



40th S E N A F O R

24th International Forging Conference

23rd National Sheet Metal Forming Conference / 10th International Sheet Metal Forming

Conference / 7th BrDDRGG Congress

10th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

3rd International Conference on Surface Engineering in Material Forming

Centro de Eventos do Hotel Continental - Porto Alegre/RS

October 13-15, 2021

RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE MARCADO POR LASER Y LA TENSIÓN DE ROTURA EN PROBETAS DE TRACCIÓN DE ACERO AVANZADO DE ALTA RESISTENCIA.

Alejandro Simoncelli ^(1,2)

German R. Abate ^(1,2)

Daniela J. Perez ^(1,2)

Vitaliy Martynenko ^(1,2)

Antonio J. Sánchez Egea ⁽³⁾

Daniel Martínez Krahmer ^(1,2)

ABSTRACT

En la caracterización de un acero de alta resistencia, como material destinado al conformado de chapas para la industria automotriz, es necesario realizar el diagrama de límite de conformado. Para ello, se requiere trazar sobre la superficie de las probetas un marcado que debe ser indeleble, visible y con precisión dimensional. Los equipos de grabado láser suponen una herramienta rápida y económica para lograr dichos objetivos de marcado. Sin embargo, por tratarse de un proceso térmico existe la posibilidad de afectar significativamente las propiedades mecánicas del material original. Es por tal motivo que se estudió la sensibilidad de dos aceros empleados en los procesos de estampado automotriz. Al observar una afectación significativa en las propiedades mecánicas en uno de ellos, se procedió a la realización de un diseño de experimentos (DOE) a fin de evaluar la influencia del foco, potencia y cantidad de pasadas del proceso de grabado láser sobre los resultados de un ensayo de tracción. Por último, a partir de los resultados experimentales se estableció un modelo mediante regresión por mínimos cuadrados que permite visualizar de forma sencilla la afectación mecánica.

Keywords — Acero alta resistencia, grabado láser, DOE, regresión por mínimos cuadrados, ensayo de tracción, tensión de fractura.

1. INTRODUCCION

Las empresas estampadoras de la industria automotriz argentina, por requisitos internacionales y de calidad, se encuentran en la necesidad de incorporar know-how para el procesamiento de aceros de alta resistencia. En este sentido, resulta pertinente el estudio del comportamiento de estos materiales de mayor resistencia a la deformación. Este tipo de aceros son una amplia familia que incluyen a los denominados dual-phase, complex-phase, ferríticos-bainíticos, martensíticos, etc [1]. La forma práctica para conocer el comportamiento de las chapas frente a las deformaciones que se producen durante el estampado es mediante la construcción de los diagramas límites de conformado [2]. Esta actividad requiere de ensayos de tracción para el trazado de su sector izquierdo (tracción-compresión), y de Nakazima para el lado derecho (tracción-tracción) [3]. Conocidos los diagramas límites de conformado,

⁽¹⁾ Departamento de Procesos de Mecanizado y Conformado, INTI, Argentina

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Cataluña, España

estos pueden ser interpretados por los softwares de simulación de estampado de chapa para ajustar así el diseño de las matrices, de modo tal de poder alcanzar piezas compatibles con sus posibilidades de conformado [4]. En los ensayos de tracción y de Nakazima es necesario deformar las probetas hasta producir la rotura. Uno de los métodos para cuantificar las deformaciones producidas durante cada tipo de ensayo es generar un marcado con un patrón que sea indeleble, preciso y que no afecte localmente las propiedades del material [5]. Estos requisitos podrían ser alcanzados de forma económica y práctica mediante el uso del marcado láser. Sin embargo, por tratarse de un proceso térmico, las propiedades mecánicas podrían verse afectadas. Para poder evaluar la posible alteración debida al proceso de marcado láser se empleó el ensayo de tracción, para la realización de pruebas preliminares en chapas de aceros de alta resistencia de dos materiales diferentes, y posteriormente se ajustó un diseño de experimentos (DOE) sobre aquel de mayor sensibilidad a la afectación térmica. El resultado de esta etapa previa permite orientar en la selección de condiciones de grabado láser seguro. De estos resultados se estableció un modelo ajustado por regresión de mínimos cuadrados para graficar superficies de respuesta que permiten identificar de forma sencilla el grado de influencia de las variables analizadas en la alteración de las propiedades mecánicas.

