

Curvas límite de conformado en láminas de acero inoxidable AISI 304 utilizadas por el sector metalme-cánico

Forming Limit Curves in AISI 304 stainless steel sheets used by the metalworking sector

Jhon E. Barbosa¹  Ismael H. García²  Victoriano García¹ 

¹Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Escuela de ciencias básicas tecnología e ingeniería, Grupo de investigación Gestindustriales EOCA, Cúcuta, Colombia

²Universidad Francisco de Paula Santander UFPS, Facultad de ingenierías, Grupo de investiga-ción GIDIMA, Cúcuta, Colombia

Resumen

La formabilidad es una propiedad importante en láminas metálicas sometidas a procesos de estirado y embutido. Una manera de medirla es a través de las curvas límite de formabilidad (CLF), que permiten determinar los límites de resistencia del material en este tipo de operaciones. En este trabajo se pre-senta la construcción de curvas límite de formabilidad para 3 chapas de acero inoxidable AISI 304, con espesores de 0.9, 1.2 y 1.5 milímetros, utilizadas en el sector metalmecánico colombiano. Para ello, se realizaron ensayos simulativos bajo lo establecido en la norma ASTM E2218, mediante un dispositivo de embutido acoplado a una máquina universal. Se realizaron las curvas en los rangos de deformación verdadera ϵ_1 (entre 0 y 0,8) y ϵ_2 (entre -0,4 y 0,3). Los puntos más bajos de cada curva que marcan la condición de deformación plana (FLD0) fueron: Para 0.9 mm (0,01 de ϵ_2 y 0,45 de ϵ_1), para 1.2 mm (0,01 de ϵ_2 y 0,38 de ϵ_1) y para 1.5 mm (0,02 de ϵ_2 y 0,40 de ϵ_1). La curva para el espesor de 0.9 mm mostró mejor comportamiento que las de 1.5 y 1.2 mm respectivamente, y coincide con los ma-yores resultados obtenidos por la misma chapa en propiedades intrínsecas como el alargamiento total ϵ_t , el exponente de endurecimiento por deformación n y el valor de la anisotropía planar Δr .

Abstract

Formability is an important property in metal sheets subjected to stretching and drawing processes. One way to measure it is through formability limit curves (CLF), which allow determining the resistance limits of the material in this type of operations. This paper presents the construction of forming limit curves for 3 AISI 304 stainless steel sheets, with thicknesses of 0.9, 1.2, and, 1.5 millimeters, used in the Colombian metalworking sector. For this, simulated tests were carried out under the provisions of the ASTM E2218 standard, using a stuffing device coupled to a universal machine. Next, the curves were made in the strain ranges ϵ_1 (between 0% and 100%) and ϵ_2 (between -40% and +30%). The lowest points of each curve that mark the plane deformation condition were: For 0.9 mm (1.5% of ϵ_2 and 58% of ϵ_1), for 1.2 mm (3% of ϵ_2 and 49% of ϵ_1), and for 1.5 mm (1% of ϵ_2 and 49% of ϵ_1). The 0.9 mm thick sheet showed a better performance than the 1.5 and 1.2 mm respectively, and coincided with the highest results obtained by the same sheet in intrinsic properties such as total elongation ϵ_t , hardening exponent by deformation, n , and the value of the planar anisotropy Δr .

Keywords:

Forming Limit curves, Forma-bility, Anisotropy, Sheet metal, Mechanical properties, AISI 304.

Palabras clave:

Curvas límite de conformado, Formabilidad, Anisotropía, Lámina metálica, Propiedades mecánicas, AISI 304.

Cómo citar:

Barbosa, J.E., García, I.H., Gar-cía, V., Curvas límite de con-formado en láminas de acero inoxidable AISI 304 utilizadas por el sector metalmecáni-co. *Ingeniería y Competitivi-dad*, 2023, 25(3); e-21612702. doi: 10.25100/iyc.v25i3.12702

Recibido: 21-12-22

Aceptado: 02-10-23

Correspondencia:

§ jhon.barbosa@unad.edu.co, ismaelhumbertogp@ufps.edu.co, victoriano.garcia@unad.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconoci-miento-No Comercial-Com-partirIgual4.0.

Conflicto de intereses:

Ninguno declarado



¿Por qué se realizó?

Este trabajo se realizó con el fin de conocer el comportamiento de láminas de acero inoxidable AISI 304 utilizadas por la industria metalmeccánica a través de la construcción experimental de sus curvas límite de formabilidad, simulando procesos de embutido y/o estirado. Proyecto que fue realizado y financiado en convenio interinstitucional entre la UFPS y la UNAD.

¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Se pudo determinar que los valores de FLD0 (punto más bajo de la curva límite de formabilidad y condición de deformación plana denominada Forming Limit Diagram zero) son los siguientes:

Para el calibre 16 está en torno a 0,02 para ϵ_2 y 0,4 para ϵ_1 .

Para el calibre 18 está en torno a 0,01 para ϵ_2 y 0,38 para ϵ_1 .

