

# CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE ACERO DE DOBLE FASE PARA LA OBTENCIÓN DE SU DIAGRAMA DE LÍMITE DE FORMADO

**César G. Hernández Bautista**

Instituto Tecnológico de Celaya  
*M1503034@itcelaya.edu.mx*

**Ismael Ruiz López**

Pintura, Estampado y Montaje SAPI de CV  
*ismael.ruiz@autometal.mx*

**Martín Caudillo Ramírez**

Instituto Tecnológico de Celaya  
*martin.caudillo@itcelaya.edu.mx*

## Resumen

La constante actualización en el cambio del uso de aceros convencionales a aceros avanzados en la industria automotriz genera interés sobre la capacidad de la materia prima en el proceso de estampado. Esto conlleva a realizar estudios de caracterización mecánica donde se realizan distintos tipos de ensayos a las que se someten probetas provocando estados de deformación uniaxiales y biaxiales para predecir la capacidad de conformado de los aceros. El Diagrama de Límite de Formado mejor conocida como FLD por sus siglas en inglés (Diagram Limit Forming) es una representación gráfica de los límites de las deformaciones unitarias principales que predice sí el formado es realizado de manera segura y con calidad, es decir, sin fracturas o formación de arrugas.

En el presente trabajo se muestra el desarrollo numérico-experimental del FLD de un acero de doble fase 590 rolado en caliente (DP 590HR) por medio de pruebas experimentales y simulación con Software ANSYS/ Ls-Dyna Copyright.

**Palabras Claves:** Deformaciones, FLD, DP 590HR, Simulación.

## Abstract

The constant update in the usage change of conventional to advanced steels in the automotive industry generates interest about the raw material capacity in the draw process. This leads to made mechanical characterization studies where different types of tests are performed to their respective sample causing uniaxial and biaxial deformation states to predict the steel forming capacity. The Forming Limit Diagram (FLD) is a graphical representation of the main unitary deformations limits that determines if the forming is made in a safety way and with quality, namely, without cracks or wrinkles.

In this paper is showed the numeric-experimental development of the FLD of a dual phase 590 hot rolled steel (DP 590HR) by means of experimental tests and Ansys/Ls-Dyna Copyright software simulation.

**Keyboards:** Strain, FLD, DP 590HR, Simulation.

## 1. Introducción

El formado de lámina es un proceso en el cual se convierte una chapa plana en una pieza de forma deseada, sin que fracture y sin adelgazamiento excesivo. El proceso de formado puede ser un simple doblado, un embutido, estirado o una combinación de varios de éstos procesos [1].

Las propiedades mecánicas de las láminas metálicas dependen considerablemente del metal base (acero, aluminio, cobre, etc.), de los elementos de aleación, del proceso sufrido, tratamiento térmico y espesor de lámina. Para una confortabilidad óptima, en un rango amplio de aplicaciones, el material a trabajar debería ser capaz de distribuir las deformaciones de manera uniforme y alcanzar los altos niveles de deformación sin presentar estricción o ruptura [2].

Tres propiedades de los materiales determinan la distribución de las deformaciones en una operación de formado:

- Coeficiente de endurecimiento por deformación, valor conocido como “ $n$ ”.
- Sensibilidad a la velocidad de deformación o parámetro “ $m$ ”.
- Relación de deformación plástica o valor de anisotropía “ $r$ ”.

Todos los aceros pueden ser deformados y adelgazados hasta cierto porcentaje antes de presentar estricción o fractura, este nivel depende de la relación de las deformaciones mayores y menores las cuales se analizan mediante los diagramas de límites de formado [3].

S. Keeler [4] fue el primero en cuantificar dicho concepto, construyendo un diagrama de conformado para una gran variedad de materiales reconocidos, sometidos a deformaciones biaxiales con punzón semiesférico. Los valores de falla considerados fueron las combinaciones de deformaciones mayores y menores respectivamente  $e_1$  y  $e_2$  que conducían a un adelgazamiento excesivo.