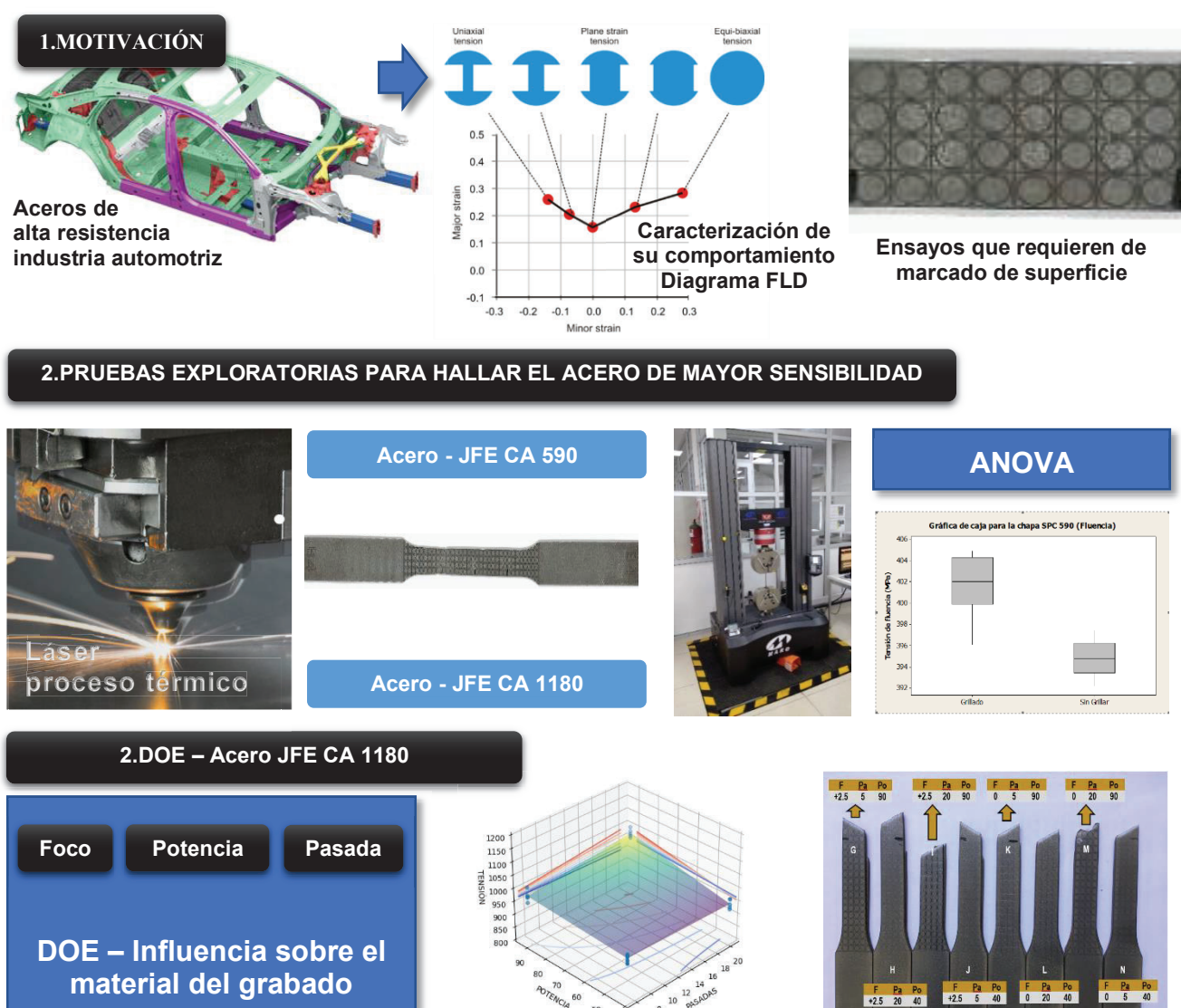


Figura 1: Resumen de metodología y motivación del trabajo.

2. MÉTODOLÓGÍA Y RESULTADOS

2.1 Sensibilidad de los aceros JFE CA 590 y JFE CA 1180 al grabado láser

En este trabajo se estudiaron dos tipos de chapas de acero de alta resistencia, una designada como JFE CA 590 y la otra como JFE CA 1180, ambos materiales de uso extendido en el sector automotriz, con el objetivo de evaluar la influencia del marcado láser sobre las propiedades mecánicas en un ensayo de tracción. Para la determinación de las propiedades mecánicas de ambos materiales se utilizó el ensayo de tracción definido por la Norma ASTM E8. La dirección del corte de las probetas fue siempre coincidente con la dirección de laminación de la chapa. El corte fue realizado con un equipo de corte por chorro de agua con abrasivo granate malla # 80, por su mínima afectación respecto a otros procesos de corte térmico [6]. La máquina empleada fue una Flow Mach 3 modelo 1313b, con cabezal de corte con compensación de conicidad y bomba intensificadora de 60.000 psi.



