

PROYECTO FIN DE CARRERA

Análisis experimental y numérico del fallo en chapas conformadas de aluminio sometidas a tracción biaxial

Carlos Fernando Mellado Castellero

4 de septiembre de 2007

Capítulo 1

Resultados

La determinación del comienzo del límite de conformado es un asunto que no ha sido todavía resuelto debido a las limitaciones de las técnicas experimentales, tales como la determinación visual el comienzo de la estricción.

En este trabajo vamos a emplear un sistema comercial de medida de las deformaciones in-situ, *ARAMIS*, y un programa comercial de elementos finitos, *ABAQUS*, para determinar el comienzo del *necking*. Conocido el inicio de éste, construiremos el Diagrama Límite de Conformado en estricción.

Se observa que en la zona de tracción biaxial el FLDN se aproxime al FLDF, alejándose progresivamente a medida que ϵ_{II} tiende a cero. La Fig. 1.1 muestra la comentado antes. Los resultados que obtengamos deben pues verificar este hecho reconocido.

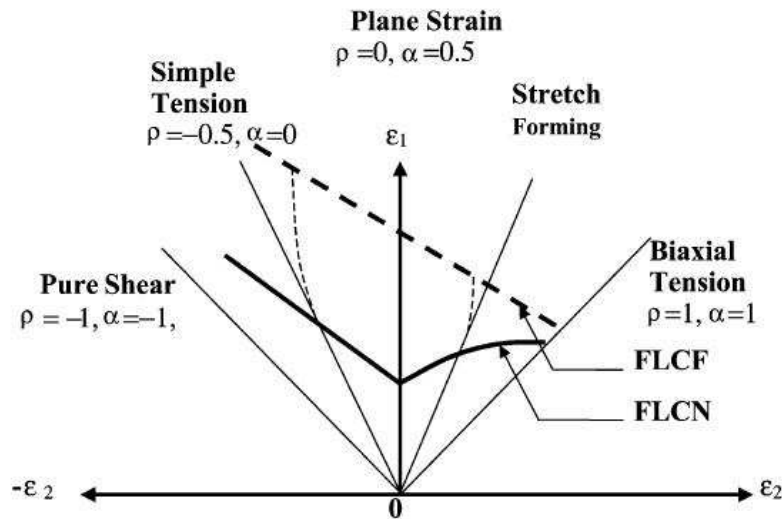


Figura 1.1: Diagrama esquemático mostrando el FLDF y FLDN. Imagen extraída de [10].

El presente trabajo propone estudiar la evolución de ϵ_{III} a lo largo de la historia del punto de fallo para predecir el momento en el cual se produce el *necking*. En estudios

llevados a cabo por Jain et al. [9], el criterio empleado para determinar el inicio del *necking* fue localizar el punto de inflexión en la derivada de la curva de historia la deformación principal I. Un razonamiento similar puede aplicarse a la evolución de ϵ_{III} en el instante de inicio de la estricción, es decir, se puede argumentar que esta comienza cuando se produce una inflexión en la velocidad de adelgazamiento del material, $\dot{\epsilon}_{III}$. Dado que ϵ_{III} es aproximadamente $-(\epsilon_I + \epsilon_{II})$ con lo que sus resultados deben ser similares a los obtenidos con ϵ_I . No obstante, ϵ_{III} tiene un claro sentido físico, dado que representa el adelgazamiento del material, siendo esta la principal ventaja respecto al uso de ϵ_I .

1.1. Obtención de los FLDs empleando *ARAMIS*

Diagrama Límite de Conformado a Fractura, FLDF.

A continuación se representan los diagrama límite de conformado a fractura para la aleaciones de aluminio 2024-T3, y espesores de 1.2 y 1.6 mm. Dichos diagramas se han obtenido utilizando la máquina de ensayos Universal a embutición Erichsen que se encuentra en los laboratorios del grupo de *Ingeniería de los Procesos de Fabricación* de esta escuela.

Para la obtención del FLDF analizábamos el *frame* anterior al de fallo de la probeta. De este *frame* nos interesa sólo la zona central sometida a una mayor deformación que el resto y representada por una zona rojiza con bordes anaranjados. La Fig. 1.2 muestra el *frame* anterior a la fractura, de una probeta de 80x25 y espesor 1.2 mm, en ella se muestra con más detalle la zona rojiza de interés para el cálculo del FLDF antes comentada.

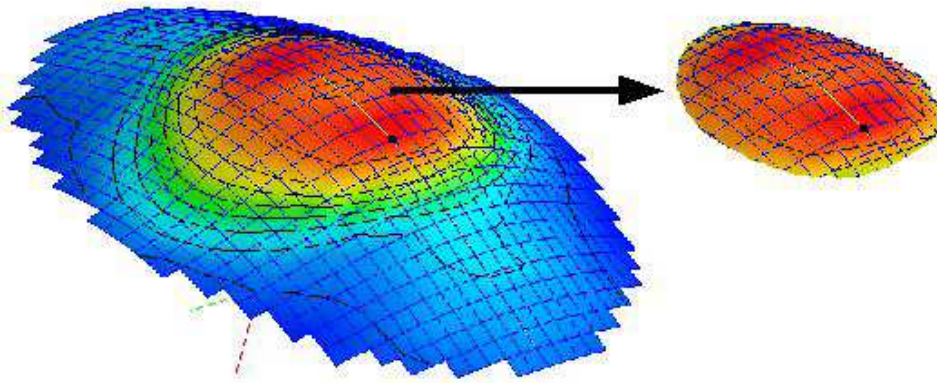


Figura 1.2: Zona de interés para el cálculo del Diagrama Límite de Conformado a Fractura.

De la zona de interés se sacan los valores de las variables ϵ_I y ϵ_{II} con los que se construyeron los diagramas límite de conformado a fractura, FLDF, que se muestran en las Figs. 1.3 y 1.4.

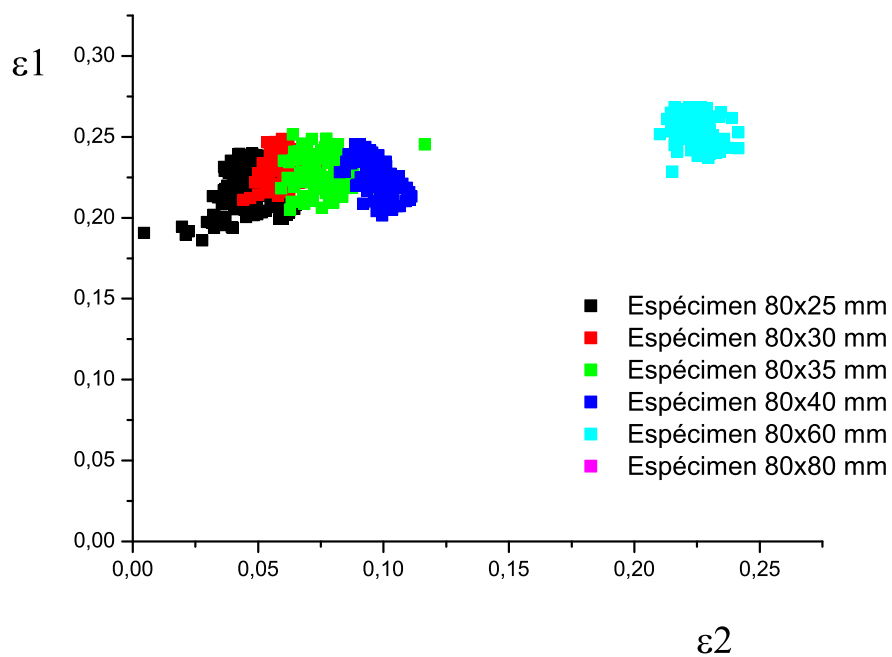


Figura 1.3: FLD experimental de la aleación 2024-T3 y espesor de 1.2 mm.

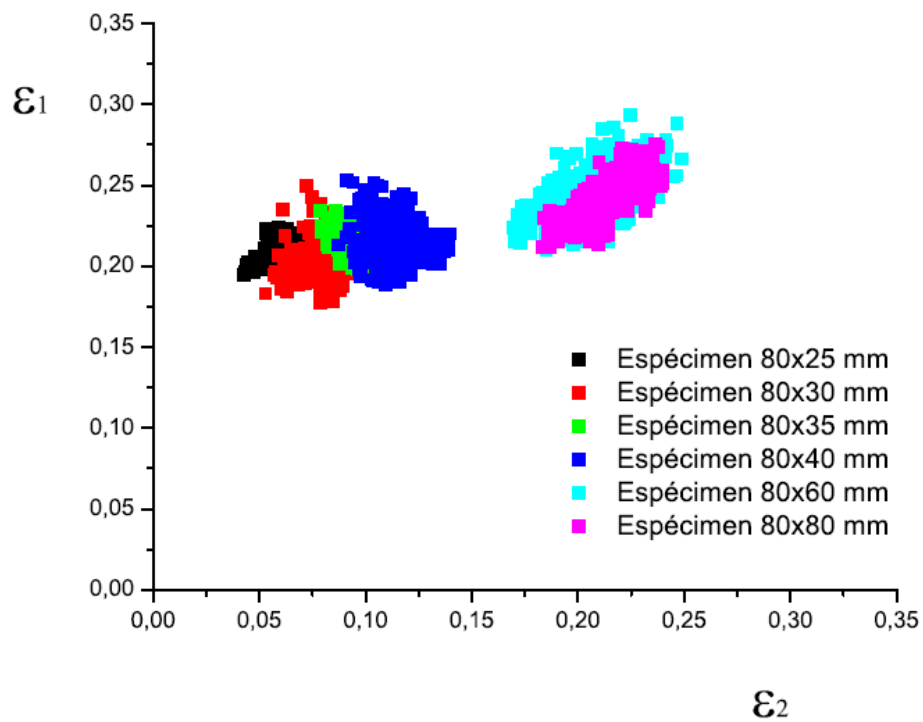


Figura 1.4: FLD experimental de la aleación 2024-T3 y de espesor 1.6 mm.