M. Goodwin [5] completó la idea investigando a detalle la zona de tensión-compresión aunque su criterio de falla fue la aparición de la fractura. Combinando estas investigaciones obtenemos el Diagrama de Límite de Formado.

## **2. Materiales y Metodología**

El proceso de obtención del diagrama de límite de formado está dividido básicamente en dos etapas:

1. Esta etapa incluye pruebas experimentales de embutido y validación de simulación por el método de elemento finito (MEF) bajo condiciones reales de operación utilizando como software Ansys/ Ls Dyna Copyright.
2. Una vez validado el modelo de simulación, se procede a realizar una segunda iteración en condiciones ideales con el fin que el material no alcance su máximo adelgazamiento sin llegar a la ruptura.

A continuación en la figura 1 se muestra el procedimiento realizado para la obtención del FLD.

## **Probetas Rectangulares y Nakazima**

En el proceso de estampado existen dos comportamientos en el efecto que produce las deformaciones biaxiales en los elementos de un material, estos son tensión-tensión que se obtienen mediante probetas rectangulares y cuadradas que se observan en la figura 2.

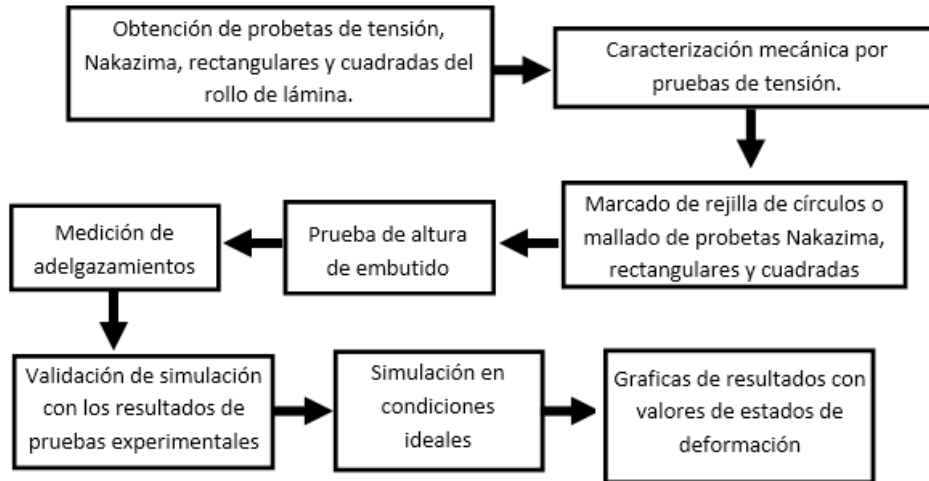


Figura 1 Secuencia de la elaboración del FLD.

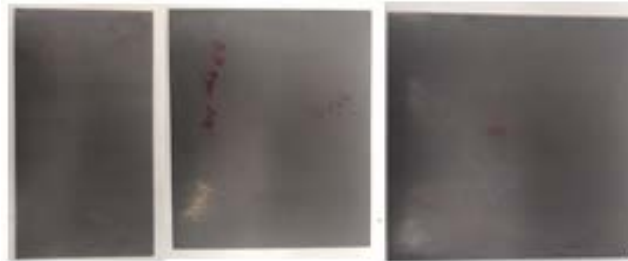


Figura 2 Probetas de 23x12 mm, 23x18 mm y 23x23 mm de 1.4 mm de espesor.

El otro tipo de deformación es tensión-compresión que se obtienen por medio de las probetas Nakazima con distintos anchos como se observa en la figura 3.



Figura 3 Probetas Nakazima de 25, 50 y 75 mm de 1.4 mm de espesor.

### Mallado de Probetas

La deformación de la chapa metálica se mide mediante una malla o rejilla de círculos con 0.5 mm de diámetro y 1.5 mm de separación entre centros adherida a las probetas con la que se obtienen las deformaciones mayores y menores sufridas

por el espécimen cuando fuerzas externas alteran su forma original, deformando biaxialmente el patrón de círculos creando elipses con distintos ejes mayores y menores según la geometría de las probetas analizadas. Las deformaciones biaxiales se consideran tensión-tensión cuando el círculo inicial se expande, esto quiere decir que el radio inicial es menor a los ejes mayores y menores de las elipses formadas al final del proceso de formado o embutido. Mientras que las deformaciones menores son cuando el radio del círculo es mayor al menos que uno de los ejes de las elipses como se observa en la figura 4.