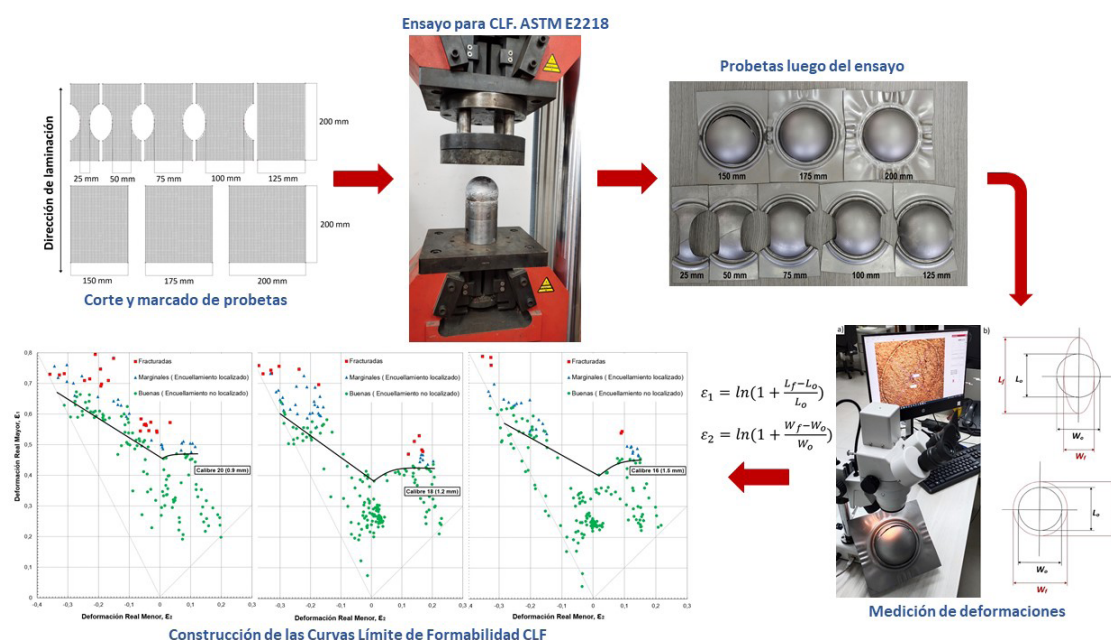
Para el calibre 20 está en torno a 0,01 para ϵ_2 y 0,45 para ϵ_1 .

Se observa que la lámina de calibre 20 tuvo mejor comportamiento que las de calibres 18 y 16, incluyendo los valores del FLD0, coincidiendo con los resultados de alargamiento total ϵ_t y del exponente de endurecimiento por deformación n .

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados aportan datos técnicos que permiten a los fabricantes de este tipo de materiales, predecir el comportamiento de las láminas en los procesos de estirado y embutido.

Graphical Abstract



Introducción

La formabilidad es la capacidad que tiene la lámina de metal para dejarse dar forma sin fallar o fracturar cuando es sometida a procesos de manufactura como el estirado y el embutido profundo (1, 2, 3). Este comportamiento puede estudiarse por medio de algunas propiedades mecánicas intrínsecas del material, entre las que están: la resistencia a tracción σ_u , el alargamiento total ϵ_r , el exponente de endurecimiento por deformación n , la anisotropía normal r y la anisotropía planar Δr . En este sentido, se encuentran trabajos como los realizados por Gedney (4) y Casadiego et al. (2), que utilizan en su estudio las normas ASTM E8 (5), ASTM E646 (6) y ASTM E517 (7) para caracterizar las láminas metálicas.

También existen ensayos simulativos que permiten determinar experimentalmente la formabilidad mediante la imitación, en cierta medida, de algunas condiciones de operación (8, 9, 10, 11, 12). Uno de los más utilizados en la actualidad es el ensayo para determinar las curvas límite de formabilidad (CLF) (13), que permiten hallar el rango de deformaciones máximas de la lámina a través de una prueba que simula el estirado biaxial y el embutido profundo. Este método ha sido utilizado para la caracterización experimental de diversos materiales como se puede apreciar en los trabajos realizados por Vadavadagi et al. (14), Safdarian et al. (15), Anand et al. (16), Pham et al. (17), Gauri et al. (18) y Kosuri et al. (19).

Tal como lo expone Barbosa et al. (1), esta prueba consiste en someter varias muestras de la lámina a embutido mediante un dispositivo compuesto por una matriz prensa chapa y un punzón hemisférico con las dimensiones estipuladas en la norma ASTM E2218 (13), para luego medir las deformaciones y con ellas construir la curva. Estas CLF son utilizadas para determinar qué tan cerca a la falla o al encuellamiento localizado puede estar una chapa durante una operación de conformado, o si una falla en particular es debida al procesado y/o a la pobre condición de la matriz o punzón, contribuyendo en la mejora de la productividad, tal como lo indica Cruz-González et al. (20).

Paul (21), en su trabajo de revisión, muestra cómo a través de los años otros autores han desarrollado aproximaciones que permiten predecir con diferentes grados de precisión las CLF. Estas ecuaciones empíricas son función de algunas propiedades mecánicas del material y del espesor de la lámina. Como ejemplo, se presenta la predicción desarrollada por el mismo Paul (21) descrita en Ec. (1), Ec. (2) y Ec. (3):

$$FLD_0 = 7.702 \text{ Exp}(-0.0122\sigma_u) - 0.1124r - 0.6908 \text{ Exp}(-124187\epsilon_r) + 0.1149n + 0.0823t + 0.3011 \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = (1 + FLD_0)(1 + \epsilon_2)^P - 1 \quad (2)$$

$$P = 1.0834 \text{ Exp}(-1.4114FLD_0) - 0.361 \quad (3)$$

La Ec. (1) se utiliza para calcular el punto más bajo de la curva donde ocurre una condición de deformación plana FLD_0 (Forming Limit Diagram cero) (9,12,13). Este se determina en función de la resistencia a tracción σ_u , el alargamiento total ϵ_r , el exponente de endurecimiento por deformación n , la anisotropía normal r , y el espesor de la lámina t .

Con la Ec. (2) y Ec. (3) se determina el lado derecho de la curva y, por último, la parte izquierda de la curva corresponde a una recta de pendiente -1.

En este trabajo se determinó experimentalmente la formabilidad de láminas de acero inoxidable AISI 304 utilizadas por la industria metalmecánica, principalmente a través de la construcción de las curvas límite de formabilidad en los 3 espesores seleccionados para el estudio. Este material pertenece a la familia de los aceros inoxidables austeníticos, que son los más dúctiles y de mejor formabilidad, con aplicaciones como equipos para procesamiento de alimentos y equipos de procesos químicos y hospitales (10). Estos datos técnicos permitirán a los fabricantes de este tipo de materiales predecir el comportamiento en los procesos de estirado y embutido.