Estas Figs. no se han obtenido directamente por pantalla con *ARAMIS*, fue necesario exportar los datos en formato *.txt* a un programa específico para el tratamiento de datos como es *OriginPro*.

Diagrama Límite de Conformado a Necking, FLDN.

Para la obtención del FLDN con *ARAMIS* analizábamos el *frame* anterior al que se producía el fallo de la probeta. Una vez identificada la zona de fractura se definían sobre la probeta una *sección* y sobre ésta, un *punto*, en la zona de fallo. Se estudio la evolución de las variables de estos elementos desde el comienzo del estirado hasta el momento posterior al fallo de la probeta. A la izquierda de la Fig. 1.5 se muestra la *sección y el punto* definidos sobre la imagen de una probeta proporcionada por *ARAMIS*, a la derecha la gráfica que se obtuvo para el estudio del necking.

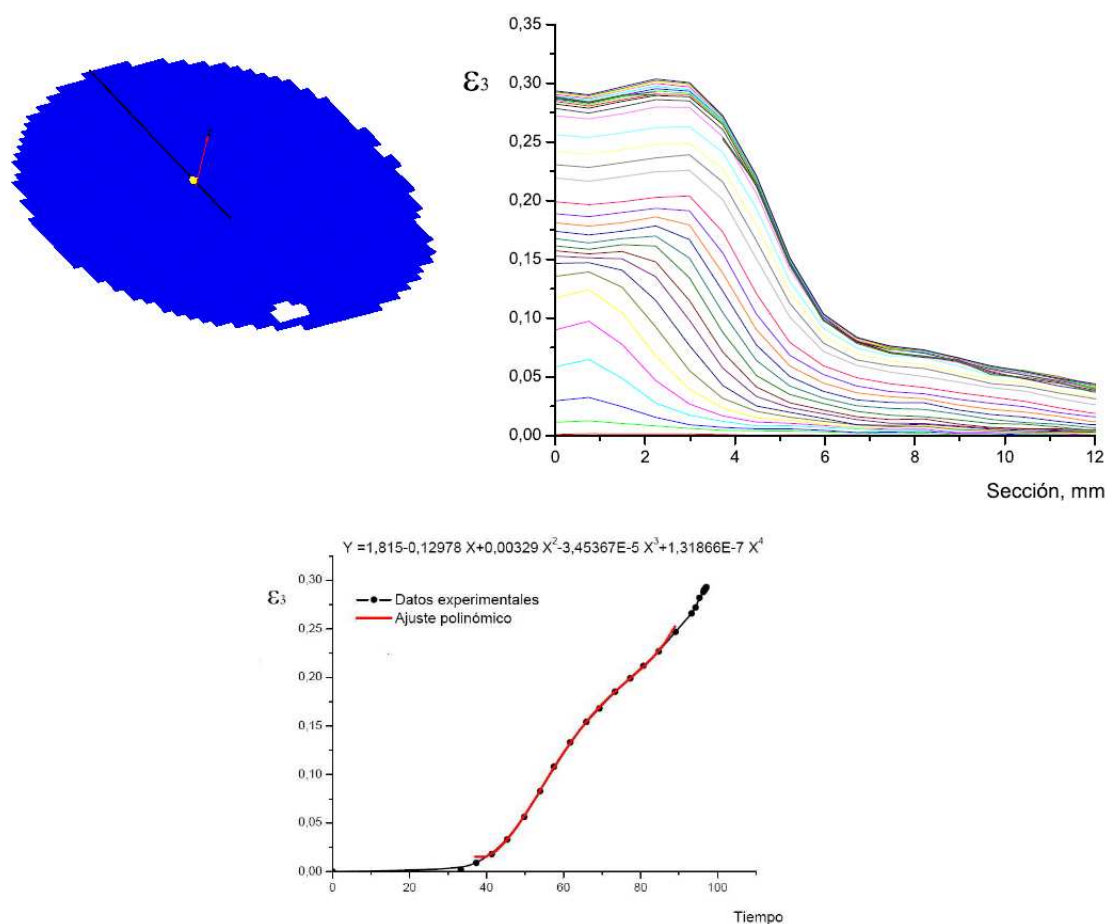


Figura 1.5: Definición de la sección y el punto de fallo de la probeta. Gráfica para el estudio del necking.

Como ocurría anteriormente los datos obtenidos de estos elementos a lo largo del proceso de estirado se importaron a *OriginPro 7.5*. Los FLD a estricción presentados en este estudio han sido obtenidos considerando la variable ϵ_{III} para variable de estudio. Las páginas siguientes tienen como objetivo ilustrar el método empleado por Jain et al.[9] y el

propuesto en este trabajo.

Método de Jain.

En la Fig. 1.6 se muestran los datos experimentales obtenidos con *ARAMIS* y el ajuste polinómico de dichos datos.

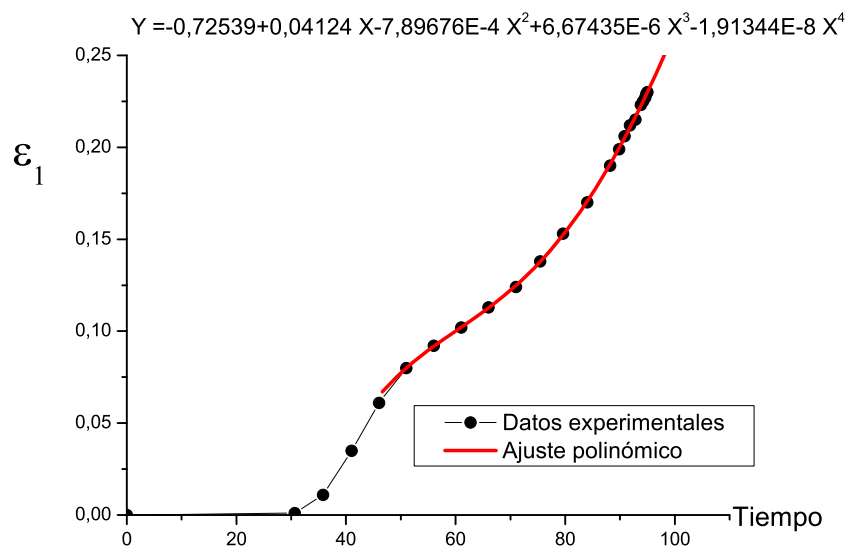


Figura 1.6: Representación del método de Jain et al.[9] para una probeta de 80x35 mm.

Una vez tenemos el ajuste polinómico proporcionado por *Origin* derivamos la expresión del mismo dos veces.

Para ambos métodos determinar el instante en el que se produce la inflexión en $\dot{\epsilon}_I$ o en $\dot{\epsilon}_{III}$ no es fácil de apreciar a simple vista. Es más razonable estudiar la segunda derivada, donde el punto de inflexión de la primera derivada se traduce en un máximo o un mínimo. En un principio se intentó realizar la derivada numérica de las variables pero para poder aplicarla con sentido el intervalo de tiempo entre datos debía de ser constantes, cosa de la que no disponíamos. *OriginPro* proporciona herramientas adecuadas para realizar el ajuste polinómico que necesitábamos para estudiar la inflexión en $\dot{\epsilon}_I$ y $\dot{\epsilon}_{III}$.

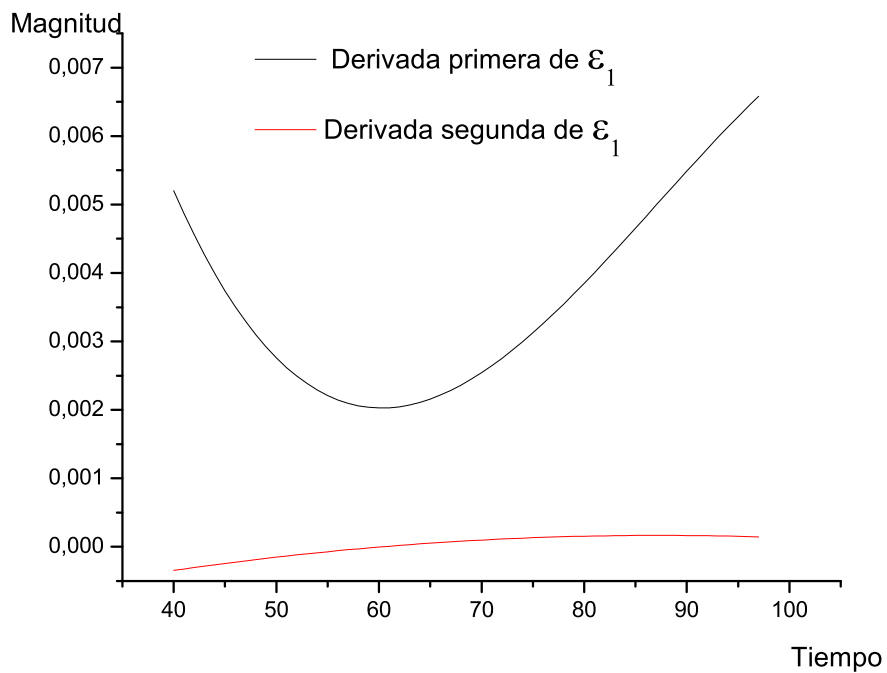


Figura 1.7: Primera y segunda derivada para la deformación principal epsilon I.

Método del ϵ_{III} .

En la Fig. 1.8 se muestran los datos experimentales obtenidos con *ARAMIS* y el ajuste polinómico de dichos datos.