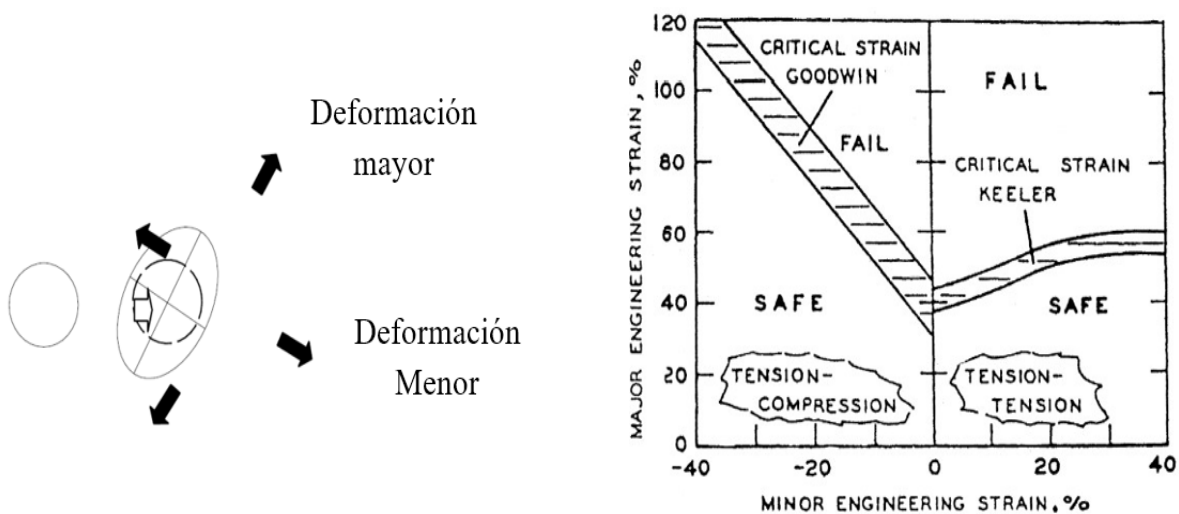


Figura 4 Los Estados de deformaciones definen el FLD.

## Pruebas de Embutido

Teniendo malladas las probetas se realizan las pruebas de embutido con la ayuda de una máquina universal mostrada en la figura 5, que otorga una fuerza de pisado por medio de actuadores cilíndricos de 400 toneladas, a las probetas a una velocidad de 1.33 mm/s. La fuerza de pisado es suficiente para sujetar y dejar inmóvil al espécimen de estudio mientras el punzón cilíndrico conforma la lámina. Las probetas mostradas en las figuras 2 y 3 fueron embutidas bajo condiciones normales de operación. Las figuras 6 y 7 muestran las probetas embutidas hasta llegar a la fractura del material.

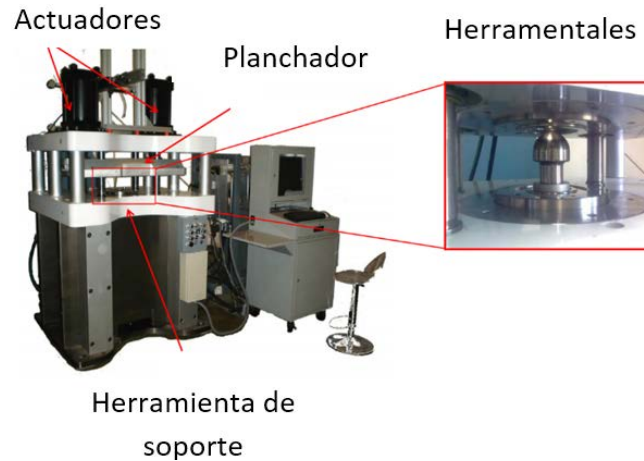


Figura 5 Máquina Universal de pruebas embutido (PEMSA).