Figura 2: Equipo de corte por chorro de agua

Por cada material se elaboraron 16 probetas, de las cuales se grabaron 8 por láser. El grabado se realizó en solamente una de las caras de la probeta, con un patrón circular de 2.5 mm de diámetro, tal como lo indica la Norma ASTM E2218. Para el proceso de marcado se empleó un láser de fibra de Yterbio de 20 W, con cabezal de escaneo galvanométrico, con una fuente IPG modelo YLPN-1-100-20-M. Los parámetros de grabado se encuentran disponibles en la Tabla 1:

Tabla 1: Parámetros de configuración del Laser en el grabado

Parámetro	Valor
Foco [mm]	5
Número de pasadas	1
Potencia [%]	75
Desplazamiento del haz [mm/s]	20
Frecuencia del pulso [kHz]	200

Los parámetros de grabado fueron seleccionados de forma cualitativa teniendo en cuenta aquellos que presentaron un grabado legible, sin producir deformaciones apreciables en la probeta (algunas condiciones empleadas para probar el procesamiento, debido a un exceso de temperatura, generaron una curvatura apreciable en las muestras, lo cual fue un criterio para descartarlas).

Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina de tracción universal con 250 kN de capacidad, marca Instron y modelo 5985. Se empleó un extensómetro con 50 mm de longitud inicial, marca Instron 2630-112, con la finalidad de obtener en cada ensayo la tensión de fluencia, la tensión última, la tensión de fractura, la deformación bajo carga última y la deformación bajo carga de fractura. La velocidad de aplicación de la carga fue fijada en 5 mm/min (según Norma IRAM IAS U500-45), y los ensayos se realizaron en una cabina climatizada, con condiciones de temperatura y humedad controladas (temperatura = 22°C y humedad = 40%). Los análisis fractográficos se hicieron con un Microscopio Electrónico de Barrido Philips SEM 505.

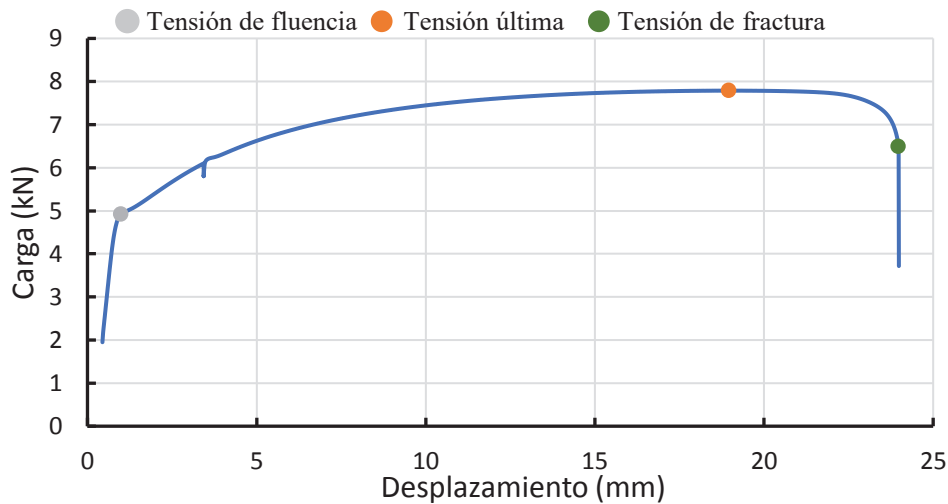


Figura 3: Ejemplo de diagrama obtenido en ensayo de tracción JFE CA 590

Los 32 ensayos de tracción para evaluar la influencia del marcado láser en los aceros JFE - CA 590 y JFE - CA 1180 mostraron fracturas dentro de la zona calibrada.



Figura 4: Imagen de las fracturas durante ensayo de tracción JFE - CA 590 marcada y sin marcar



Figura 5: Imagen de las fracturas durante ensayo de tracción JFE - CA 1180 marcada y sin marcar

Primeramente, se comparó el comportamiento de las probetas mediante gráficas de cajas y barras entre las probetas marcadas y sin marcar, ver Figura 6 y 7. A modo de ejemplo, a continuación, se muestran los resultados sobre la tensión de fluencia y la tensión última del material para los aceros JFE - CA 590 y JFE - CA 1180 (ver figuras 6 y 7).

