarcando la etapa de la deformación homogénea y la otra los puntos posteriores al aumento brusco de la velocidad. VOLK y HORA [17] adoptaron un método análogo pero utilizando como variable la velocidad de la deformación en el espesor. Por otra parte, VACHER *et al.* [13] usaron el análisis CID para obtener el campo de incrementos de deformación entre las últimas imágenes; así, definieron el momento de la inestabilidad como aquél en el que los incrementos de los puntos correspondientes a la zona de falla superaban en un cierto nivel a los de las otras regiones de la probeta. Este procedimiento

puede asimilarse al sugerido por WANG *et al.* [18] en el sentido en que ellos analizan temporalmente un incremento, en este caso el de la altura de la superficie de probetas ensayadas con punzón. El instante en que la diferencia entre las alturas sufre un aumento brusco determina el inicio de la estricción localizada.

El método propuesto por MERKLEIN *et al.* [15], al que llamamos de correlación de la aceleración, se basa en un análisis de regresión lineal de la segunda derivada temporal de la deformación en la zona de la estricción. HOTZ *et al.* [14] propusieron una variante de este método empleando para el ajuste lineal de la aceleración un segmento de recta deslizante. Una técnica más reciente, la cual denominamos método de gradiente de deformaciones, analiza la evolución de la velocidad de la deformación determinando el inicio de la inestabilidad en el instante en que dicha velocidad se anula [19]. Otra propuesta reciente, método de control del espesor, consiste básicamente en comparar la evolución del espesor de la probeta en la zona de la estricción con la del espesor medido en una región mayor [16].

En este trabajo se implementan y analizan los métodos de control del espesor, gradiente de deformaciones y correlación de la aceleración en ensayos de tracción uniaxial de chapa de acero inoxidable dúplex 2205. Las deformaciones límite obtenidas mediante dichos métodos temporales se comparan con valores determinados mediante el procedimiento posicional estándar establecido por la norma ISO 12004-2 [9].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Material y equipamiento de ensayo

El material ensayado es acero inoxidable dúplex (ferrítico-austenítico) de composición nominal UNS S32205, comúnmente conocido como 2205. Las muestras se extrajeron de una chapa comercial laminada en frío de 0,92 mm de espesor. La composición química reportada se muestra en la Tabla 1 y las propiedades mecánicas en la Tabla 2.

Tabla 1: Composición química del material ensayado (porcentaje en peso).

	C	N	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
UNS S32205 / ISO 4462-318-03-1	≤0,03	0,14-0,20	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	≤2,0	≤1,0	≤0,03	≤0,02
Fabricante (Outokumpu 2205)	0,02	0,27	25	7	4	-	-	-	-

Tabla 2: Propiedades mecánicas del material ensayado.

	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción	Elongación	Dureza
Valores típicos según fabricante	690 MPa	880 MPa	26 %	HRB 101
Valores medidos	~700 MPa	~890 MPa	30-40 %	HRB 103

Se tomaron tres probetas del menor tamaño especificado por la norma ASTM E 8M [20], dos en la dirección de laminación de la chapa (probetas AD-TCh-00-33/34) y una en la dirección perpendicular (AD-TCh-90-60). Se ensayó también una muestra de tamaño mayor paralela al sentido de laminación, correspondiente al tipo 1 de la norma ISO 6892-1 [21] (AD-TGr-00-02).

Los ensayos de tracción uniaxial se realizaron con un equipo Instron Universal Testing System 3382, de 100 kN de capacidad. El avance del brazo de la máquina fue calibrado de forma tal de desarrollar una velocidad de deformación ingenieril constante de aproximadamente $0,03 \text{ min}^{-1}$ en todos los ensayos.

La medición del campo de deformaciones se efectuó mediante correlación de imágenes digitales. Para ello se aplicó sobre cada muestra un patrón estocástico de motas negras sobre un fondo uniformemente blanco, y a lo largo de cada ensayo se tomaron fotografías cada 2 segundos (excepto para la probeta AD-TCh-90-60, con 3 s de intervalo) mediante una cámara Nikon D3300 18-55 VR II. El análisis CID se llevó a cabo mediante el programa de código abierto Ncorr v1.2 [22]. Se utilizaron los parámetros siguientes: radio del círculo de análisis ("subset radius"): 30 píxeles; espaciamento entre "subsets": 2 píxeles; radio del círculo de ajuste plano de deformaciones: 8 píxeles; modo autopropagación de semillas para el análisis de grandes deformaciones.

2.2 Métodos adoptados

A continuación se presentan los métodos temporales implementados en el presente trabajo, y se detalla la adaptación de la técnica estándar utilizada de referencia.