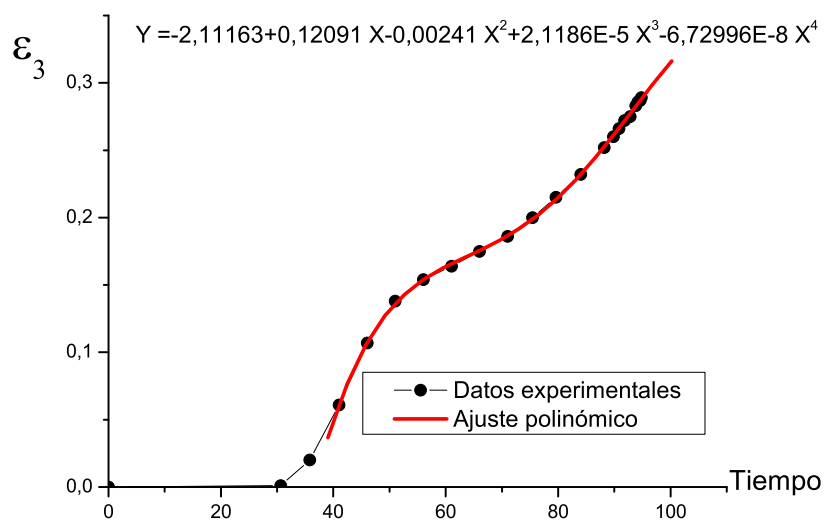


Figura 1.8: Representación del método de Jain et al.[9] para una probeta de 80x35 mm.

Una vez tenemos el ajuste polinómico proporcionado por *Origin* derivamos la expresión del mismo dos veces.

La Fig. 1.9 muestra la primera y segunda derivada de la ϵ_{III} .

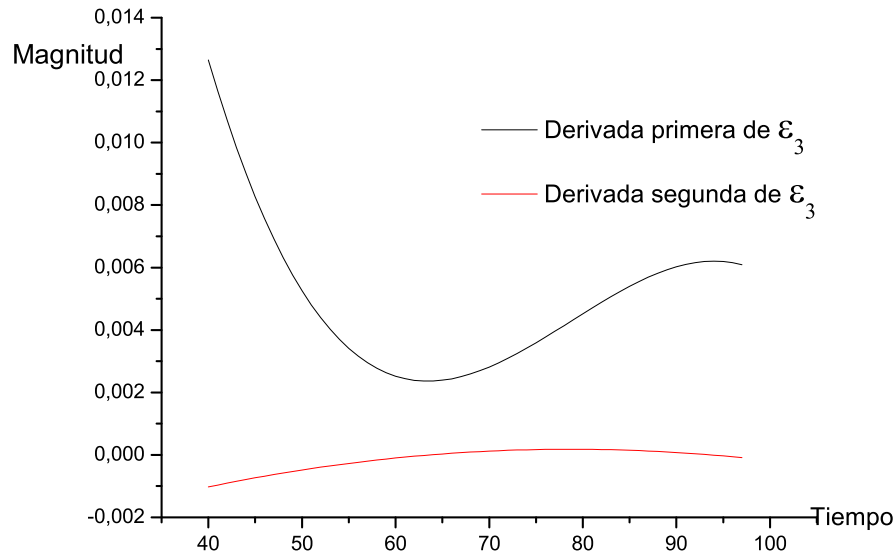


Figura 1.9: Primera y segunda derivada para la deformación principal epsilon I.

Ambos métodos van a dar lugar a resultados muy parecidos, como se muestran en la Fig. 1.1, prediciéndose un poco antes con ϵ_{III} .

		25	30	35	40	60	80
Epsilon III	Epsilon I	0,104	0,112	0,110	0,116	-----	-----
	Epsilon II	0,049	0,055	0,064	0,083	-----	-----
Epsilon I	Epsilon I	0,118	0,127	0,122	0,102	-----	-----
	Epsilon II	0,061	0,055	0,061	0,066	-----	-----

Cuadro 1.1: Comparación de la predicción del *necking* por epsilon I y epsilon III.

Para las probetas de mayor ancho, 60 y 80 mm, ambos métodos no predicen el comienzo de la estricción de forma clara. Ello puede ser debido a que en estas probetas el adelgazamiento sea más gradual, Fig. 1.12, no dándose el punto de inflexión en la velocidad de las variables.

A continuación expondremos los motivos que nos llevaron a considerar la utilización de ϵ_{III} para la predicción del fallo en lugar de ϵ_I .

- Despreciar el efecto de ϵ_{II} en el fallo no nos parecía que tuviese un *sentido físico* claro ya que, si bien en las probetas de menor ancho ésta variable es claramente menor que ϵ_I no lo es así para las de ancho mayor, donde son de igual magnitud.

Consideramos pues que si queríamos desarrollar un modelo general para el fallo no deberíamos despreciar el efecto de ϵ_{II} en el fallo.

Lo explicado arriba puede comprobarse en la Fig. 1.10 y 1.11. Cualitativamente las gráficas de ϵ_I y ϵ_{III} se parecen más a medida que el ancho de las probetas disminuye.

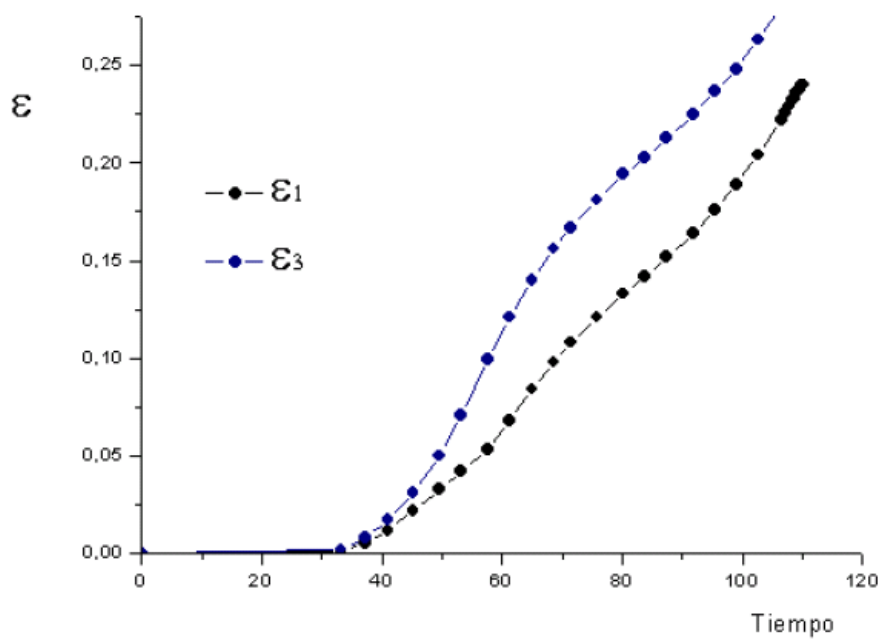


Figura 1.10: Comparación de ϵ_I y ϵ_{III} para una probeta de 80x25 mm.

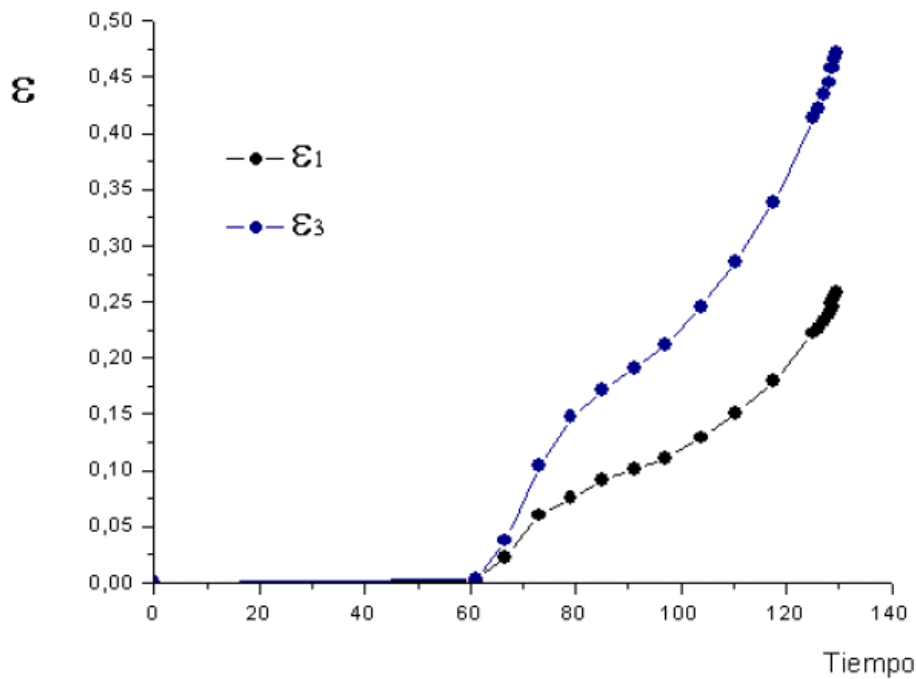


Figura 1.11: Comparación de ϵ_I y ϵ_{III} para una probeta de 80x60 mm.

En el anexo correspondiente pueden verse más resultados de lo expuesto aquí.

- Algunos estudios sostienen que cuando se produce el comienzo del *necking* la deformación se concentra en la ϵ_I , manteniéndose la ϵ_{II} aproximadamente constante. Sin embargo, en el presente estudio dicha tendencia no se apreció para todos los anchos de probeta, si es verdad que para las probetas de menor ancho este fenómeno puede ser usado para predecir el comienzo del *necking*.