Metodología

El material objeto de estudio son láminas de acero inoxidable adquiridas en el comercio y utilizadas por el sector metalmecánico, en calibres 16, 18 y 20 (1.5, 1.2 y 0.9 mm respectivamente). El análisis químico realizado por Barbosa et al. (22) confirma que los componentes están dentro del rango estipulado para este acero, y de acuerdo al bajo contenido de carbono, las chapas se pueden considerar como grado 304L con características de mejor soldabilidad.

En cuanto a las propiedades intrínsecas, la Tabla 1 recoge algunos datos promedio del trabajo realizado por Barbosa et al. (22) para cada uno de los espesores.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los aceros en estudio.

Gauge	Tensile strength (σ_u) MPa	Yield strength (σ_y) MPa	Total elongation in 50 mm gauge length (ϵ_t) %	Strain-Hardening Exponents n	Normal anisotropy r	Planar anisotropy Δr
16 (1.5 mm)	666	286	0.57	0.378	1.05	-0.19
18 (1.2 mm)	601	251	0.58	0.371	0.99	-0.15
20 (0.9 mm)	530	253	0.63	0.393	0.93	-0.11

Fuente: Elaboración propia

El método a seguir para determinar las curvas límite de formabilidad fue el especificado por la norma ASTM E 2218 “Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves” (13).

Para cada espesor, se fabricaron 8 probetas de 200 mm de largo con anchuras centrales que van desde 25 hasta 200 mm con incrementos de 25 mm, Figura 1. Sobre éstas se construyó un patrón de círculos de 2.5 mm de diámetro con separación entre ellos de 1 mm, mediante grabado láser en una máquina Marca Bodor, Referencia ML20F Gold, con una potencia de 30W, figura 2.

Las pruebas se realizaron en una máquina universal de tracción/compresión marca IBERTEST, modelo IBMT2-600, a la cual se le adaptó un dispositivo con los detalles geométricos y dimensiones estipulados en la norma ASTM E2218 (13), y para lo que se requirieron algunos elementos de acople, tal como se muestra en la Figura 3. Las láminas para cada espesor fueron deformadas hasta la falla tal como se muestra en la Figura 4.

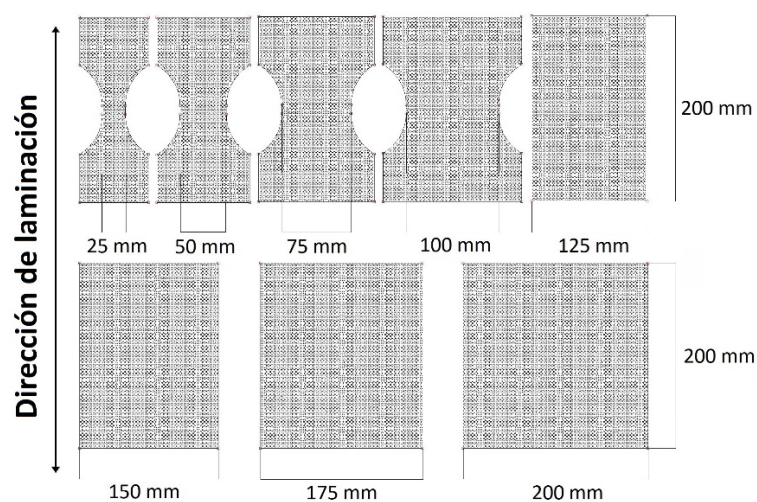


Figura 1. Geometría de las 8 probetas maquinadas por cada espesor para las pruebas de las curvas límite de formabilidad CLF. Fuente: Elaboración propia

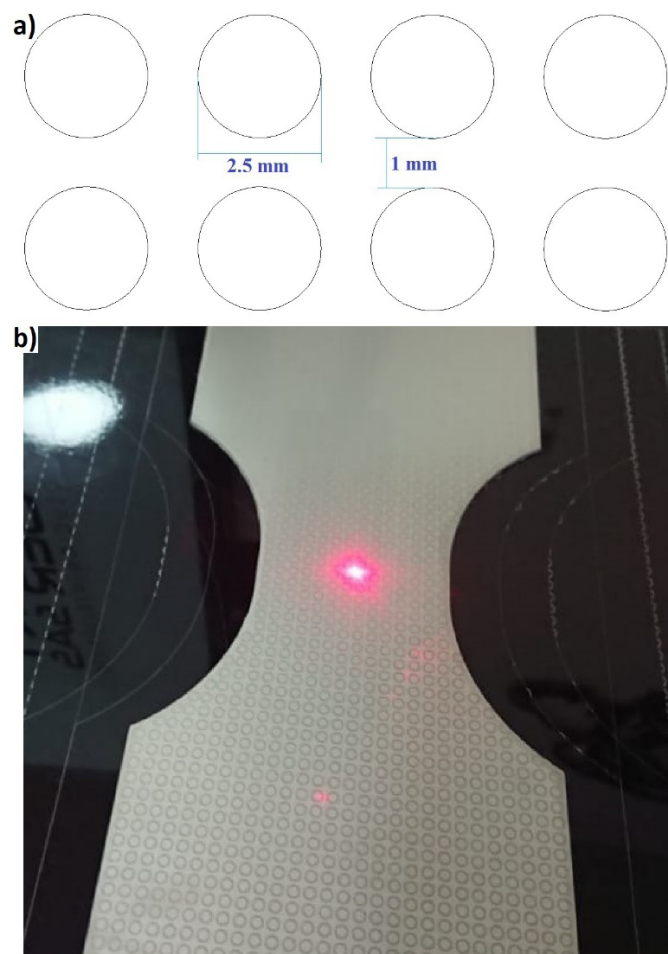


Figura 2. a) Patrón utilizado. b) Montaje y grabado láser de las probetas. Fuente: Elaboración propia



Figura 3. Dispositivo para el ensayo de determinación de las CLF, con sus elementos de acople a la maquina universal IBERTEST, modelo IBMT2-600. Fuente: Elaboración propia