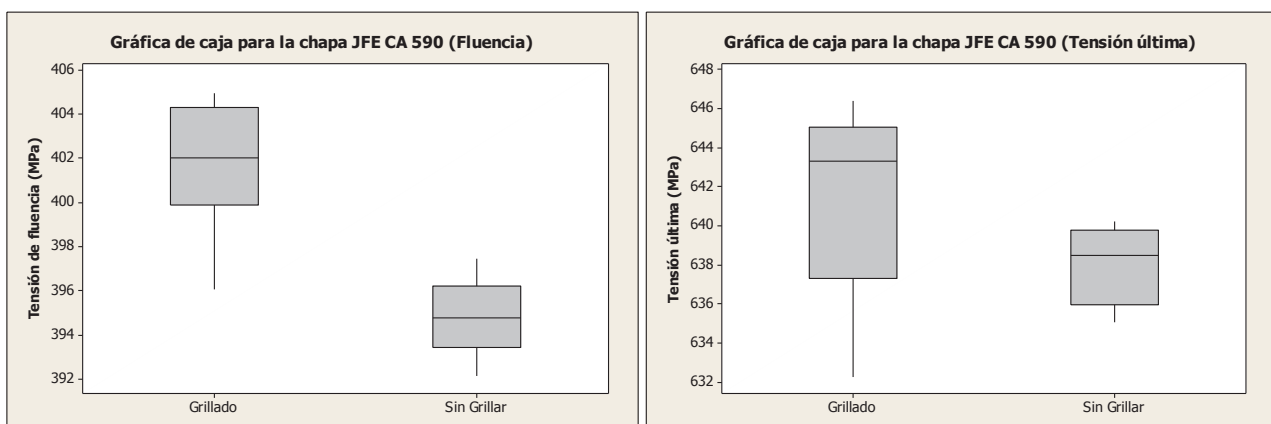


Figura 6: Influencia del marcado sobre el material JFE - CA 590

De la totalidad de respuestas analizadas, sobre el acero JFE - CA 590, sólo se observaron diferencias en la tensión de fluencia, sobre la respuesta de la tensión última no mostró diferencias significativas.

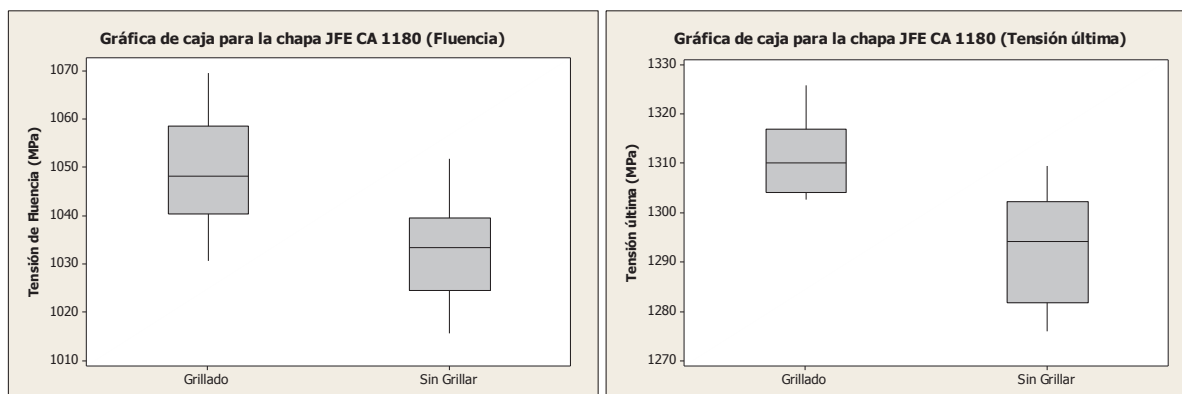


Figura 7: Influencia del marcado sobre el material JFE - CA 1180

En el acero JFE – CA 1180 se aprecian diferencias para la tensión de fluencia y la tensión última entre las probetas que fueron marcadas y las que no. Para analizar las cinco respuestas se realizó un ANOVA balanceado, con un nivel de confianza del 95% y se obtuvieron los valores del estadístico p. Si el estadístico resulta mayor a 0.05, el marcado láser no producía ninguna diferencia significativa, en cambio sí p es menor a 0.05 el marcado influía de forma significativa sobre la respuesta mecánica analizada en el ensayo de tracción.