2.2.1 Método de control del espesor [17]

Esta metodología analiza la evolución del campo de deformaciones promediando sus valores sobre dos áreas circulares diferentes centradas en la banda de estricción. Un círculo pequeño, de radio r^P , describe la deformación de una región dentro de la banda. El otro círculo, de un radio mayor r^A , refleja la evolución de la deformación en el área circundante abarcando parte de la zona que no sufre estricción (Figura 1, izquierda).

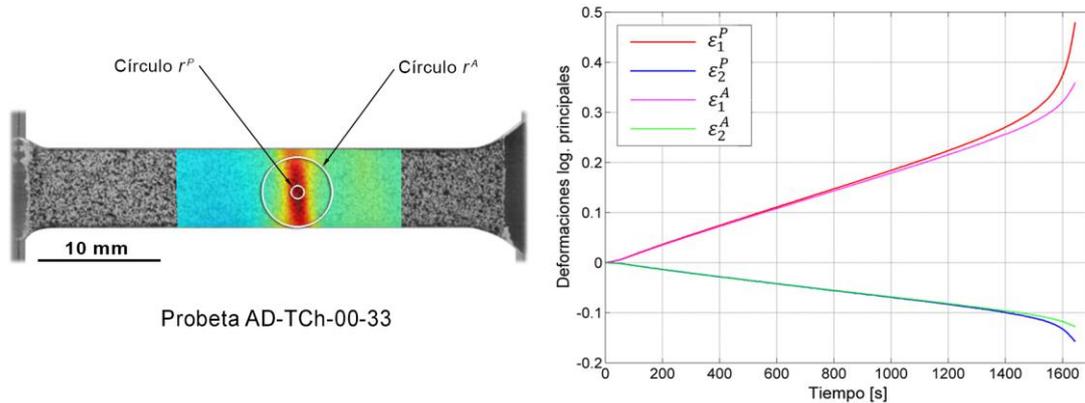


Figura 1: Círculos de análisis sobre la probeta (izq.) y evolución temporal de las deformaciones en cada círculo (der.).

El criterio para determinar la deformación límite se basa en la reducción abrupta del espesor de la chapa que ocurre con la estricción. Asumiendo el principio de conservación del volumen, el espesor puede expresarse en función de las deformaciones logarítmicas principales en el plano de la probeta (ε_1 y ε_2 , obtenidas del análisis CID, Figura 1, derecha). Se define entonces el coeficiente K , que expresa la evolución temporal de la relación entre los espesores:

$$K = \frac{t^P}{t^A} = \frac{\exp(-\varepsilon_1^P - \varepsilon_2^P)}{\exp(-\varepsilon_1^A - \varepsilon_2^A)}, \quad (1)$$

donde t es el espesor y los superíndices P y A corresponden a los círculos de radios respectivos. El coeficiente K valdrá aproximadamente uno durante el período de deformación homogénea y se reducirá bruscamente al comenzar la estricción debido a la reducción del espesor en la banda. El instante de inicio de la estricción, T_{lim} , se define cuando el valor de K disminuye por debajo de un nivel límite:

$$K_{lim} \leq K_{prom} - \delta K, \quad (2)$$

donde δK expresa la desviación del coeficiente debida al ruido de los datos medidos durante el ensayo (Figura 2, izquierda). Las deformaciones límite quedan determinadas por el valor de las deformaciones principales en el área circular mayor al inicio de la estricción, es decir:

$$\varepsilon_{1,lim} = \varepsilon_1^A(T_{lim}); \quad \varepsilon_{2,lim} = \varepsilon_2^A(T_{lim}) \quad (3)$$

Este método conlleva la definición de tres parámetros: los radios de los círculos, r^P y r^A , y el valor límite del coeficiente de relación de espesores, K_{lim} . En nuestro caso, los resultados obtenidos muestran un nivel de ruido más bajo que los reportados por los autores del método; a modo de ejemplo, en la Figura 2 (der.) se muestra el caso de la probeta AD-TCh-90-60, que fue la que más ruido presentó. Por este motivo se propone el mismo valor límite del coeficiente K que adoptaron los autores ($K_{lim} = 0,98$), pero en este caso la elección es independiente del nivel de ruido detectado. Esto equivale a establecer el inicio de la estricción fijando una reducción localizada admisible del espesor del 2% (aproximadamente).