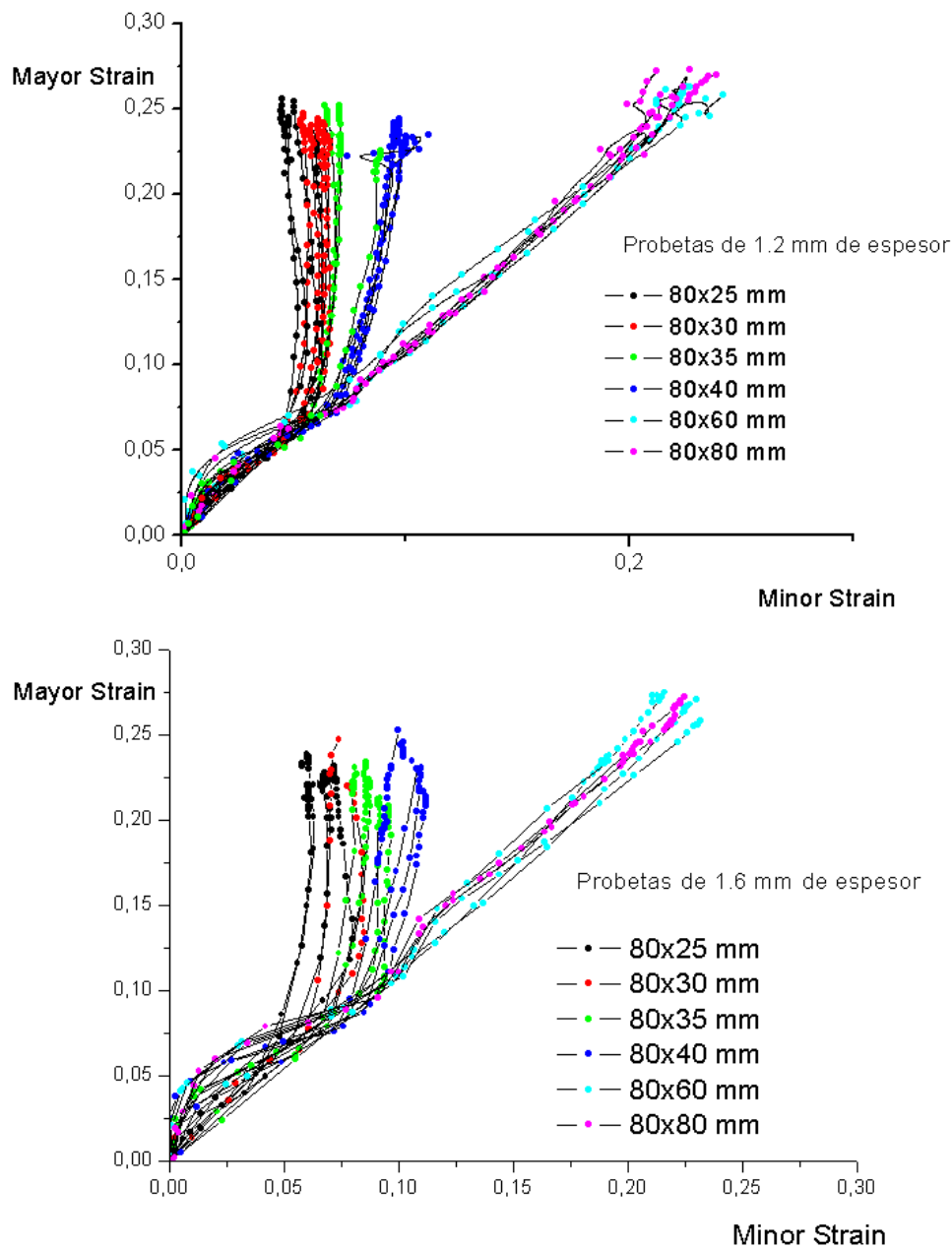


Figura 1.12: Evolución de las deformaciones principales I y II para las probetas de espesor 1,2mm

Para concluir decir que los resultados obtenidos por ambos métodos dan lugar a resultados muy parecidos. No obstante, ϵ_{III} tiene un claro sentido físico, dado que representa el adelgazamiento del material, siendo ésta la principal ventaja respecto al uso de ϵ_I .

Diagramas Límites de Conformado a Fractura

Las siguientes Figs. muestran los diagramas límites de conformados a *fractura* y

estricción para la aleación de aluminio 2024 – T3 y espesores 1,2 y 1,6mm.

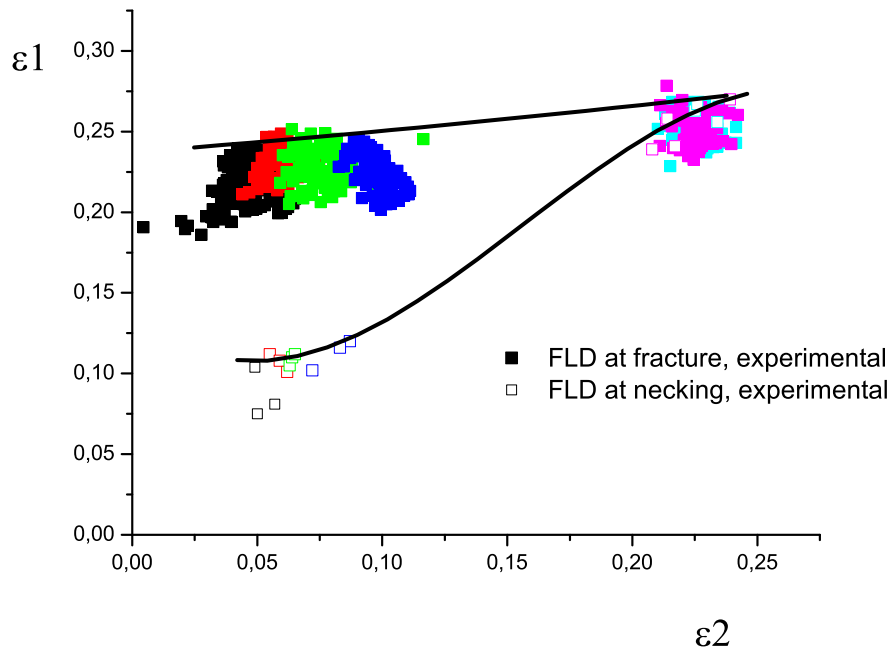


Figura 1.13: FLD experimental de la aleación 2024 – T3 y espesor de 1,2mm.

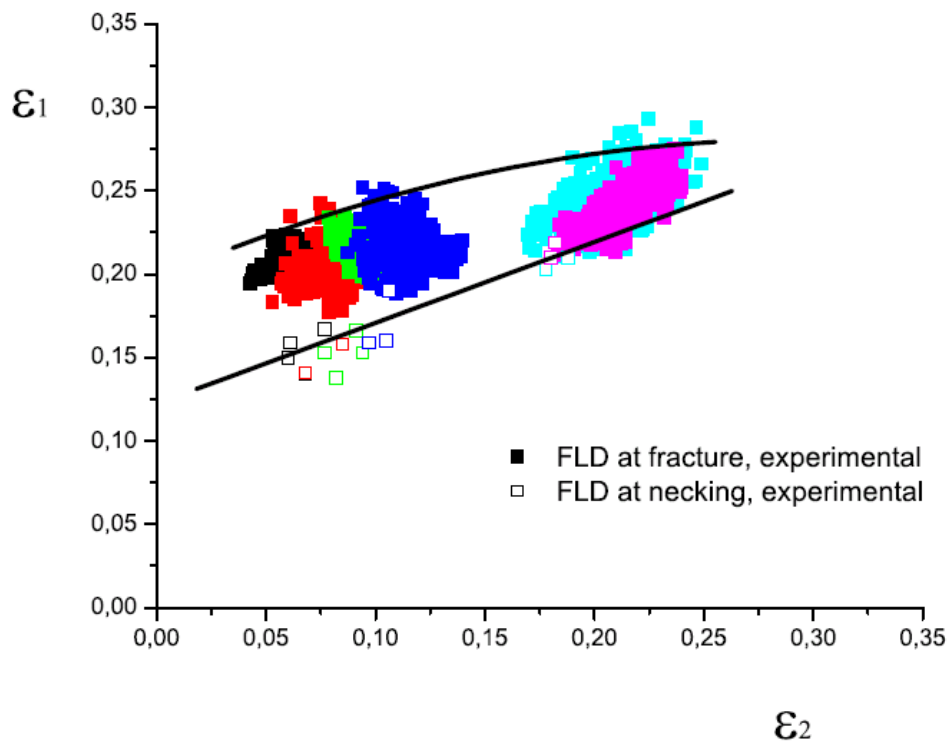


Figura 1.14: FLD experimental de la aleación 2024-T3 y de espesor 1.6 mm.

Estudios recientes llevados a cabo por Jain et al. [9] obtuvieron que los FLDF, para AA6111, presentaban una forma similar a la que nosotros hemos obtenidos aquí para AA2024-T3. Esta *forma compleja* de aproximarse al FLDN es usual en materiales que presentan una baja ductilidad, como es el caso de las aleaciones de aluminio.

El estudio de la historia de la deformación en el espesor a lo largo de la sección definida arriba puso de manifiesto una serie de resultados que no son obvios a simple vista. Por ejemplo se observó que la fractura no siempre se produce por la zona con mayor estricción, como se ilustra en la Fig. 1.15. A la izquierda de la imagen puede apreciarse con más detalle la zona de fallo, marcada por dos puntos negros.