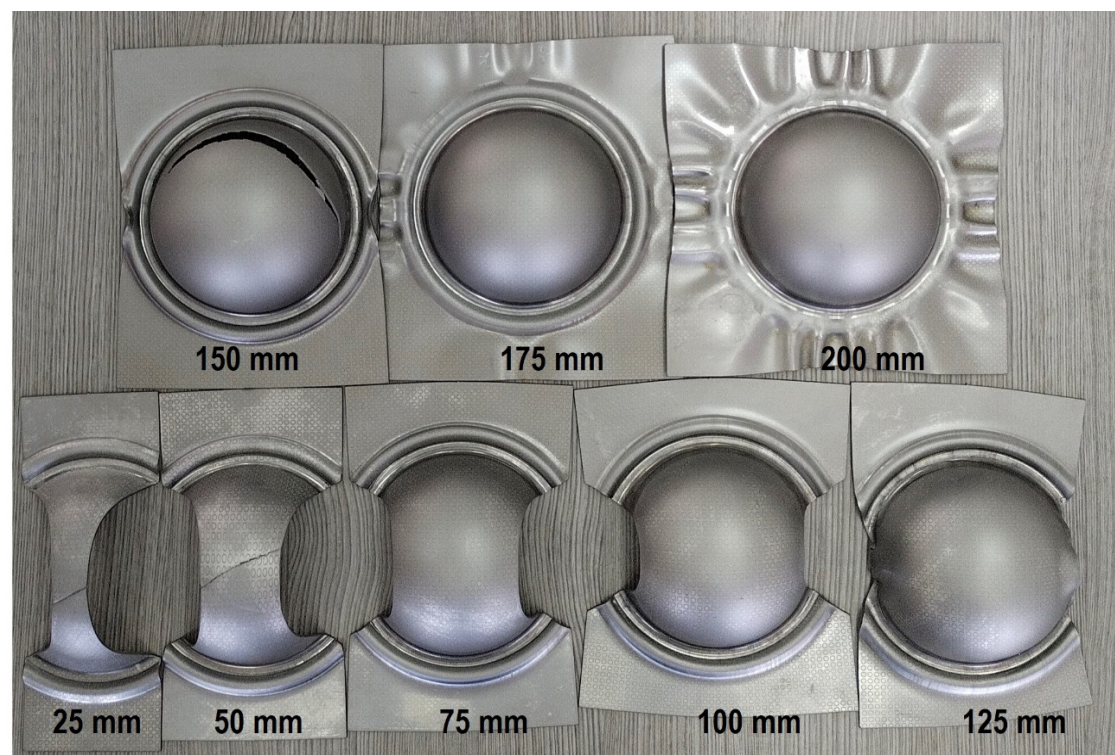


Figura 4. Probetas después del ensayo para determinar las curvas límite de formabilidad. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, con el uso de un estereomicroscopio digital marca MOTIC modelo DM143-N2GG-B, conectado a un PC mediante el *software Motic Images Plus 3.0 ML* se realizaron las mediciones necesarias para la construcción de las CLF. Inicialmente, se

tomaron las medidas del diámetro interno de los círculos sobre las láminas antes del ensayo para tener la referencia sobre la cual determinar los porcentajes de deformación posterior. Al final del ensayo, se realizó una clasificación visual al patrón de círculos que se convirtieron en elipses, clasificándolas de acuerdo a su estado como:

- Buenas: elipses que están en la zona de encuellamiento no localizado.
- Marginales: elipses que están en las zonas donde hubo un adelgazamiento pronunciado de la lámina (encuellamiento localizado).
- Fracturadas: elipses ubicadas en zonas donde la lámina sufrió rotura.

En el proceso de conformado de la lámina el encuellamiento difuso o no localizado ocurre normalmente después de la deformación uniforme a partir del esfuerzo máximo (capacidad de carga máxima del material), seguidamente la deformación es localizada solo en el área de encuellamiento, y finalmente llega la fractura [\(21\)](#).

En las elipses seleccionadas se midió la longitud de los ejes mayor y menor, y con ellas se determinaron los porcentajes de deformación correspondientes e_1 y e_2 , de acuerdo a las Ec. (4) y Ec. (5), como se muestra en la Figura 5.

En donde:

$$e_1 = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (\text{deformación mayor}) \quad (4)$$

$$e_2 = \frac{W_f - W_0}{W_0} \quad (\text{deformación menor}) \quad (5)$$

W_0 y L_0 equivalen al diámetro inicial de los círculos y se puede observar que, si bien la deformación mayor siempre es positiva (e_1), la menor deformación puede ser positiva, negativa o cero (e_2) (10).

Posteriormente, se determinan los valores de las deformaciones reales en el eje mayor ϵ_1 y el eje menor ϵ_2 mediante las Ec. (6) y Ec. (7).

$$\epsilon_1 = \ln(1 + e_1) \quad (\text{deformación real mayor}) \quad (6)$$

$$\epsilon_2 = \ln(1 + e_2) \quad (\text{deformación real menor}) \quad (7)$$

Los valores de deformación real calculados se llevaron a un diagrama ϵ_1 vs ϵ_2 para trazar la curva límite de formabilidad. En la elaboración de los diagramas se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones: cada punto fue identificado como bueno, marginal o fracturado mediante una simbología, como se muestra en las figuras 7, 8, 9 y 10. En todos los casos, el rango de la deformación ϵ_1 , se tomará entre 0 y 0,8, y el de ϵ_2 , se tomará entre -0,4 y +0,3.