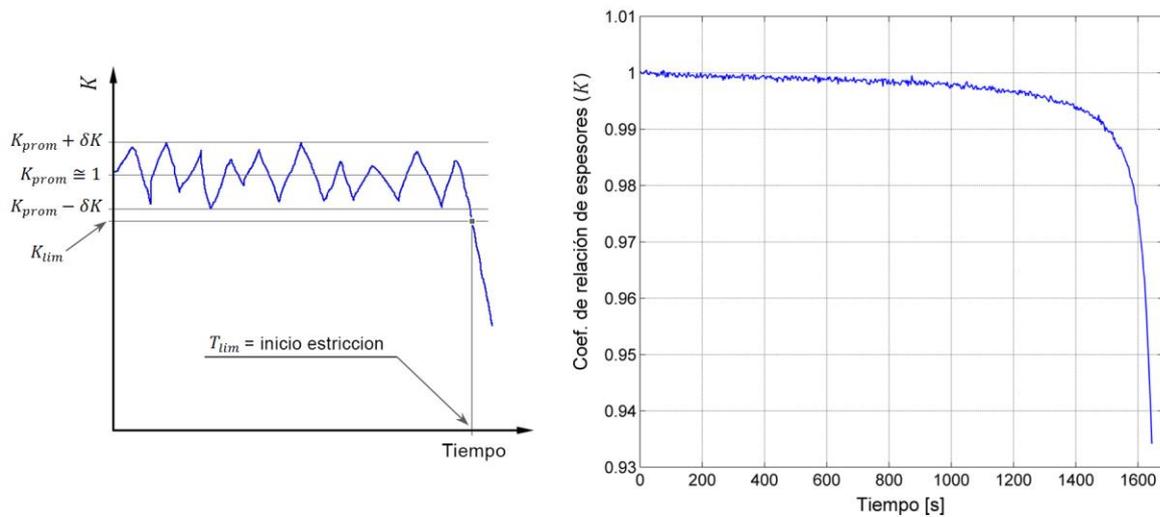


Figura 2: Determinación del inicio de la estricción (izq.) y evolución de K en la probeta AD-TCh-90-60 (der.).

En lo que respecta al tamaño de los círculos, es recomendable que r^P sea lo más pequeño posible a la vez que r^A sea lo mayor posible. Dados los límites físicos impuestos para estas variables (tamaño del elemento mínimo del análisis CID para el círculo pequeño, y tamaño de las probetas para el círculo mayor), los autores del método recomiendan tomar r^P en el rango de $0,5t_0-t_0$ y $r^A \cong 5r^P-10r^P$. En el presente trabajo se adoptó un r^P de aproximadamente $0,55t_0$ y para r^A un valor próximo a $5r^P$. Este último se corresponde con el límite inferior recomendado debido al ancho relativamente pequeño de las probetas empleadas. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para las muestras AD-TCh-00-33 y AD-TCh-00-34 variando el radio r^P para un r^A fijo. Puede notarse que, si bien al reducirse r^P el inicio de la estricción es determinado más tempranamente, la variación respectiva de las deformaciones límite no supera el 3%. La variación del círculo grande implica discrepancias mayores, como se muestra en el lado derecho de la Tabla 3. A valores crecientes de r^A se encuentran deformaciones límite menores debido a dos efectos combinados: por un lado T_{lim} es menor ya que el coeficiente K decae más tempranamente (Figura 3, derecha); y por el otro un área mayor abarca más puntos fuera de la banda de estricción y por lo tanto provee un valor más suave de la deformación medida (Figura 3, izq.). Empleando círculos mayores también puede observarse una dispersión menor entre los resultados de ambas probetas.

Tabla 3: Influencia del tamaño de los círculos de análisis.

Probeta	r^P [mm]	r^A [mm]	$\epsilon_{1,lim}$	$\epsilon_{2,lim}$	r^P [mm]	r^A [mm]	$\epsilon_{1,lim}$	$\epsilon_{2,lim}$
AD-TCh-00-33	0,32	2,45	0,322	-0,086	0,50	2,10	0,338	-0,090
	0,50		0,324	-0,087		2,30	0,330	-0,088
	0,65		0,326	-0,087		2,45	0,324	-0,087
	0,81		0,330	-0,088		2,60	0,310	-0,083
AD-TCh-00-34	0,32	2,45	0,325	-0,087	0,50	2,10	0,342	-0,091
	0,50		0,325	-0,087		2,30	0,336	-0,090
	0,65		0,328	-0,088		2,45	0,325	-0,087
	0,81		0,330	-0,088		2,60	0,311	-0,083