Figura 3 Probetas Nakazimas ensayadas.



Figura 4 Probetas rectangulares y cuadradas ensayadas.

## Medición de Reducción de Espesor en Zonas Críticas

Considerando que el incremento de las deformaciones mayores y menores generan adelgazamientos excesivos que conllevan a la fractura, se generaron mediciones de adelgazamientos, tomando los valores más cercanos a la zona fracturada, para ello se utilizó un equipo óptico de medición. La medición de adelgazamientos siguen la ecuación 1, mientras la medición de los estados de deformación la ecuación 2 y 3 [6].

$$\%Elongación = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Deformaciones Mayores} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 = e_1(100\%) \quad (2)$$

$$\text{Deformaciones Menores} = \frac{W_f - W_0}{W_0} \times 100 = e_2(100\%) \quad (3)$$

Para comparar estos valores de reducción de espesor se compara con mediciones cercanas a la zona de fractura con micrómetro. En las tablas 1 y 2 se muestra una comparación de las mediciones realizadas.

Tabla 1 Comparación de mediciones de reducción de espesor en probetas Nakazima.

Probeta Nakazima	Espesor inicial	Micrómetro	Equipo Óptico	Error %
25 mm	1.4 mm	0.243 mm	0.238 mm	2.057
50 mm	1.4 mm	0.305 mm	0.301 mm	1.311
75 mm	1.4 mm	0.347 mm	0.341 mm	1.729

Tabla 2 Comparación de mediciones de reducción de espesor en probetas Rectangulares.

Probeta Rectangulares	Espesor Inicial	Micrómetro	Equipo Óptico	Error %
23x23 mm	1.4 mm	0.538 mm	0.529 mm	1.672
23x18 mm	1.4 mm	0.459 mm	0.451 mm	1.742
23x12 mm	1.4 mm	0.308 mm	0.303 mm	1.623

## Consideraciones para la Validación de Simulación con Software ANSYS/Ls Dyna Copyright

Para validar la simulación y generar un análisis lo más cercano a las pruebas experimentales, se modeló las condiciones normales de proceso en el software de simulación ANSYS/Ls Dyna copyright. Estas inician con un estudio de largas deformaciones y un análisis dinámico, considerando el espécimen de estudio como elemento Thin Shell 163 (figura 8), con las siguientes características [7]:

- Elementos formados por 4 nodos con 12 grados de libertad cada uno.
- Admite esfuerzos de flexión y presenta comportamiento de membrana; permite aplicar cargas sobre el plano y normales al mismo tiempo.

- Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales).

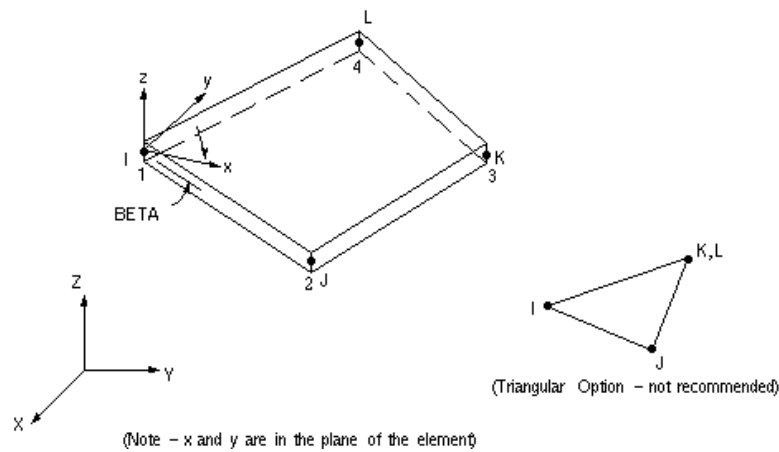


Figura 8 Elemento Thin Shell 163.