Tabla 2: Estadístico p para las respuestas requeridas

	JFE - CA 590	JFE - CA 1180
Parámetro	Valor p	Valor p
Tensión de fluencia	0.000	0.015
Tensión última	0.078	0.002
Tensión de fractura	0.497	0.008
Alargamiento % a tensión última	0.090	0.456
Alargamiento % a tensión de fractura	0.231	0.189

De acuerdo con los resultados obtenidos en las gráficas de cajas y barras, además de los obtenidos del ANOVA balanceado, el material que muestra las mayores diferencias entre las probetas marcadas y sin marcar es el acero JFE - CA 1180. Por tal motivo enfocaremos el trabajo en este acero.

2.2 DOE - influencia sobre el acero JFE - CA 1180 de tres factores de proceso

A partir de los resultados obtenidos se realizó un DOE sobre el material de mayor sensibilidad al grabado láser, es decir, el acero JFE CA 1180. Con el objetivo de establecer la influencia puntual de las variables de proceso de grabado sobre las propiedades mecánicas del material.

Tabla 3: Propiedades mecánicas - Acero JFE CA 1180

JFE CA 1180	Valor
Tensión de fluencia [N/mm ²]	825
Tensión última [N/mm ²]	1180
Alargamiento a la rotura [%]	7
Desplazamiento del haz [mm/s]	20
Espesor [mm]	1.2

Tabla 4: Elementos de aleación - Acero JFE CA 1180.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Fe
Wt%	0.12	0.50	2.0	0.01	0.003	Balance

De las pruebas exploratorias se tomaron cualitativamente los siguientes parámetros: foco, cantidad de pasadas y potencia. Para el diseño de experimentos los niveles evaluados para cada factor se exponen en la tabla siguiente:

Tabla 5: Factores, niveles y respuestas para el DOE sobre el acero JFE - CA 1180

Factor	Nivel
Foco [mm]	1.2 – 3.7
Cantidad de pasadas	5 – 20
Potencia [%]	40 – 90
Parámetros mecánicos estudiados	
Tensión de fluencia	
Tensión última	
Tensión de fractura	
Alargamiento a la tensión última	
Alargamiento a la tensión fractura	

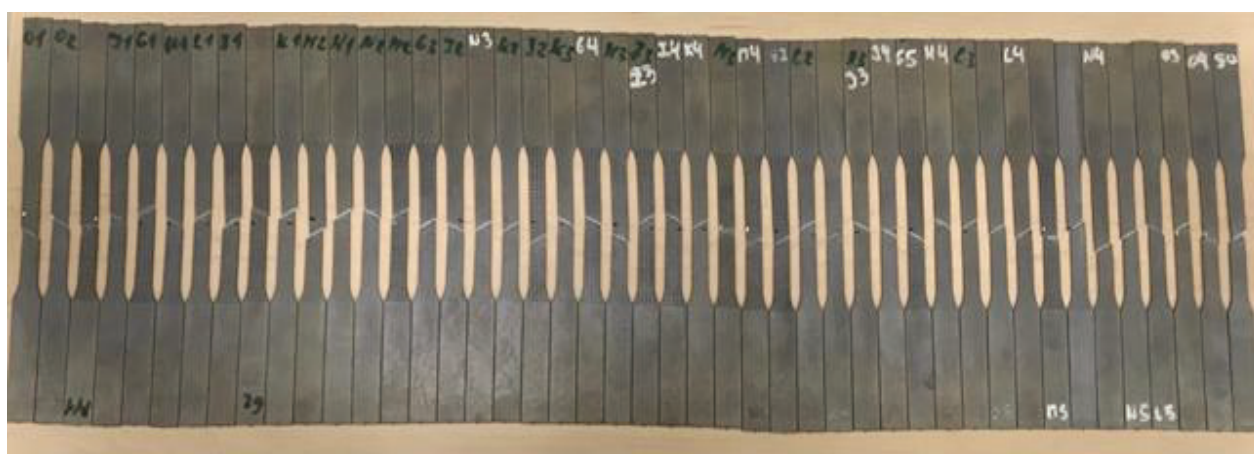
Para la realización de la totalidad de las combinaciones comprendidas por los tres factores “*f*” con sus dos niveles “*L*” fue necesario efectuar un total de 8 ensayos de tracción para obtener un diseño factorial completo, definido como el número de niveles elevado al número de factores $L^f = 2^3$.

A su vez, para cada combinación se realizaron 5 repeticiones con el objetivo de evaluar la repetibilidad del ensayo. Las 8 combinaciones con sus 5 repeticiones requirieron la fabricación de 40 probetas, y adicionalmente se ensayaron 5 probetas sin marcar como referencia a la afectación mecánica del grabado láser. Con lo cual, se fabricaron un total de 45 probetas de tracción.