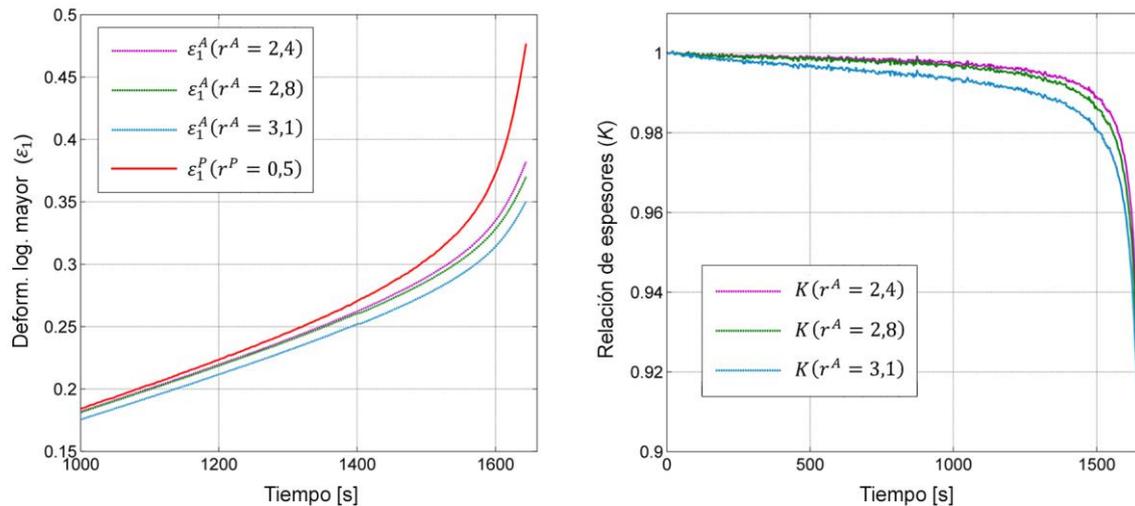


Figura 3: Influencia del tamaño del círculo r^A sobre el valor de la deformación mayor (izq.) y el coeficiente K (der.)

Cabe aclarar que, dado el bajo nivel de ruido, podríamos haber considerado un $K_{lim} = 0,99$. Esto hubiese sido razonable sobre todo para el caso de la probeta AD-TGr-00-02, cuya localización ocurre más cerca del final del ensayo y por lo tanto el valor de K se reduce más bruscamente que en las demás muestras. Sin embargo decidimos mantener el valor de 0,98 para ser coherentes con el trabajo de VYSOCHYNSKIY *et al.* [16] y ateniéndonos a la posibilidad de que a futuro se aplique este método a ensayos con niveles de ruido más altos. En la Tabla 4 se muestran las discrepancias encontradas en las deformaciones mayores cuando se toman valores disímiles del coeficiente límite. La diferencia mayor, del orden del 11%, se obtuvo con la probeta AD-TCh-90-60, probablemente por el nivel de ruido mayor que presentó.

Tabla 4: Discrepancias entre las deformaciones $\epsilon_{1,lim}$ a diferentes valores K_{lim} .

Probeta	$K_{lim} = 0,99-0,98$	$K_{lim} = 0,98-0,97$
AD-TCh-00-33	10,5%	5,3%
AD-TCh-00-34	9,8%	5,2%
AD-TCh-90-60	11,2%	5,7%
AD-TGr-00-02	5,3%	3,3%

($r^P \cong 0,5\text{mm}$; $r^A \cong 2,5\text{mm}$)

2.2.2 Método del gradiente de deformaciones [19]

La propuesta consiste en analizar la evolución de la velocidad de deformación de cada punto contenido en un segmento de recta perpendicular a la banda de estricción. El fenómeno de inestabilidad plástica implica que los puntos que quedan por fuera de la estricción dejan de deformarse cuando ésta comienza a desarrollarse, ya que toda la deformación se concentra en dicha zona. La deformación de los puntos contenidos en la banda aumenta sostenidamente hasta la fractura (ver conjunto de curvas comprendidas entre A y B, Figura 4, izq.). A medida que nos alejamos del centro de la estricción se observa que la deformación aumenta con velocidades cada vez menores, hasta que se llega a un punto para el cual la velocidad decae a cero (curva B en la Figura 4, derecha). Este punto es propuesto por los autores como el que define el ancho de la banda de estricción, ya que representa el límite de la región del material cuya deformación se detiene por efecto de la inestabilidad local. El instante en el que la velocidad de dicho punto comienza a disminuir se propone como inicio de la estricción (T_{lim}). La deformación límite se define como el valor de deformación del punto ubicado en el centro de la banda (punto A) medido en el momento correspondiente al inicio de la estricción, T_{lim} .