En el proceso de simulación se asigna dos tipos de elementos, uno a los herramientas y otro a las probetas, el primero son considerados elementos rígidos indeformables, mientras que el segundo es el elemento Thin Shell 163 aplicado a las probetas analizadas, material deformable.

La estrategia de malla en los herramientas fue creando elementos de 8mm de área y 2.5mm a las probetas rectangulares y cuadradas. El caso especial de malla es para las probetas Nakazimas con la que se generó una malla fina en el ancho de la probeta y fue incrementando su densidad conforme disminuye la región de la geometría, figura 9.

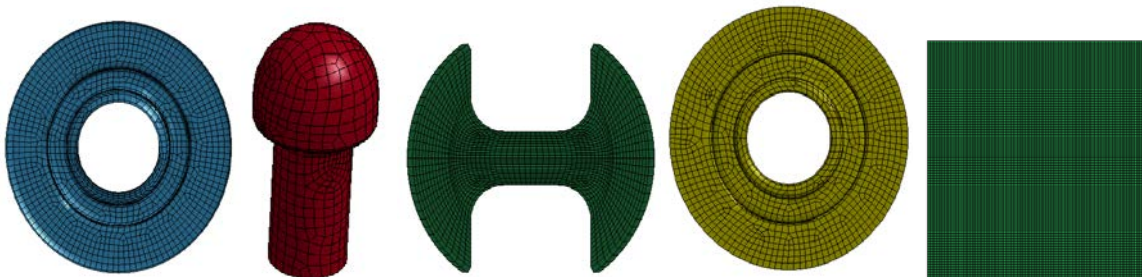


Figura 9 Tipo de malla de herramientas y probetas de simulación.



Las propiedades mecánicas ingresadas para los herramientas son las siguientes:

- Densidad: 7845 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Elasticidad: 2019 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0.29

Para las probetas se extrajeron propiedades mecánicas por tensión en el sentido de rolado (0°), las cuales son:

- Módulo de elasticidad: 186.406 GPa.
- Esfuerzo de cedencia: 443.137 MPa.
- Valor de endurecimiento “n”: 0.18.
- Densidad: 7845 kg/m<sup>3</sup>.
- Coeficiente de Poisson: 0.29.
- Curva esfuerzo deformación (figura 10).

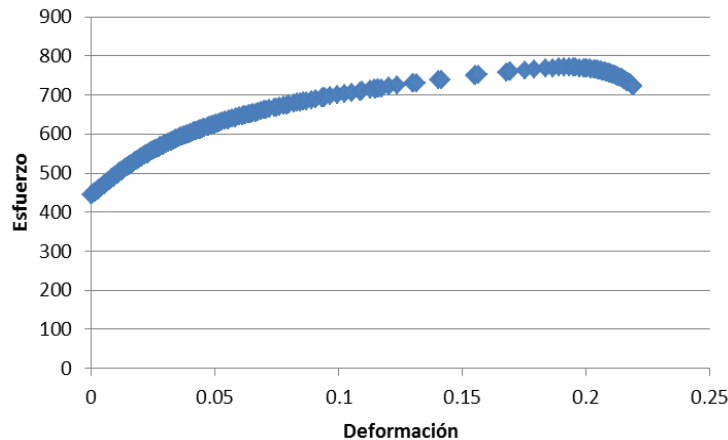


Figura 105 Curva Plástica verdadera Esfuerzo-Deformación DP590 HR.

### 3. Resultados

Las primeras simulaciones de validación consisten en que el adelgazamiento por simulación sea similar al de las pruebas experimentales, ya que las condiciones de simulación fueron aproximadas a las de operación. El valor de fricción empleado fue de 0.15 este es un valor comúnmente considerado en operaciones de estampado bajo condiciones normales de proceso.

Una vez hecha la puesta a punto del modelo de simulación se obtuvieron resultados de cambio en el espesor inicial y las regiones de fractura son muy similares en probetas Nakazima, esto se puede observar en la figura 11.