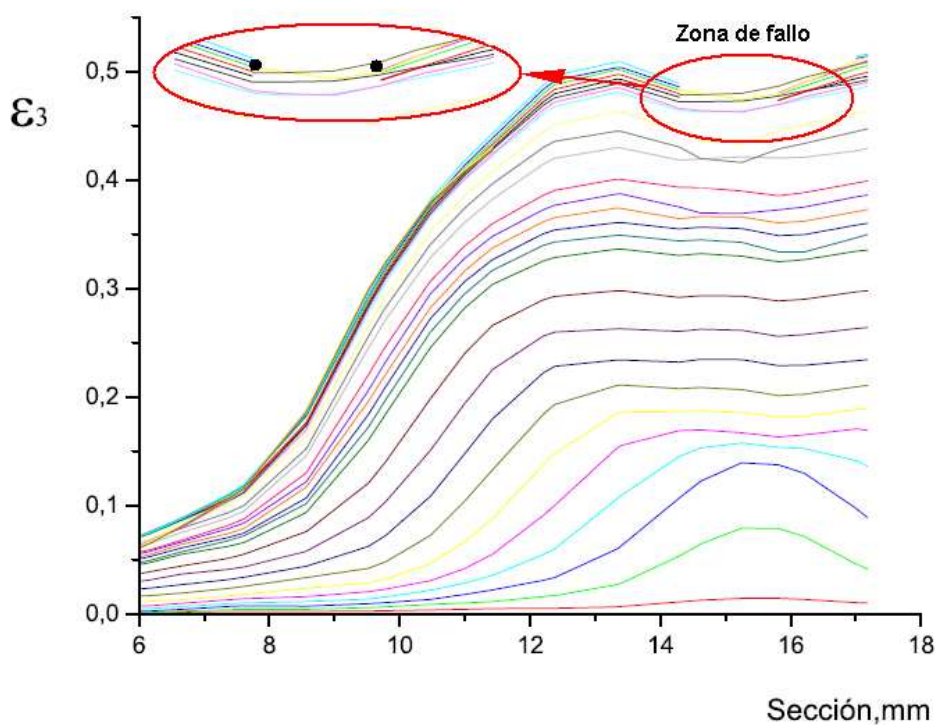


Figura 1.15: Evolución de la estricción con el tiempo en una sección de una probeta de 80x80mm y 1,2 mm de espesor.

En la Fig. 1.15 puede apreciarse como el fallo se origina en una zona que no es la de máxima estricción, aunque sí próxima a ésta.

El estudio de la sección puso también de manifiesto, como se verá a continuación, las buenas condiciones de lubricación que se alcanzaron en los ensayos. En la Fig. 1.16 se aprecia como, ahora sí, el fallo se origina en la zona con mayor estricción y cómo ésta se mantiene razonablemente constante a lo largo de la zona central de pieza hasta momentos antes de producirse el fallo. La zona de fallo se muestra con más detalle a la izquierda de la imagen, el punto de fallo se ha marcado de negro para más claridad.

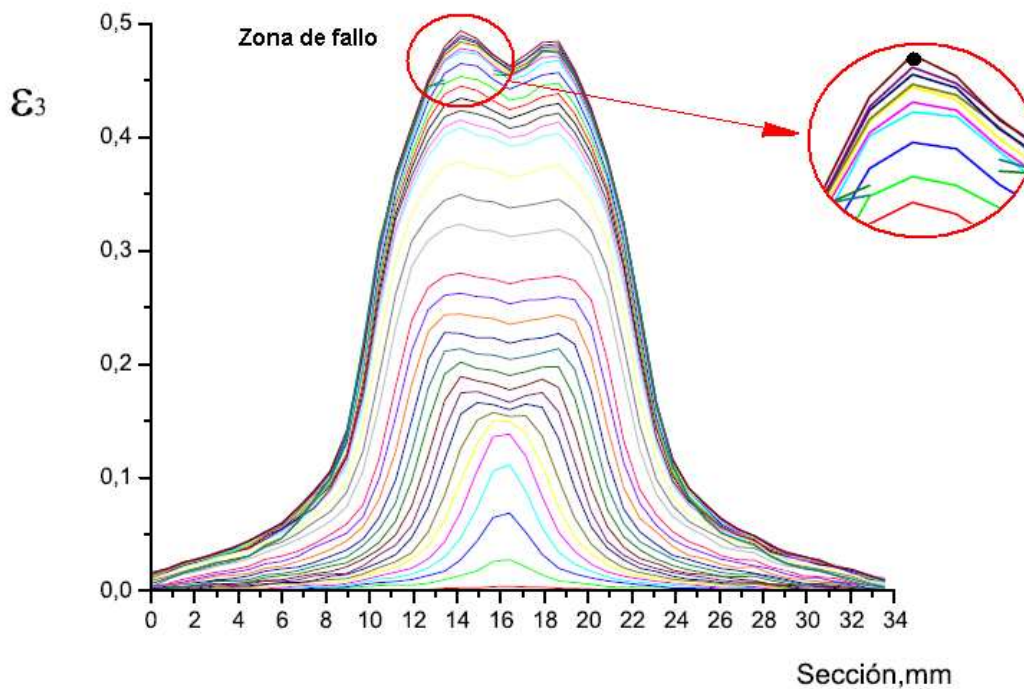


Figura 1.16: Evolución de la estricción con el tiempo a lo largo de una sección que recorre toda una probeta de $80 \times 60 \text{ mm}$ y $1,2 \text{ mm}$ de espesor.

1.2. Obtención de los FLDS empleando *ABAQUS*

A la hora de trabajar con *ARAMIS* sólo disponíamos de la información de la superficie superior de la probeta. Esto es, no se asegura que el fallo se haya originado en la superficie superior o, si como veremos aquí, habría que considerar estudiar también lo que pasa en la superficie inferior. Con *ABAQUS* hemos trabajado con ambas superficies. Con los resultados obtenidos esperamos aclarar si el fallo es más propicio en la cara de arriba o, por el contrario, en la cara de abajo.

Diagrama Límite de Conformado a Fractura, FLDF.

Para determinar el FLDF empleando *ABAQUS* el criterio de fractura dúctil elegido ha sido el de *Tresca*. Las razones de ello se es que este criterio, según estudios mostrados en [4], predice con razonable exactitud el fallo de las probetas. El cálculo de la constante se ha explicado en al apartado de análisis numérico.

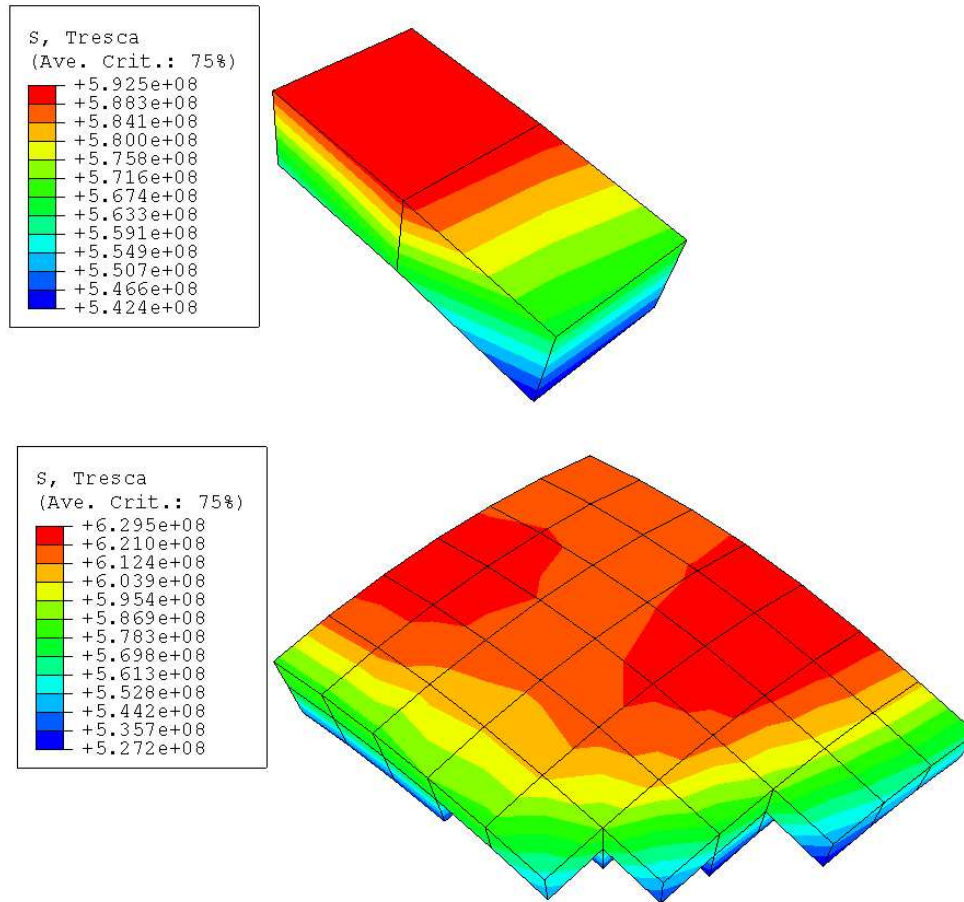


Figura 1.17: Determinación de los puntos de fallo usando el criterio de *Tresca* en *ABAQUS*

Las Figs. 1.17 muestra esquemáticamente el procedimiento elegido para determinar los puntos de fallo del material, para la superficie superior. Para aplicar el criterio de *Tresca* se supuso un intervalo alrededor del valor de la constante de dicho criterio del 5% de dicho valor, dentro del cual se supuso que los puntos no fallaban (la obtención de dicho valor puede verse en el anexo correspondiente). Una vez determinado el intervalo de incertidumbre hicimos avanzar la simulación hasta que el valor de *Tresca* proporcionado por *ABAQUS* era inmediatamente superior al límite superior considerado. Una vez conocido los puntos, exportamos los resultados a un programa como *OriginPro* para manejarlos más convenientemente.

Con este método hemos construido los diagramas límite de conformado a fractura mostrados en las Figs. 1.18 y 1.19.