Para lograr mayor claridad en las curvas de velocidad se suavizaron los datos de deformación obtenidos del análisis CID, aplicando un promedio móvil de cinco puntos. Para cada probeta se consideraron tres segmentos perpendiculares a la banda de estricción; los resultados presentados en la siguiente sección corresponden al promedio de los valores obtenidos para cada segmento. Una desventaja de este método es que, al

medir la deformación puntualmente en el píxel que alcanza la mayor deformación, una pequeña desviación en el instante de inicio de la estricción implica una variación importante en el valor de deformación límite. Para minimizar este riesgo se consideraron todos los píxeles disponibles del campo medido por CID. En la Figura 4 sólo se muestran las curvas correspondientes a algunos de los puntos observados.

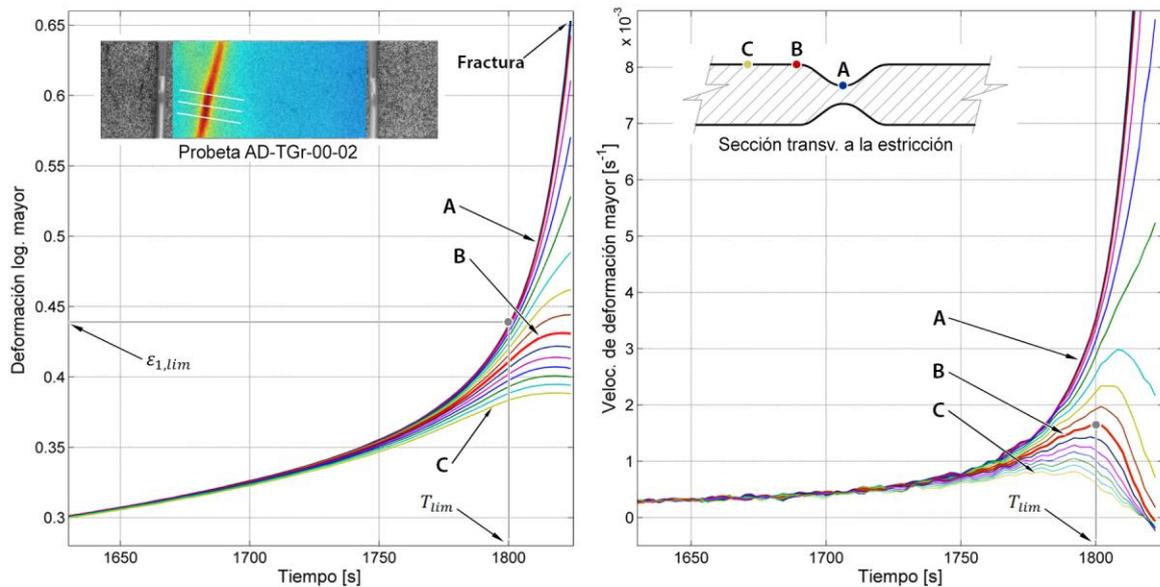


Figura 4: Evolución de la deformación mayor (izq.) y de su velocidad (der.) en varios puntos de la probeta.

2.2.3 Método de correlación de la aceleración [16]

Esta metodología propone un análisis temporal promediando las deformaciones medidas de un conjunto de puntos contenidos en un círculo ubicado sobre la banda de estricción. Se utiliza la última imagen del análisis CID para determinar el punto que alcanza la deformación máxima previo a la fractura, y sobre éste se posiciona el círculo promedio cuyo radio es del orden del doble del espesor de la probeta. Luego se calcula la aceleración de la deformación promediada en el círculo y se aplica un análisis de correlación lineal. La aceleración presenta un comportamiento aproximadamente lineal durante el período de deformación homogénea, y cuando comienza la estricción su valor se incrementa bruscamente. Por lo tanto, si se ajustan los valores de aceleración con una recta de longitud creciente y se calcula el coeficiente de correlación o determinación (R^2), éste presentará un máximo local en el momento en que la curva se aparte de su comportamiento lineal, determinando así el instante de inicio de la estricción. La deformación límite se define como el valor de la deformación promedio en el círculo para la imagen correspondiente al máximo local de R^2 .

Cabe aclarar que la evolución de R^2 desde un valor relativamente bajo hasta un máximo se debe a la existencia de ruido en los datos. No obstante, para implementar esta técnica se debieron suavizar los datos de deformación obtenido por CID, ya que al calcular la segunda derivada el ruido se magnifica excesivamente. Para ello se adoptó el siguiente criterio: la distribución temporal de la deformación (promediada sobre el círculo de análisis) se ajusta mediante un polinomio de cuarto orden aplicado sobre un rango móvil de valores. Las derivadas primera y segunda (velocidad y aceleración de la deformación mayor, Figura 5) se determinan luego derivando el polinomio de ajuste. El análisis de correlación lineal se realiza, entonces, para la curva de aceleración así obtenida (Figura 5, der.). Con respecto al tamaño del círculo de análisis, vale lo mencionado para el método del espesor: a radios mayores corresponden valores menores de deformación límite debido a que se abarcan puntos con menor deformación. Siguiendo la recomendación del método original, para nuestros ensayos se adoptó un radio de aproximadamente 1,85 mm, equivalente a dos veces el espesor de la chapa bajo estudio. En lo que respecta al suavizado, se observó una variación en el instante de inicio de la estricción encontrado según el tamaño del rango de datos abarcado por el polinomio de ajuste. En efecto, a mayor cantidad de datos, la curva de aceleración se hace más suave y por ende el máximo de R^2 aparece a tiempos menores, lo que redundará en un valor de deformación límite más conservador. Para cada ensayo se adoptó un rango de aproximadamente el 6% de la cantidad total de imágenes.