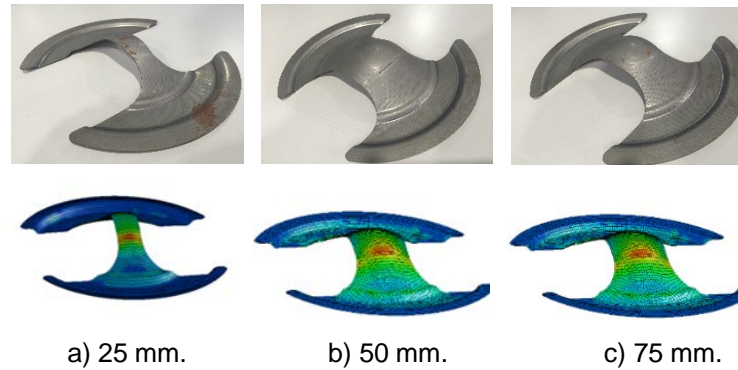


Figura 116 Correlación del modo de fractura simulación-prueba experimental.

En la tabla 3 se muestran los valores del cambio de espesor de lámina por medio de simulación y su correlación experimental.

Tabla 3 Resultados comparativos por simulación de probetas Nakazima.

Probeta	Espesor reducido simulación	Error micrómetro	Error equipo óptico
25 mm	0.248 mm	2.057%	4.2%
50 mm	0.297 mm	2.623%	1.328%
75 mm	0.34 mm	2.0172%	0.293%

En la simulación con las probetas rectangulares el modo de falla no es fácil de identificar si comparamos con probetas Nakazima, sin embargo, los valores del cambio de espesor también fueron similares a las pruebas experimentales. En la figura 12 se muestran los modos de falla de las probetas rectangulares.

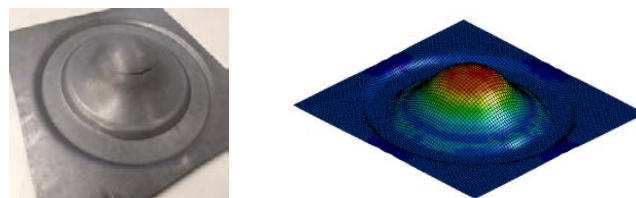


Figura 127 Modo de falla de probetas rectangulares y cuadradas.

En la tabla 4 se muestran los valores de cambio de espesor de lámina por simulación y su correlación experimental.

Tabla 4 Resultados comparativos por simulación de probetas rectangulares.

Probeta	Espesor reducido simulación (mm)	Error Micrómetro (%)	Error Equipo Óptico (%)
23x12 mm	0.295	4.22	2.64
23x18 mm	0.449	2.178	0.443
23x23 mm	0.53	1.486	0.189

Con esta correlación de resultados se procede a realizar la misma simulación sólo cambiando el parámetro de fricción de 0.15 a 0, para que la fractura del material se posicione en la altura máxima del domo, que el material se estire más sin romperse. Partiendo de esta premisa en la figura 13 se muestra cómo el adelgazamiento de las probetas se concentra en la altura máxima del domo y en la tabla 5 se muestran los valores que se obtuvieron con el cambio de la fricción.

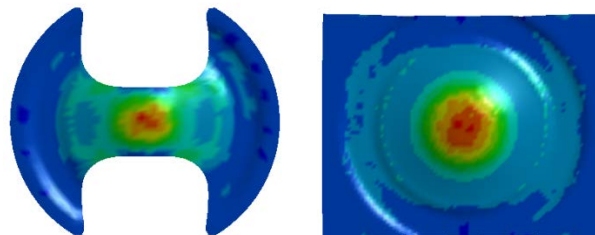


Figura 13 Región de falla con fricción 0.

Tabla 5 Valores de estados de deformación en condiciones ideales.

Tipo de Probeta	Deformación Mayor (%)	Deformación Menor (%)
Nakazima 75 mm	25.58	-4.62
Nakazima 50 mm	29.71	-4.94
Nakazima 25 mm	38.8	-6.17
Rectangular 23x12 mm	30.49	9.13
Rectangular 23x18 mm	39.44	16.49
Rectangular 23x23 mm	46.13	18

Con los valores de deformaciones mayores y menores se procesa a graficar el Diagrama de Límite de Formado (FLD) la cual se muestra en la figura 14.