Tabla 6: Denominación asignada a las probetas con sus diferentes marcados

Parámetros	Probetas								
	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Foco [mm]	3.7	3.7	3.7	3.7	1.2	1.2	1.2	1.2	-
Nº de pasadas	5	20	20	5	5	20	20	20	0
Potencia [%]	90	40	90	40	90	40	90	40	-

A cada una de las combinaciones de parámetros de grabado se les asignó una letra, de la G a la N, y a las probetas de referencia que no poseen marcado alguno se les asignó la letra O. Las 45 probetas ensayadas de acero JFE - CA 1180 sufrieron fracturas dentro de la zona calibrada y cercana a la zona central, tal como puede observarse en la Figura 8.

**Figura 8:** 45 probetas ensayadas de acero JFE - CA 1180 como resultado del DOE

La influencia de la combinación de los diferentes parámetros de marcado, compuesta por los 8 grupos de probetas (del grupo G al N), en las cinco respuestas obtenidas del ensayo de tracción, se muestran en los siguientes gráficos de cajas y barras (Figuras 9, 10 y 11).

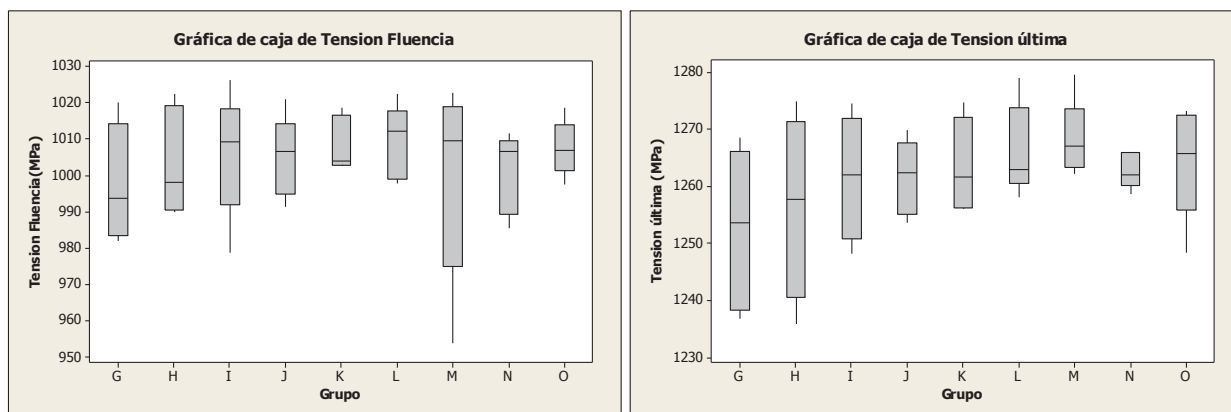


Figura 9: Gráfica de cajas para la tensión de fluencia y la tensión última

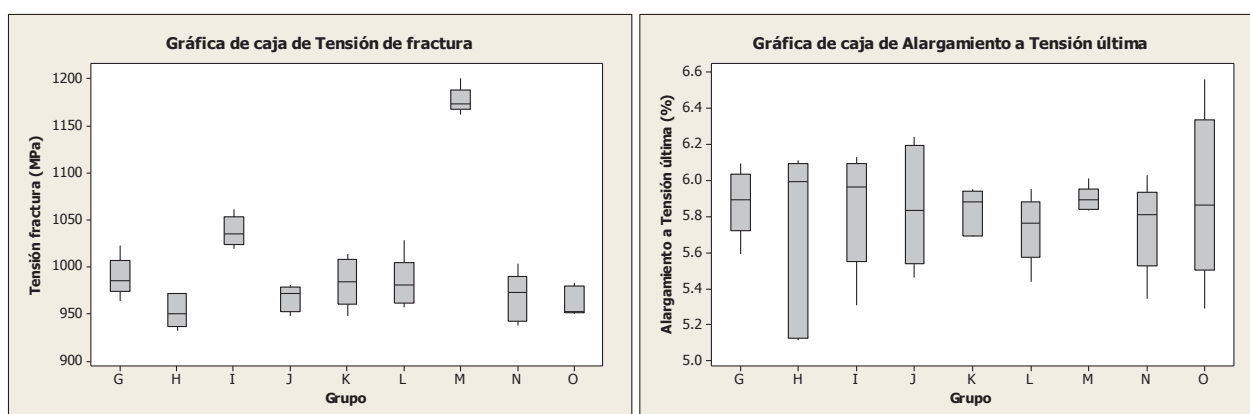


Figura 10: Gráfica de cajas para la tensión de fractura y el alargamiento a tensión última