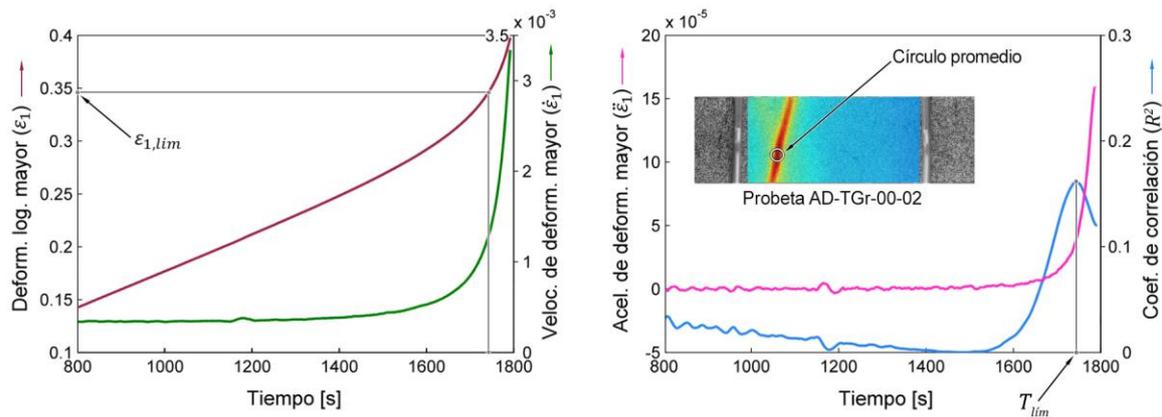


Figura 5: Deformación y velocidad de deformación (izq.); aceleración y coeficiente de correlación (der.)

2.2.4 Método estándar [9]

Se adaptó el procedimiento especificado en la ISO 12004-2 [9] a la geometría de nuestras probetas (la norma está indicada para ensayos tipo Nakajima o Marciniak). Se tomaron tres secciones rectas normales a la estricción, con una distancia de separación de 1 mm. Para el borde externo de la ventana de ajuste se consideró el punto para el que la segunda derivada de la deformación respecto de la posición se hace aproximadamente cero (curvatura nula).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 se muestran los valores de deformación límite de las distintas probetas ensayadas, obtenidos mediante los métodos temporales descritos y el método estándar dependiente de la posición. Los parámetros adoptados para la aplicación de cada método se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Resumen de los parámetros adoptados.

Método de control del espesor	
Círculo “puntual”:	$r^P \cong 0,5 \text{ mm}$
Círculo mayor:	$r^A \cong 2,5 \text{ mm}$
Coeficiente límite:	$K_{lim} = 0,98$
Método del gradiente de deformaciones	
Secciones rectas:	3
Dirección de las secciones:	\perp estricción
Distancia entre secciones:	$\sim 1 \text{ mm}$
Suavizado de datos:	Prom. móvil 5 puntos
Método de correlación de la aceleración	
Círculo de análisis:	$r \cong 1,85 \text{ mm}$
Suavizado de datos:	Polin. gr. 4; 6% de imágenes
Método estándar (ISO 12004-2)	
Secciones rectas:	3
Dirección de las secciones:	\perp estricción
Distancia entre secciones:	$\sim 1 \text{ mm}$