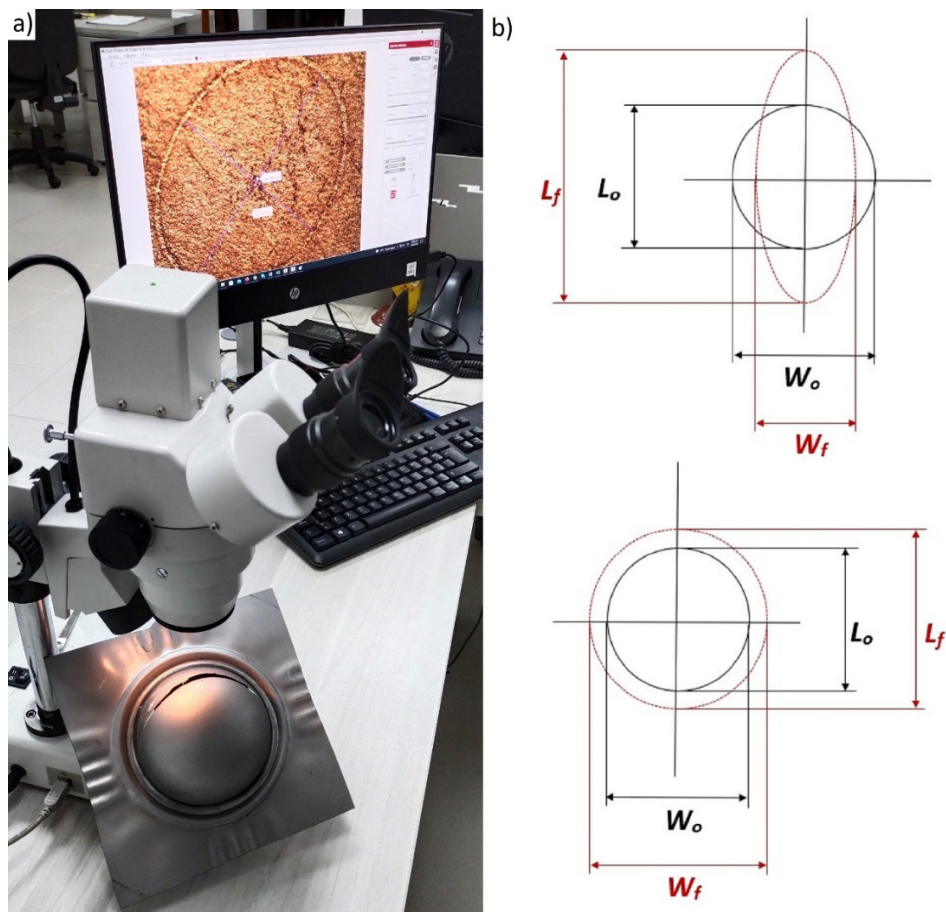


Figura 5. a) Montaje de la probeta sobre estereomicroscopio para medición. b) Formas adquiridas por los círculos después del ensayo. Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

El análisis metalográfico de las muestras de las chapas de los 3 calibres presenta la misma microestructura, con austenita como única fase con granos entre 15 y 20 micras (tamaño de grano austenítico ASTM entre 4 y 5), y la presencia de maclas (22). En trabajos previos realizados para aplicaciones relacionadas con procesos de conformado de lámina, se menciona que es preferible un tamaño de grano austenítico ASTM de 7 (10). En la figura 6 se puede apreciar a manera de ejemplo la micrografía de la chapa de calibre 16 a 500 aumentos (ataque: HCl y H_2O_2).

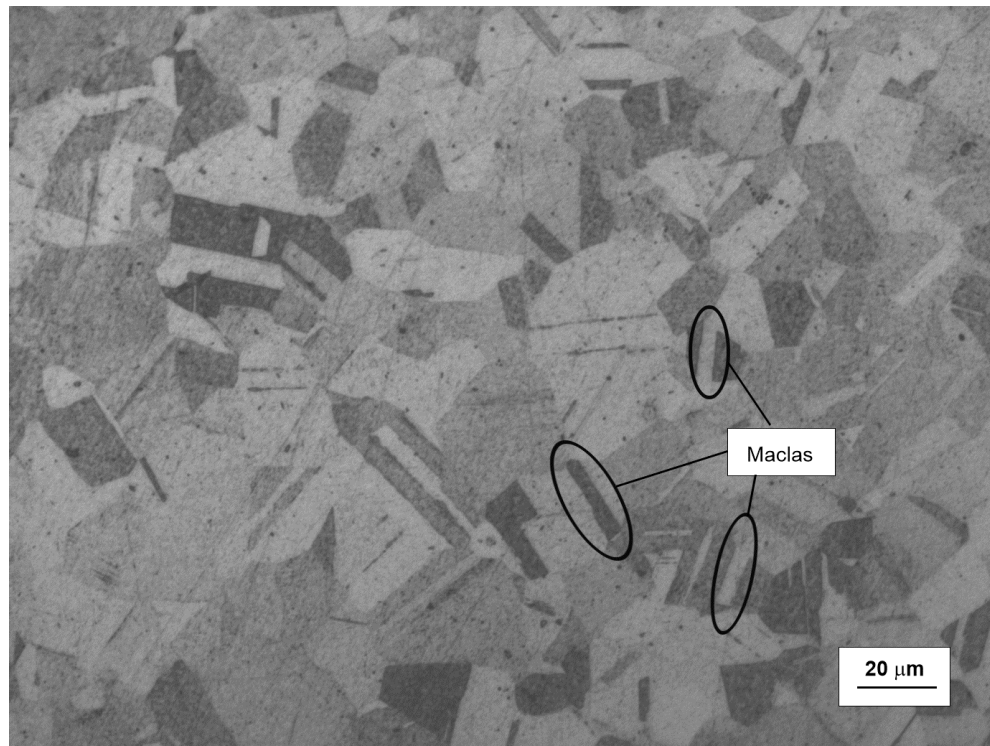


Figura 6. Micrografía de una muestra de la chapa de calibre 16. La microestructura muestra austenita como única fase. Las 3 chapas muestran la misma microestructura. Fuente: Elaboración propia

En las figuras 7, 8 y 9 se presentan las curvas límite de formabilidad para los 3 espesores de lámina. Estas fueron trazadas en la vecindad entre los puntos buenos y marginales, tal como lo describe en sus ejemplos la norma ASTM E2218 (13).