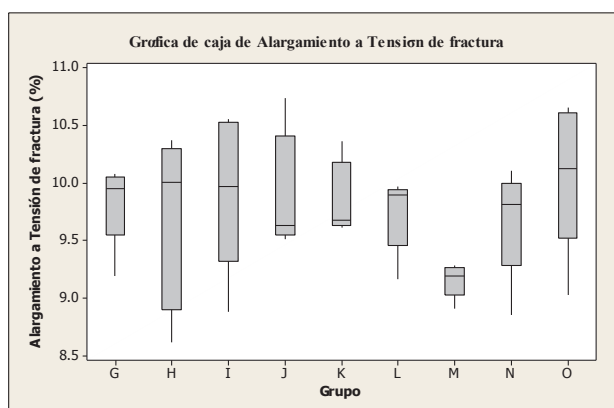


Figura 11: Gráfica de cajas para el alargamiento a tensión de fractura

De la observación de los diagramas de caja surge que, la mayor diferencia apreciable se da en la condición de marcado M y específicamente en la tensión de fractura. La condición M fue la de mayor potencia, mayor número de pasadas y en foco (foco = 1.2 mm sobre la superficie de apoyo de la probeta generando la máxima concentración de energía).

Tabla 7: Estadístico p para las respuestas analizadas

Variable de respuesta	Estadístico p
Tensión de fluencia	0.927
Tensión última	0.338
Tensión de fractura	0.000
Alargamiento a tensión última	0.947
Alargamiento a tensión de fractura	0.257

Desde el punto de vista estadístico, segmentando los resultados como grupos de probetas con diferentes marcados, tal y como se observó en las gráficas de cajas y barras, solo se han encontrado diferencias significativas entre las probetas marcadas sobre la tensión de fractura del material.

En relación con la influencia específica de los 3 parámetros de grabado en sus dos niveles, los resultados se muestran a continuación:

Tabla 8: Influencia de los factores sobre las respuestas analizadas

Variable de respuesta	Valores de p vs Condición de grabado láser		
	Potencia	Foco	Pasadas
Tensión de fluencia	0.728	0.763	0.762
Tensión última	0.916	0.025	0.356
Tensión de fractura	0.000	0.011	0.000
Alargamiento a tensión última	0.213	0.830	0.664
Alargamiento a tensión de fractura	0.721	0.151	0.228

Los resultados indican que todos los parámetros de grabado influyen de forma significativa sobre la tensión de fractura de las probetas. A su vez solamente el foco también lo hace sobre la tensión última.

Segregando los datos por foco, se obtuvo mediante análisis de regresión del modelo descrito en la ecuación (1), las superficies de respuesta mostradas en la Figura 12. Estas superficies brindan una visualización de la incidencia de las condiciones de grabado sobre la tensión de fractura σ_{frac} , siendo P la potencia porcentual, y S el número de pasadas del proceso de grabado.

$$\sigma_{frac} = a + b.P + c.S + d(S.P) \quad (1)$$

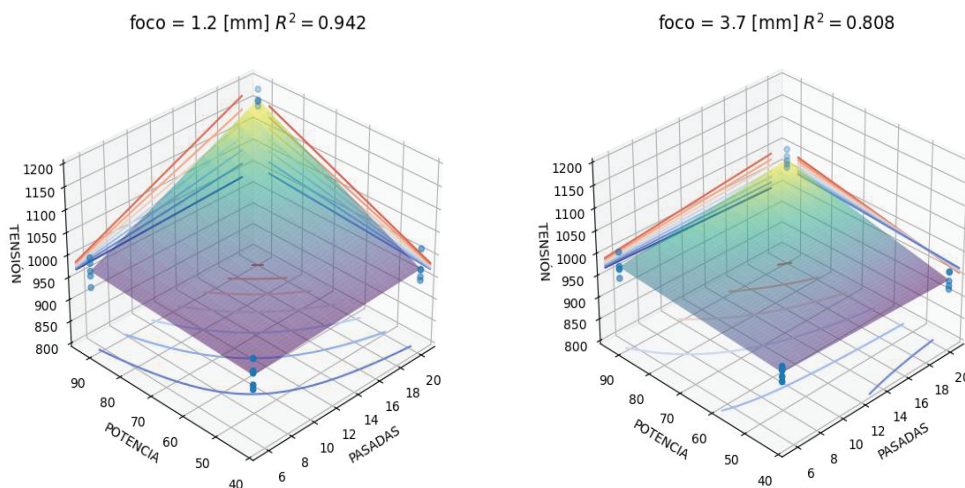


Figura 12: Superficies de respuesta segregadas por foco

2.3 Análisis fractográfico, metalográfico y de dureza de las zonas afectadas por el marcado

Los análisis fractográficos sobre la combinación de factores que produjo la mayor afectación (M), se realizaron utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido Philips SEM 505.