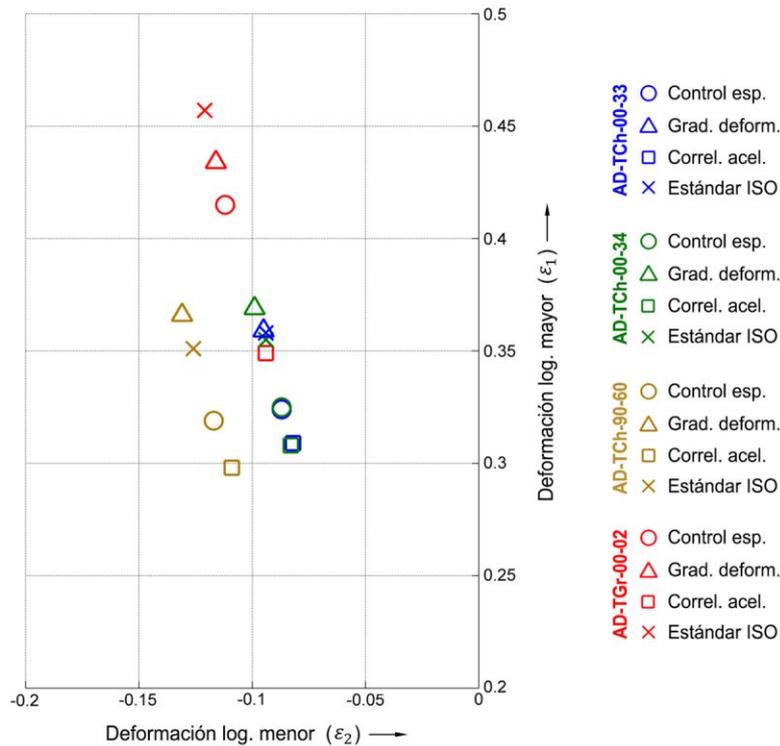


Figura 6: Resultados de deformación límite de cada probeta obtenidos con los diferentes métodos.

Se observa discrepancia entre los resultados dados por los distintos métodos (entre un 16 y 23%) y entre los de cada probeta (del orden del 20% en ϵ_1). En lo que respecta a las probetas, independientemente del método considerado hay buena correlación entre los resultados de las muestras equivalentes (AD-TCh-00-33/34), pero los valores de la probeta AD-TGr-00-02 son más elevados que los del resto. Esto puede explicarse por el efecto del tamaño mayor de dicha muestra, teniendo en cuenta que el espesor es el mismo para todas. Por otro lado, la probeta AD-TCh-90-60, de iguales dimensiones que las dos primeras, presenta niveles relativamente más altos de deformación menor, lo cual puede atribuirse a la anisotropía de la chapa.

Con respecto a las diferencias entre los métodos temporales adoptados, puede decirse que la técnica de correlación de la aceleración dio los resultados más conservadores, lo que podría explicarse en parte por el tamaño del círculo de análisis pero fundamentalmente por la influencia del suavizado de los datos. Los valores más elevados corresponden en general al método del gradiente de deformaciones, mientras que el de control del espesor arrojó valores intermedios para todos los casos. Para las muestras equivalentes existe gran coincidencia entre los resultados, excepto con la técnica del gradiente en cuyo caso se observa una leve diferencia entre las deformaciones límite obtenidas. También para dicho método se ve un comportamiento disímil entre las probetas AD-TCh-90-60 y AD-TGr-00-02: en la primera el resultado supera al valor obtenido por el método estándar mientras que en la otra ocurre lo inverso. Esto podría explicarse por la sensibilidad inherente a esta metodología debida al monitoreo puntual (píxel a píxel) que se realiza sobre las deformaciones medidas.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluaron comparativamente tres métodos temporales de determinación de la deformación límite propuestos recientemente. Las discrepancias encontradas en los resultados pueden atribuirse a la diferencia entre los criterios empleados por cada método y a la dificultad de definir objetivamente valores óptimos para sus parámetros. En el caso de la técnica de control del espesor se evidenció que los resultados difieren según los tamaños de los círculos de evaluación considerados. Además, el instante de inicio de la inestabilidad varía en función del valor límite adoptado para el coeficiente de relación de espesores (K), que no siempre puede establecerse tal como lo proponen los autores del método ya que depende del nivel de ruido de las mediciones. Una ventaja de esta técnica es que no analiza la velocidad de deformación y por lo tanto no se deben derivar los datos medidos.

Con respecto a la metodología de la correlación, también requiere la definición del tamaño de un

círculo de evaluación. Pero su principal desventaja radica en que la definición del instante de inicio de la estricción depende de la existencia de ruido en los datos medidos. Más aún, el instante determinado varía según el suavizado que se aplique sobre los datos de deformación. A futuro se profundizará en el estudio de esta limitación.

El método del gradiente de deformaciones, pese a la leve dispersión encontrada en los resultados, posee la ventaja de no requerir el ajuste de parámetros por parte del usuario. Por este motivo, entre las técnicas analizadas y para el material y el tipo de ensayo empleado, este método es el más objetivo para determinar las deformaciones límite.