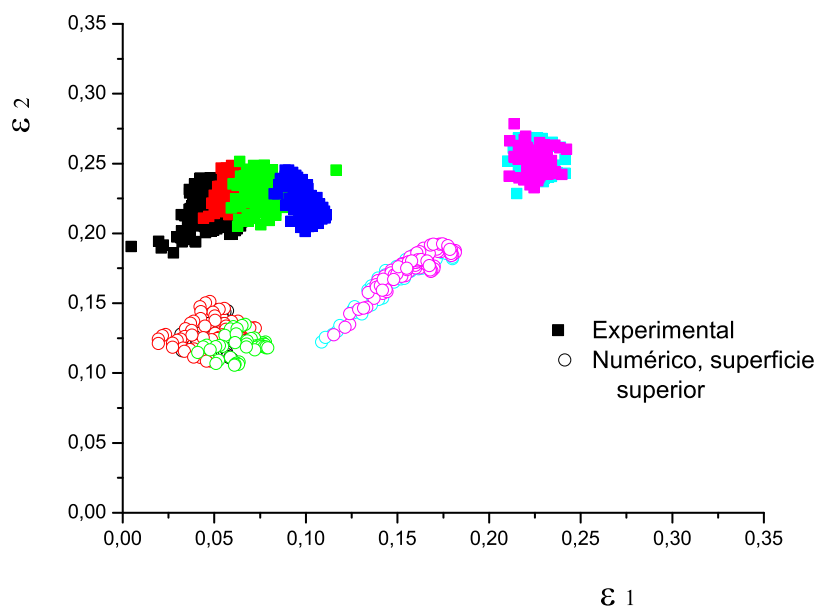


Figura 1.18: FLDF: Experimental y numérico para la superficie superior de las probetas de 1,2mm de espesor.

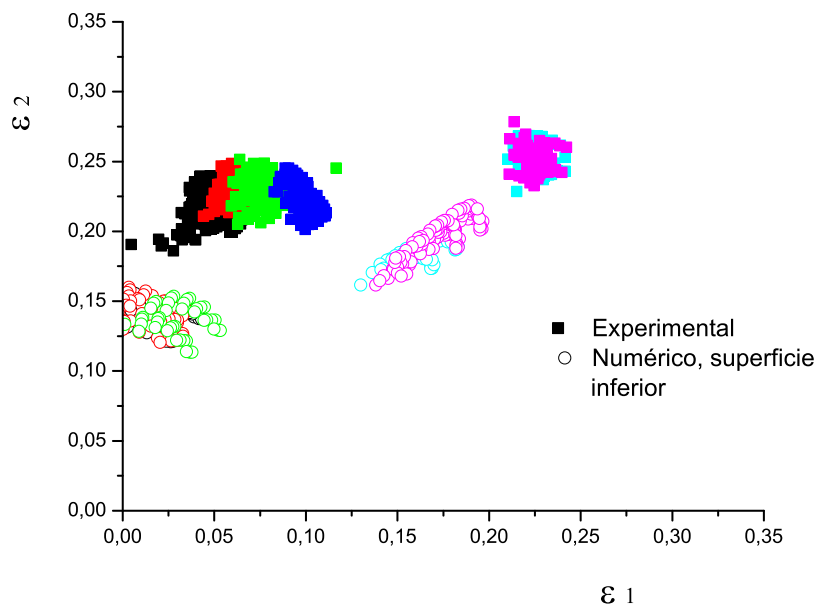


Figura 1.19: FLDF: Experimental y numérico para la superficie inferior de las probetas de 1,2mm de espesor.

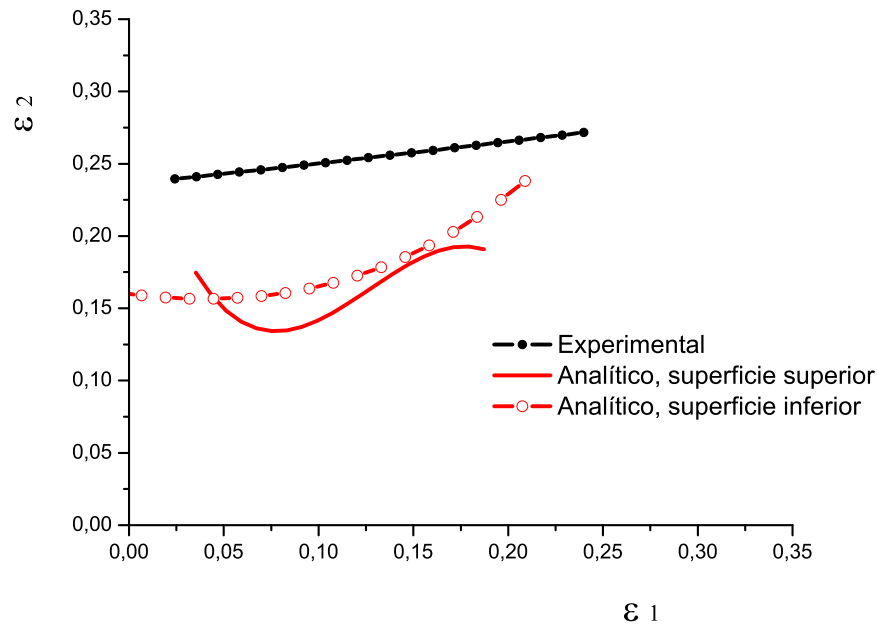


Figura 1.20: Envolvente de los FLD a *fractura* obtenidos experimental y numéricamente, para probetas de espesor 1,2mm.

La Fig. 1.20 muestra la envolvente de los FLDF obtenidos numérica y experimentalmente para probetas de 1.2 mm de espesor. Puede apreciarse como considerar el fallo en la superficie inferior predice, con ligera mejora, el fallo del material.

Siguiendo los mismo pasos que los comentados anteriormente para las probetas de 1.2 mm se obtuvieron los FLD para las probetas de 1.6 mm, las Figs. 1.21 y 1.22 muestran este hecho.

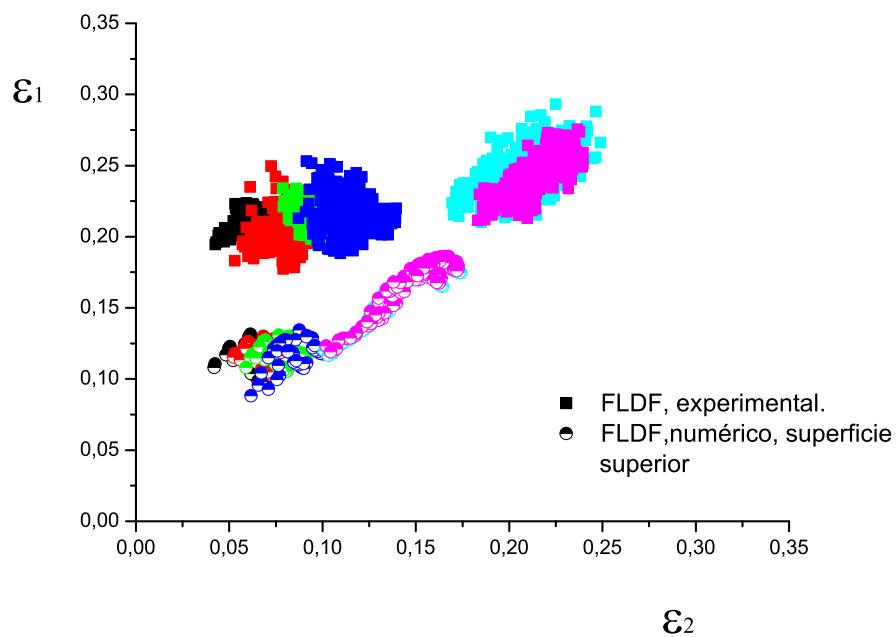


Figura 1.21: FLDF: Experimental y numérico para la superficie superior de las probetas de 1,6mm de espesor.

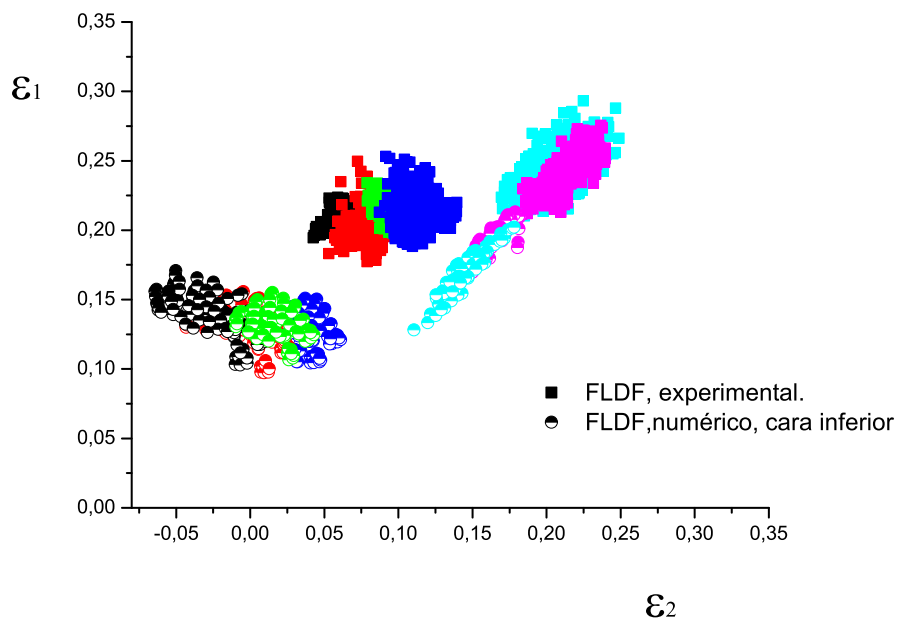


Figura 1.22: FLDF: Experimental y numérico para la superficie inferior de las probetas de 1,6mm de espesor.