Para los 3 casos la parte izquierda de la curva a partir de 0 de deformación real ϵ_2 , corresponde a una semirecta con pendiente pronunciada y representa los puntos medidos sobre las probetas de 25 hasta 125 mm de ancho. En estas probetas las deformaciones reales menores ϵ_2 son negativas y simulan el comportamiento en un proceso de embutido (10).

Por otro lado, la parte derecha de las CLF tiene de manera general, forma de una curva polinomial, y agrupa los puntos medidos en las probetas desde 150 hasta 200 mm de ancho. Allí, las deformaciones reales menores ϵ_2 son positivas y las probetas simulan el comportamiento de la lámina en procesos de estirado. Por último, la tendencia es a que los tramos derecho e izquierdo de la CLF se unan en el punto más bajo de la misma, cuya deformación real menor de ϵ_2 se encuentra en el rango de 0 a 0,05, condición de deformación plana denominada FLD₀ (Forming Limit Diagram zero) (9,12,13).

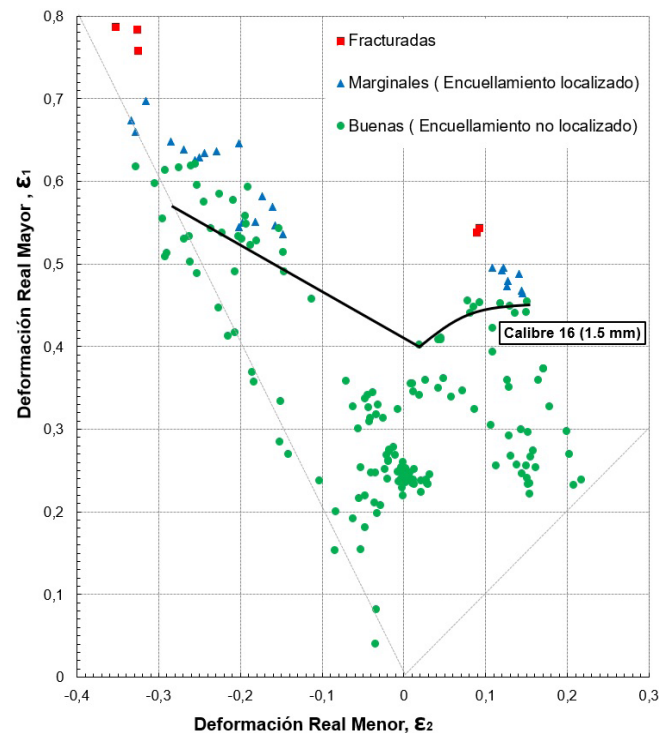


Figura 7. Curva límite de formabilidad de la lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 16 (1.5 mm). Fuente: Elaboración propia

De las figuras 7, 8 Y 9 se pudo determinar que los valores de FLD_0 son los siguientes:

Para el calibre 16 está en torno a 0,02 para ϵ_2 y 0,4 para ϵ_1 .

Para el calibre 18 está en torno a 0,01 para ϵ_2 y 0,38 para ϵ_1 .

Para el calibre 20 está en torno a 0,01 para ϵ_2 y 0,45 para ϵ_1 .

Las 3 curvas generadas para las láminas de este estudio tienen mejor comportamiento que los reportados por otros autores. Por ejemplo, Talyan et al. (23), para una chapa de acero AISI 304L de 1.168mm de espesor, con un FLD_0 determinó valores en torno a 0,016 para ϵ_2 y 0,36 para ϵ_1 . Rufini et al. (24), determinó un FLD_0 en torno a 0 para ϵ_2 y 0,285 para ϵ_1 en una chapa de acero AISI 304 de 1.5 mm de espesor.

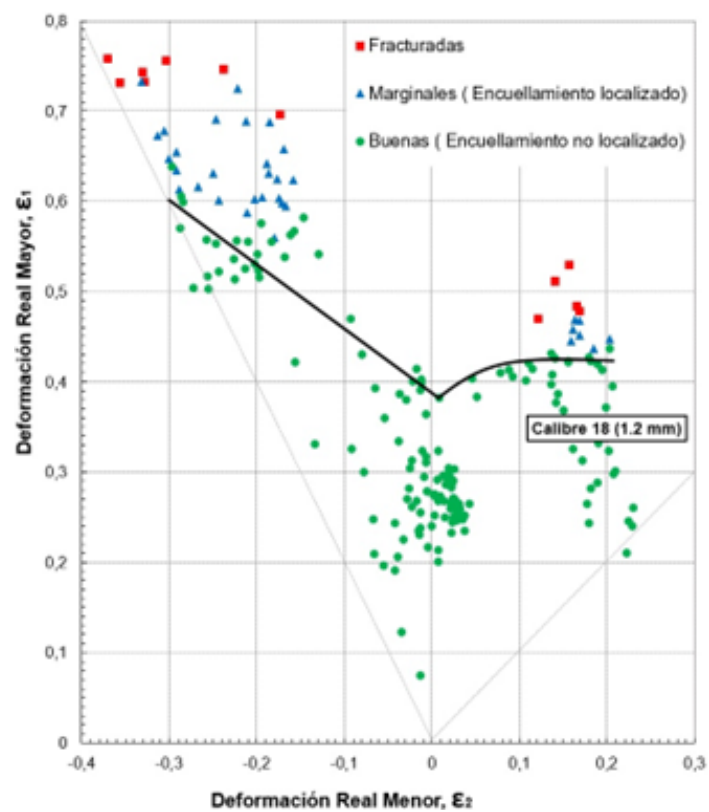


Figura 8. Curva límite de formabilidad de la lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 18 (1.2 mm). Fuente: Elaboración propia