Las técnicas temporales en general poseen la potencialidad de brindar mayor objetividad para la determinación de las deformaciones límite, como así también de superar las limitaciones del procedimiento estándar dependiente de la posición, sobre todo para los materiales que presentan deformación inhomogénea. No obstante, la abundancia de métodos propuestos en los últimos años así como la propia dispersión hallada en los resultados de este trabajo indican que aún resta camino para disponer de una técnica precisa y objetiva capaz de ser utilizada de manera generalizada.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a Fernando Ugo y a Daniel y Jeremías Castellani, personal de apoyo del Instituto de Física Rosario. También a María de los Ángeles Bertinetti, Claudio Schwindt y Fernando Schlosser por sus aportes y sugerencias. Este trabajo de investigación fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, proyecto PICT 2013-0558.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] KEELER, S.P., BACKOFEN, W.A., “Plastic Instability and Fracture in Sheet Stretched Over Rigid Punches”, *Transactions of the ASM*, v. 56, pp. 25–48, 1963.
- [2] GOODWIN, G.M., Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, en: SAE Technical Paper n. 680093, pp. 380–387, 1968.
- [3] NAKAJIMA, K., KIKUMA, T., HASUKA, K., *Study on the formability of steel sheets*, en: Yawata Technical Report n. 264, pp. 8517–8530, 1968.
- [4] MARCINIAK, Z., KUCZYNSKI, K., “Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal”, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 9, pp. 609–612, 1967.
- [5] HOTZ W, TIMM J., “Experimental determination of forming limit curves (FLC)”, In: *Proc. of the 7th numisheet conference and workshop*, pp. 271–278, Interlaken, Suiza, 2008.
- [6] BRAGARD, A., BARET, J.C., BONNARENS, H. *A simplified method to determine the FLD onset of localized necking*, en: Rapport Centre de Recherche de la Metallurgie n. 33, pp. 53–63, 1972.
- [7] BANABIC, D., *Sheet Metal Forming Processes*, Berlin, Springer-Verlag, 2010.
- [8] LIEBERTZ, H., DUWEL, A., ILLIG, R., HOTZ, W., KELLER, S., *et al.*, “Guideline for the determination of forming limit curves”, In: *Proceedings of International Deep Drawing Research Group (IDDRG) Conference*, Sindelfingen, Alemania, 2004.
- [9] ISO 12004-2:2008, *Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Forming-Limit Curves. Part 2: Determination of Forming-Limit Curves in the Laboratory*, 2008.
- [10] EMMENS, W., *Formability: A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal*, Berlin, Springer-Verlag, 2011.
- [11] SUTTON, M., WOLTERS, W., PETERS, W., *et al.*, “Determination of displacements using an improved digital correlation method”, *Image And Vision Computing*, v.1, n.3, pp. 133–139, 1983.
- [12] MARRON, G., MOINIER, L., PATOU, P., CELESKI, J., “A new necking criterion for forming limit diagrams”, en: *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group WG Meeting*, Haugesund, 1997.
- [13] VACHER, P., HADDAD, A., ARRIEUX, R., “Determination of the forming limit diagrams using image analysis by the correlation method”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 48, n.1, pp. 227–230, 1999.
- [14] HOTZ, W., MERKLEIN, M., KUPPERT, A., FRIEBE, H., KLEIN, M., “Time dependent FLC determination – comparison of different algorithms to detect the onset of unstable necking before fracture”, *Key Eng. Mater*, v. 549, pp. 397–404, 2013.

- [15] MERKLEIN, M., KUPPERT, A., GEIGER, M., “Time dependent determination of forming limit diagrams”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 59, n.1, pp. 295–298, 2010.
- [16] VYSOCHINSKIY, D., COUDERT, T., HOPPERSTAD, O.S., LADEMO, O.G., REYES, A., “Experimental detection of forming limit strains on samples with multiple local necks”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 227, pp. 216–226, 2016.
- [17] VOLK, W., HORA, P., “New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination”, *Int. J. Material Forming*, v. 4, n. 3, pp. 1–8, 2011.
- [18] WANG, K., CARSLEY, J., HE, B., LI, J., ZHANG, L., “Measuring forming limit strains with digital image correlation analysis”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 5, pp. 1120–1130, 2014.
- [19] MARTÍNEZ-DONAIRE, A.J., GARCÍA-LOMAS, F.J., VALLELLANO, C., “New approaches to detect the onset of localised necking in sheets under through-thickness strain gradients”, *Materials and Design*, v. 57, pp. 135–145, 2014.
- [20] ASTM E8M–04, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2004.
- [21] ISO 6892-1:2009, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, 2009.
- [22] BLABER, J., ADAIR, B., ANTONIOU, A., “Ncorr, Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab software”, *Experimental Mechanics*, v. 55, n. 6, pp. 1105–1122, 2015.