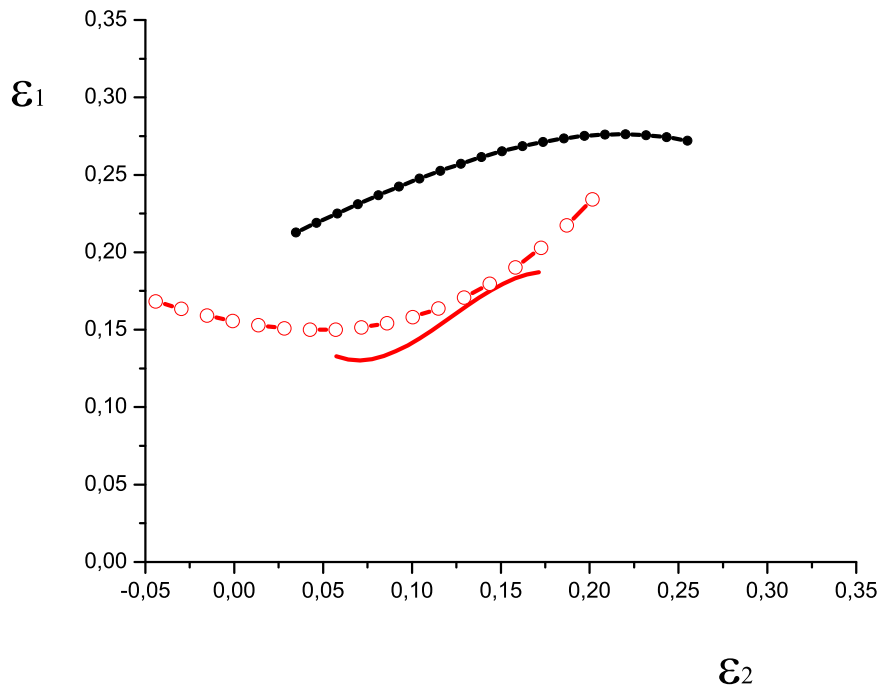


Figura 1.23: Envolvente de los FLD a *fractura* obtenidos experimental y numéricamente, para probetas de espesor 1,6mm

Las Figs. 1.23 muestran las envolvente de los FLDF obtenidos numérica y experimentalmente para probetas de espesor 1.6 mm. Como sucedía con las probetas de 1.2 mm, el fallo se predice con más precisión considerando que el fallo se origina en la superficie inferior. Esto hace que, como puede verse en la Fig. 1.20, la envolvente del *FLD* para la superficie inferior se sitúe por encima de la de la superficie superior, pero sin llegar a alcanzar la envolvente del *FLD* obtenido experimentalmente.

En las Figs. 1.20 y 1.23 podemos apreciar mucha diferencia entre los FDLF experimentales y numéricos. No es sorprendente encontrar el FLDF de la superficie superior por debajo del FLDF experimental, ya que los métodos basados en predecir el fallo en esta superficie suelen predecir el fallo con antelación. Lo sorprendente es encontrarse el FLDF de la superficie inferior tan por debajo del experimental. Una explicación plausible puede deberse al efecto del rozamiento en las probetas. Las probetas se encuentran sometidas a fuerzas esfuerzos de fricción que hacen descender el FDLF.

Diagrama Límite de Conformado en Extricción, FLDN.

El punto de fallo se ha obtenido viendo la evolución de la deformación principal tres, ϵ_{III} , en un *path* que recorre el borde de la chapa, como se representa en la Fig. 1.24. Determinándose éste como aquel punto del *path* donde la ϵ_{III} alcanza un valor mínimo, es decir, se ha alcanzado la máxima extricción.

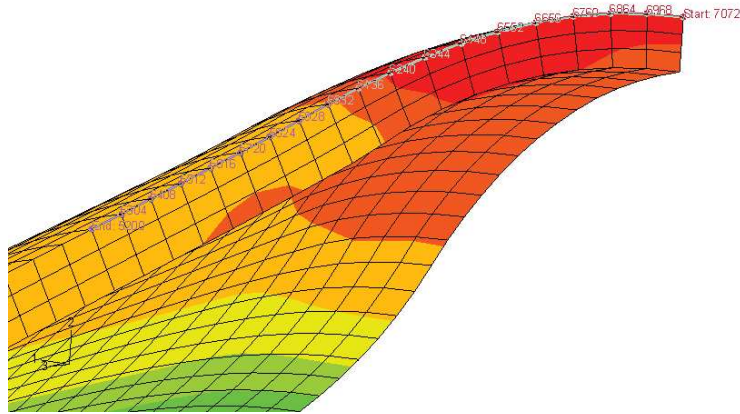


Figura 1.24: Path superior a lo largo del borde interior de la probeta.

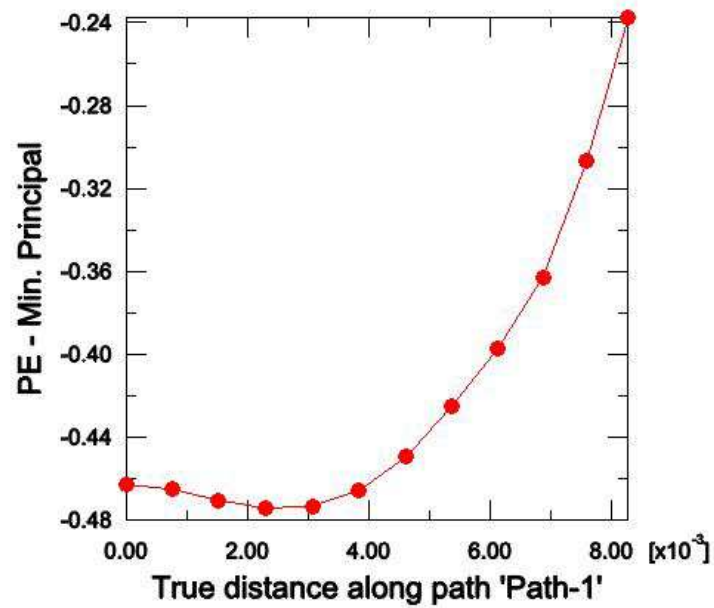


Figura 1.25: Variación de ϵ_{III} a lo largo del path.

La elección de un *path* hace referencia a los resultados experimentales. La Fig. 1.26 muestra este hecho. La imagen de la izquierda muestra una probeta de 80x30 y 1.2 mm con una grieta típica. En la imagen de la derecha se muestra su modelo ensayado.

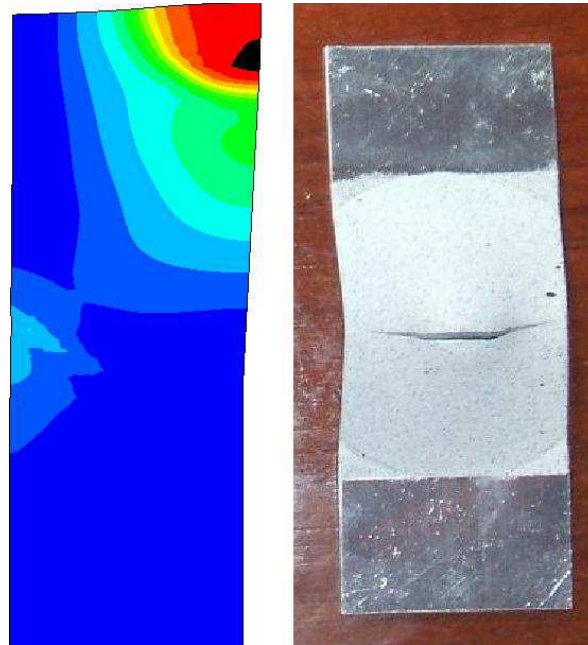


Figura 1.26: Representación de una probeta de 80x30mm con grieta, y su modelo ensayado en *ABAQUS*.

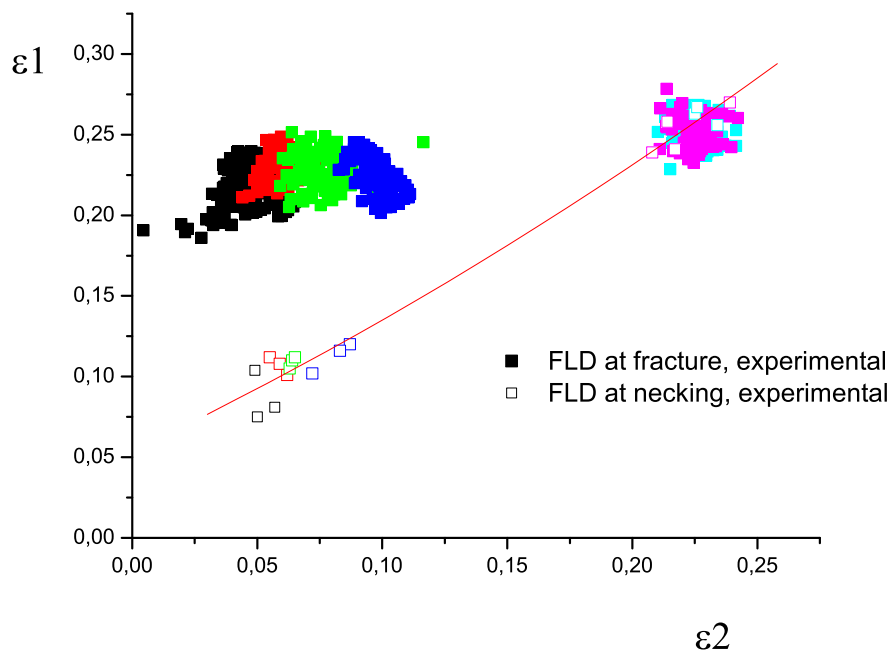


Figura 1.27: Representación de los diagramas límite de conformado en *fractura y estricción* para las probetas de 1,2mm de espesor obtenidos experimentalmente.