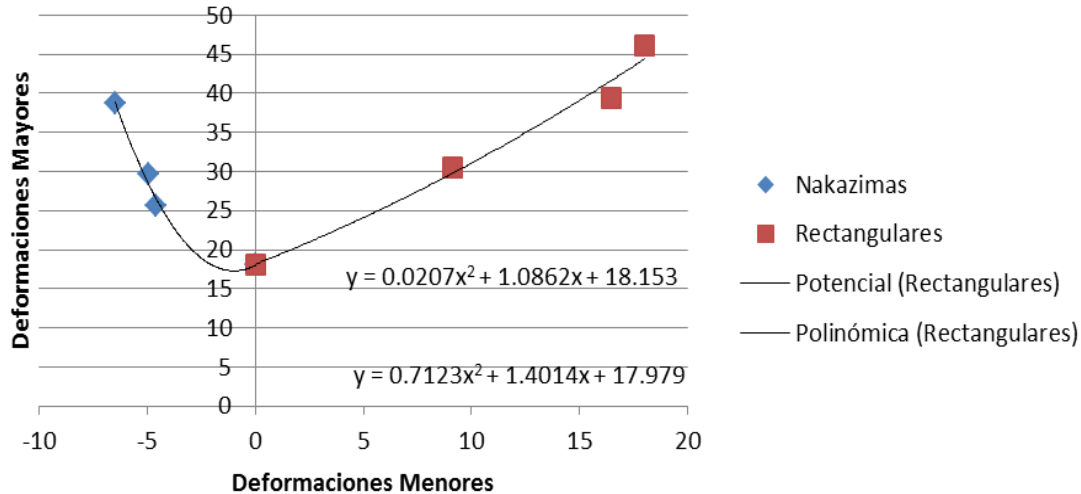


Figura 148 Diagrama de Límite de Formado (FLD).

#### 4. Discusión

La obtención del diagrama de límite de formado no es una técnica nueva, hay países en el mundo que practican este tipo de estudios, sin embargo, en México no hay universidades o centros de investigación que cuente con la tecnología suficiente para realizar ésta metodología numérico-experimental presentada.

Se considera un resultado válido porque el punto de intersección en eje de las deformaciones mayores debe ser cercano al valor “n” en porcentaje, es por eso que un software de simulación, por sí sólo, no puede determinar un FLD con tan sólo el valor “n”, sin embargo hay investigaciones con las que no se coinciden a pesar de analizar el mismo tipo de acero, como la de Raj Kumar Sahu [8] quien sólo realizó este proceso con un equipo óptico de medición y sus valores de caracterización son ambiguos.

Con el fin de lograr un modo de falla en la altura máxima del domo se hicieron pruebas experimentales con distintos lubricantes, entre ellos la manteca de cerdo, hoja de 1.4 de pvc arriba y debajo de la probeta (como sandwich), sin embargo el modo de falla no se desplazó significativamente a la parte superior del domo.

Se sugiere que para próximas investigaciones, encontrar lubricantes o diseños del herramental y/o probetas que permitan reducir la fricción para lograr experimentalmente el modo de falla deseado.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] G. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, Third Edition, McGraw-Hill, 1986.
- [2] B. Taylor, *Formability Testing of Sheet Metals*, Ninth Edition, Vol. 14 Forming.
- [3] J. P. D. Ziegler, «Relación entre parámetros Mecánicos y curvas límite de conformado».
- [4] S. Keeler, «Circular Grid System- A Valuable Aid for Evaluating Sheet-metal Formability, Sheet».
- [5] G. Goodwin, «Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop».
- [6] ASTM, «Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves».
- [7] Ansys, Shell 163 Explicit Thin Structural Shell.
- [8] S. M. Raj Kumar Sahu, «Forming Limit Diagram of High Strength Steel Sheet (DP-590)».