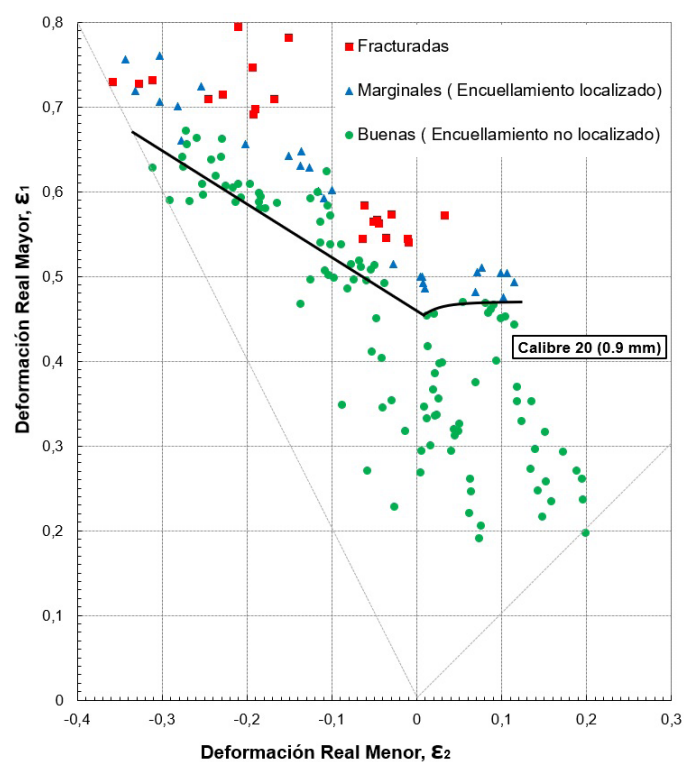


Figura 9. Curva límite de formabilidad de la lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 20 (0.9 mm). Fuente: Elaboración propia

A modo ilustrativo en la figura 10 se puede observar un diagrama comparativo entre las CLF para las 3 láminas objeto de estudio, junto a las predicciones determinadas por medio de ecuaciones de aproximación desarrolladas por Paul. (25).

En el caso de las curvas experimentales se observa que la lámina de calibre 20 tuvo mejor comportamiento que las de calibres 18 y 16, incluyendo los valores del FLD_0 , cuya curva está más arriba en el diagrama, figura 10. Lo anterior coincide con los resultados de alargamiento total ϵ_t y del exponente de endurecimiento por deformación n , reportados en la tabla 1, pero no corresponde con lo reportado por diferentes autores en el sentido de que las láminas de mayor espesor tienen mayor área segura en el diagrama límite de formabilidad FLD (9, 12, 21, 25). Este comportamiento puede deberse a que, al tener un espesor tan pequeño, la respuesta al proceso de recocido de recristalización puede ser mejor, lo que se corresponde con un menor comportamiento anisotrópico, Δr más cercano a cero, y por tanto, presenta mejores propiedades intrínsecas (10), es decir, alargamiento hasta fractura y exponente de endurecimiento por deformación, lo que conlleva a un FLD_0 más alto.

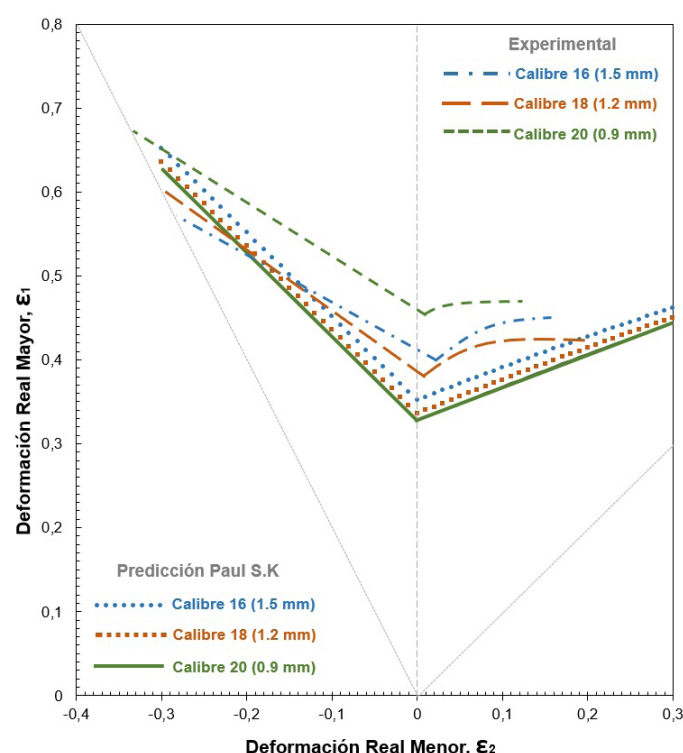


Figura 10. Comparativo de las 3 curvas límite de formabilidad desarrolladas experimentalmente junto a las predicciones utilizando la aproximación de Paul. (25), para el acero inoxidable AISI 304. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las predicciones, los valores de los FLD_0 en términos de deformación real fueron calculados de acuerdo a Paul. (25), tomando como referencia de la tabla 1, los datos de resistencia última (σ_u), anisotropía normal (r), elongación total (ϵ_t), exponente de endurecimiento por deformación (n) y el espesor (t).

Los resultados de FLD_0 fueron para ϵ_1 0,327; 0,336 y 0,352 en los calibres 20 (0.9 mm), 18 (1.2 mm) y 16 (1.5 mm) respectivamente, mientras que ϵ_2 es 0 en todos los casos (25). Aquí el comportamiento de las curvas en el lado derecho e izquierdo dependen únicamente de FLD_0 para cada espesor.

Conclusiones

La mayor área cubierta por la CLF, el mayor FLD_0 y su coincidencia con el mejor desempeño en propiedades como alargamiento total ϵ_t , exponente de endurecimiento por deformación n y anisotropía planar Δr , permiten inferir que las láminas de calibre 20 tienen mejor formabilidad que las de calibre 16 y 18. Este comportamiento, contrario a lo que se expone en estudios anteriores, puede deberse a que la lámina de este calibre, al ser muy delgada, presentó una mejor respuesta al proceso de recocido de recristalización durante su manufactura, y por tanto un menor comportamiento anisotrópico y mejores propiedades intrínsecas.