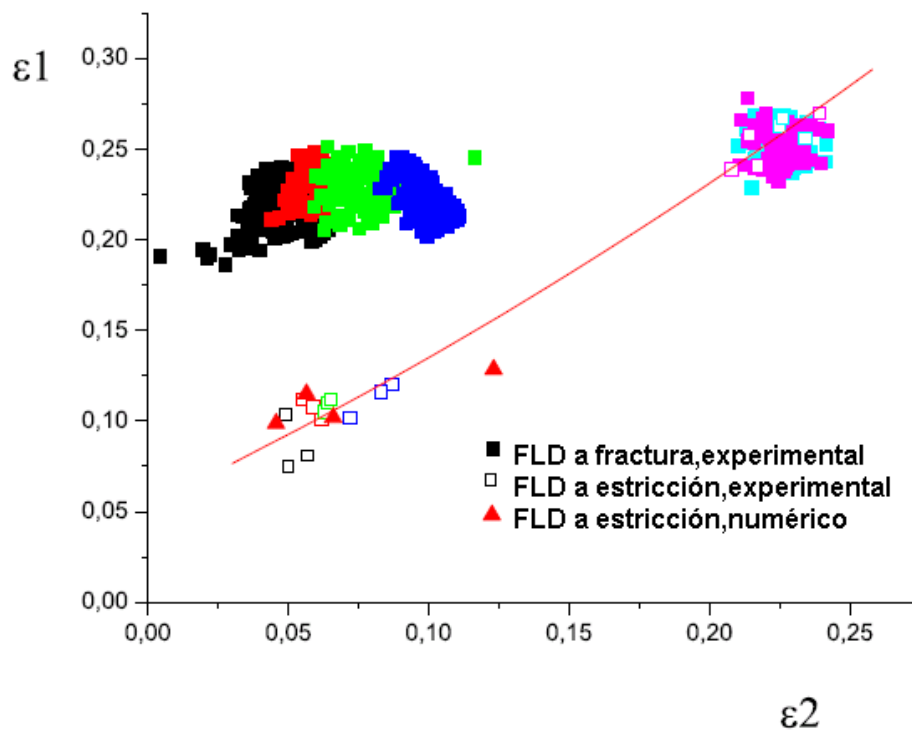


Figura 1.28: Representación del ajuste numérico para el FLDN para probetas de 1.2 mm.

La Fig. 1.27 completa a la anterior, puede apreciarse el buen acuerdo de los resultados experimentales con los numéricos para anchos de probeta inferiores a los 60 mm

Comparando las imágenes mostradas en la Fig. 1.28, podemos apreciar la buena concordancia de los resultados numéricos obtenidos con *ABAQUS* con los resultados experimentales para valores de ancho inferiores a 60 mm.

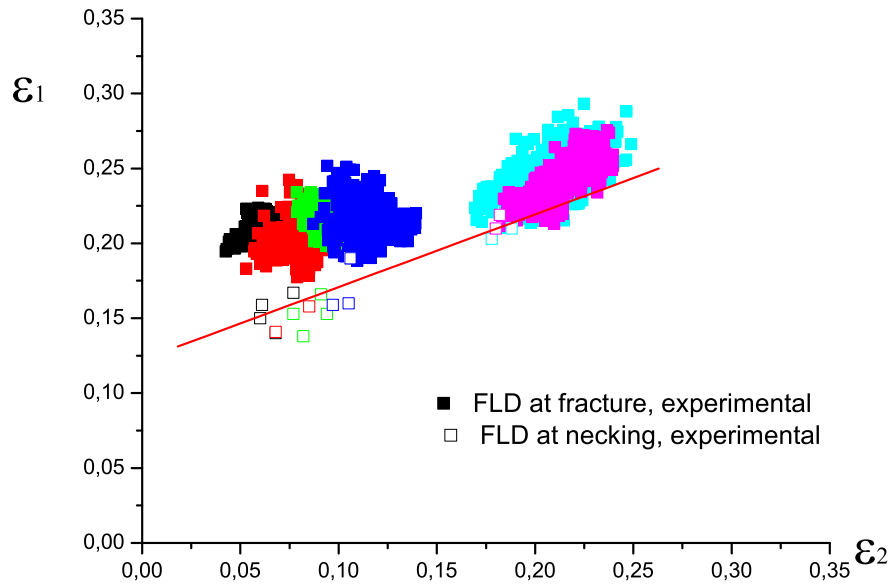


Figura 1.29: Representación de los diagramas límite de conformado en *fractura y estricción* para las probetas de 1.6 mm de espesor obtenidos experimentalmente.

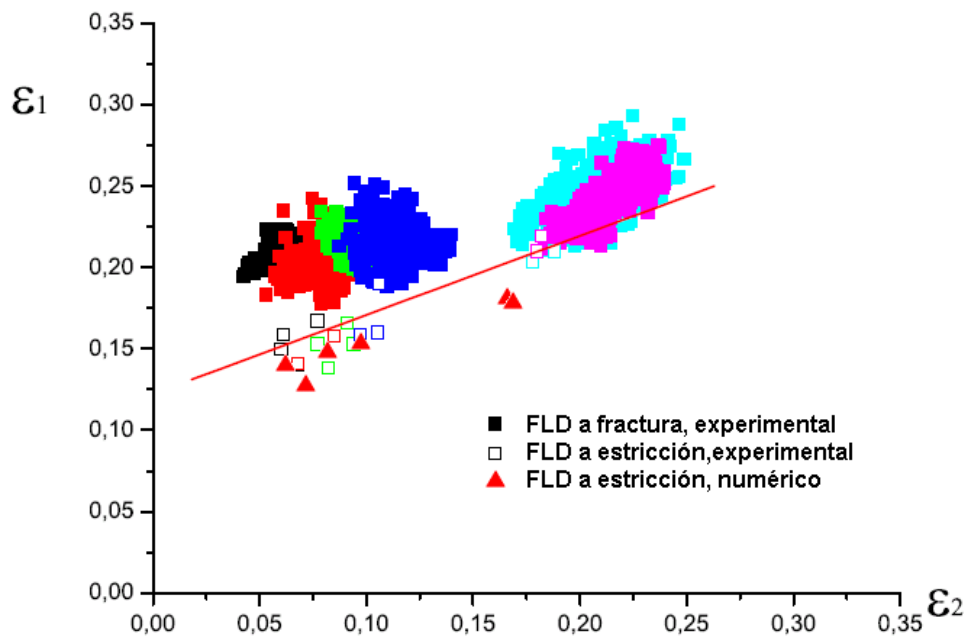


Figura 1.30: Representación de los diagramas límite de conformado en *fractura y estricción* para las probetas de 1.6 mm de espesor.

En la Fig. 1.30 podemos apreciar lo comentado anteriormente, para probetas de espesor 1.2 mm.

Comparativa de los Diagrama Límites de Conformado para los distintos espesores.

En las Figs. 1.32 y 1.31 se muestran los diagramas límites de conformado a fractura y estricción para las probetas de 1.2 y 1.6 mm.

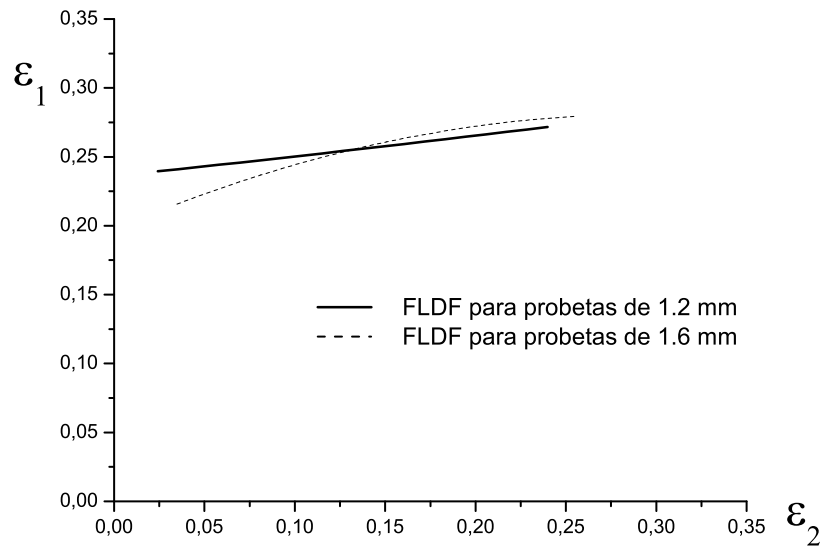


Figura 1.31: Comparativa de los FLDF para los espesores de 1.2 y 1.6 mm.

Puede apreciarse como el FLDN para las probetas de 1.6 se sitúa por encima de la de 1.2 mm para la mayor parte del rango. Los FLDF son aproximadamente los mismos para ambos espesores.

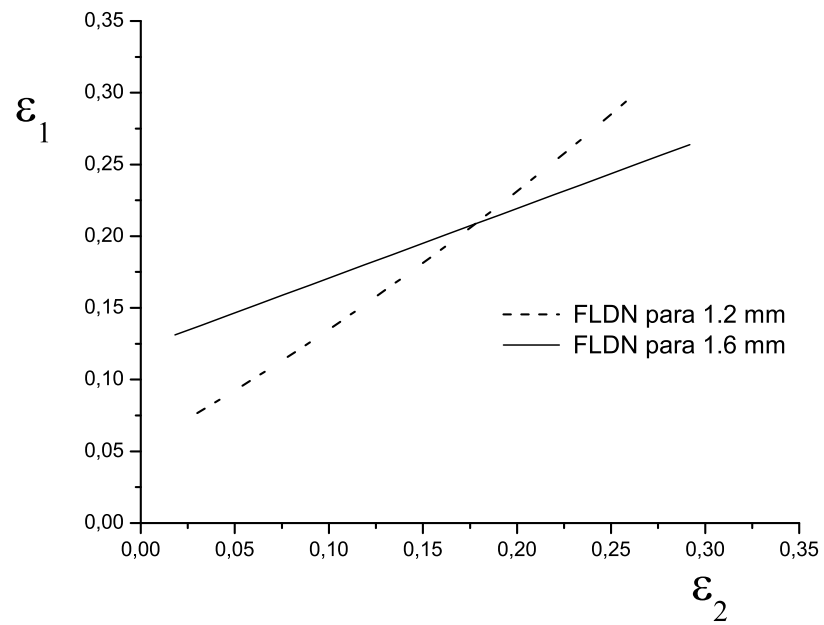


Figura 1.32: Comparativa de los FLDN para los espesores de 1.2 y 1.6 mm.