La caracterización experimental es indispensable para conocer el comportamiento exacto del material, puesto que las predicciones solo dan una idea general del desempeño y aunque estas se calculan en función de varias propiedades del material, dependen en mayor porcentaje del espesor de la lámina y del exponente de endurecimiento por deformación.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD y a la Universidad Francisco de Paula Santander, UFPS, por el apoyo logístico y financiero de esta investigación.

Referencias bibliográficas

1. Barbosa J, García I, Fuentes J. Estimación vía experimental de la formabilidad de láminas de aluminio de pureza comercial. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. [Internet] 2009 [cited 2022 Apr 25]; 29(2): 128-134. Available from: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522009000200008&lng=es&tlng=es
2. Casadiego L, Barbosa J, García I. Determinación experimental de la formabilidad de láminas de acero SG295 mediante sus propiedades tensiles. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. [Internet] 2017 [cited 2022 Apr 25]; 1(29): 9-15. Available from: <https://doi.org/10.24054/16927257.v29.n29.2017.183>
3. Askeland D.R, Wright W.J. Ciencia e ingeniería de los materiales. 7ª ed. México, D.F: Cengage learning, 2017.
4. Gedney R. Sheet Metal Testing Guide. ADMET, Inc. [Internet] 2013 [cited 2022 Apr 25]; 1(1):1-9. Available from: <http://admet.com/assets/ADMET-Sheet-Metal-Testing-Guide-July-2013.pdf>
5. ASTM E8, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International; 2021.
6. ASTM E517, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. West Conshohocken: ASTM International; 2018.
7. ASTM E646, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken: ASTM International; 2016.
8. Andersson R. Deformation characteristics of stainless steels [Internet] [PhD dissertation]. [Luleå]: Luleå tekniska universitet; 2005. [cited 2022 Apr 25]. Available from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-17912>
9. ASM International. Metals handbook volume 14 forming and forging. USA: ASM International, 1996.

10. Kalpakjian S, Schmid S. Manufactura, Ingeniería y tecnología. 5ª ed. México, D.F: Pearson Educación, 2008.
11. Schey J.A. Introduction to manufacturing processes. 3ª ed. United states of america: McGraw-Hill, 2000.
12. Tekkaya A.E, Altan T. Sheet Metal Forming: Fundamentals [Internet]. Materials Park, Ohio: ASM International; 2012 [cited 2022 Apr 25]. Available from: <https://search-ebscohost-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=513307&lang=es&site=eds-live&scope=site>
13. ASTM E2218, Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves. West Conshohocken: ASTM International; 2015.
14. Vadavadagi B.H, Bhujle H.V, Khatirkar, R.K. Forming Limit Diagrams of Low-Carbon Steels Obtained Using Digital Image Correlation Technique and Enhanced Formability Predictions Incorporating Microstructural Developments. Journal of Materials Engineering and Performance [Internet] 2020 [cited 2022 Jul 9];29(1):6066–6077. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05048-6>
15. Safdarian R. Forming Limit Diagram Prediction of AISI 304–St 12 Tailor Welded Blanks Using GTN Damage Model. Journal of Testing and Evaluation [Internet] 2019 [cited 2022 Jul 9]; 48(6):1–15. Available from: <https://doi.org/10.1520/JTE20180069>
16. Anand C, Ayush M, Nitin K, Swadesh K, Uma M, Reddy P. Influence of lubrication on forming limit diagram for Inconel 625 alloy at elevated temperatures. Materials Today: Proceedings [Internet] 2021 [cited 2022 Jul 9]; 38(5): 2758–2763. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.691>
17. Pham Q, Nguyen-Thoi T, Nguyen D, Kim Y. A Comparative Investigation on Theoretical Models for Forming Limit Diagram Prediction of Sheet Metals. Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer [Internet] 2021 [cited 2022 Jul 9]. p. 94–100. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8_12
18. Gauri M, Ayush M, Nitin K, Amit K, Swadesh K, Y.C Lin. Forming and fracture limits of IN718 alloy at elevated temperatures: Experimental and theoretical investigation. Journal of Manufacturing Processes [Internet] 2020 [cited 2022 Jul 9]; 56(A): 482–499. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.070>
19. Kosuri D, Mudavath D, Sahadevudu R, Tapila V, Ch. Bandhavi. Experimental determination of forming limit diagram for $\alpha + \beta$ brass at hot forming conditions. Materials Today: Proceedings [Internet] 2022 [cited 2022 Jul 9]; 62(6): 4108–4116. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.657>
20. Cruz-González C, Vargas-Arista B, León-Méndez I, Guzmán-Flores I. On the application of the forming limit diagrams for quality control of blanks for wheelbarrow of ASTM A1008 carbon steel. revmetal [Internet]. 2022 Jul.5 [cited 2022Jul.16]; 58(1): e218. Available from: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.218>
21. Paul SK. Controlling factors of forming limit curve: A review. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. [Internet] 2021 [cited 2022 Jul 9];2(2021): 100033. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100033>
22. Barbosa J, García I, García V. Análisis de la formabilidad de láminas de acero AISI 304 con diferentes espesores mediante sus propiedades de tracción. Rev. UIS ing.

- [Internet]. 9 de diciembre de 2022 [citado 10 de diciembre de 2022];21(4):97-106. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/13263>
23. Talyan V, Wagoner R.H, Lee J.K. Formability of stainless steel. Metall Mater Trans A. [Internet] 1998 [cited 2022 Apr 25]; 29(1): 2161–2172. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0041-1>
24. Rufini R, Di Pietro O, Di Schino A. Predictive Simulation of Plastic Processing of Welded Stainless Steel Pipes. Metals [Internet] 2018[cited 2022 Apr 25];8(7):519. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/met8070519>
25. Paul SK. Prediction of complete forming limit diagram from tensile properties of various steel sheets by a nonlinear regression based approach. [Internet] 2016 [cited 2022 Jul 9];23(2016): 192-200. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.005>