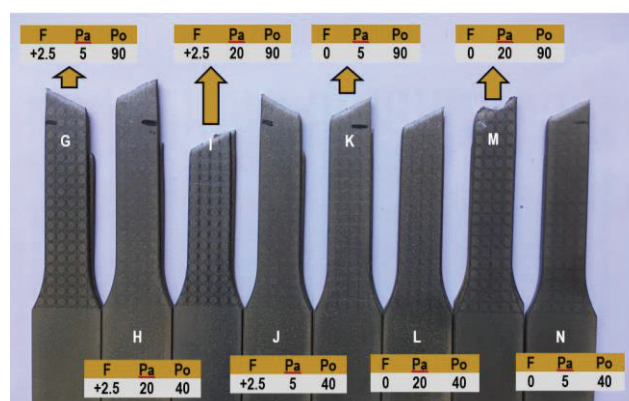


Figura 13: Los ocho grupos de probetas marcadas y ensayadas

En la Figura 13 se observa como el marcado M produjo una superficie de fractura diferente al resto de los grupos. Concretamente la fractura sucedió sobre las líneas del marcado (ver Figura 14), explicando así la diferencia de comportamiento observada en el gráfico de cajas de la tensión de fractura.

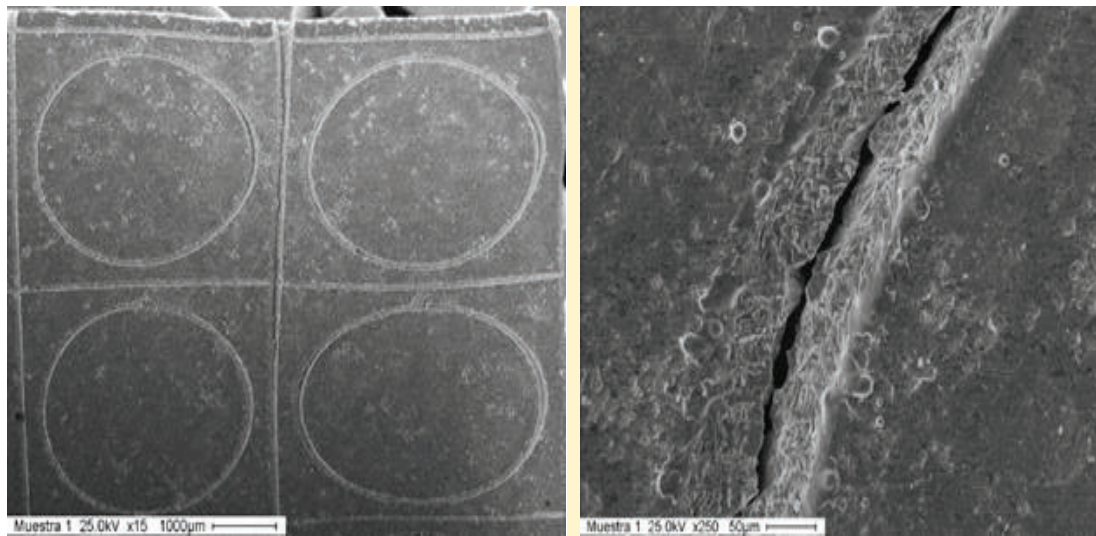


Figura 14: Fractura de la probeta con la combinación de variables de marcado grupo M

Para profundizar sobre la afectación térmica y la geometría de grabado producidas sobre por las distintas condiciones de marcado, se realizaron análisis metalográficos, incluyendo en primer lugar las caras marcadas. Las imágenes se obtuvieron a partir de un microscopio metalográfico, modelo: MicroStar IMS-300 Inverted Metallurgical Microscope, siendo capturadas por una Cámara metalográfica Toupcam, modelo UCMOS05100KPA. Los ensayos metalográficos fueron realizados en el laboratorio de Metalurgia de la Universidad Nacional de Hurlingham.

En la Figura 15 se observan las superficies incluidas, pulidas y atacadas con Nital al 4% de una muestra correspondiente al grupo K y otra del grupo M.

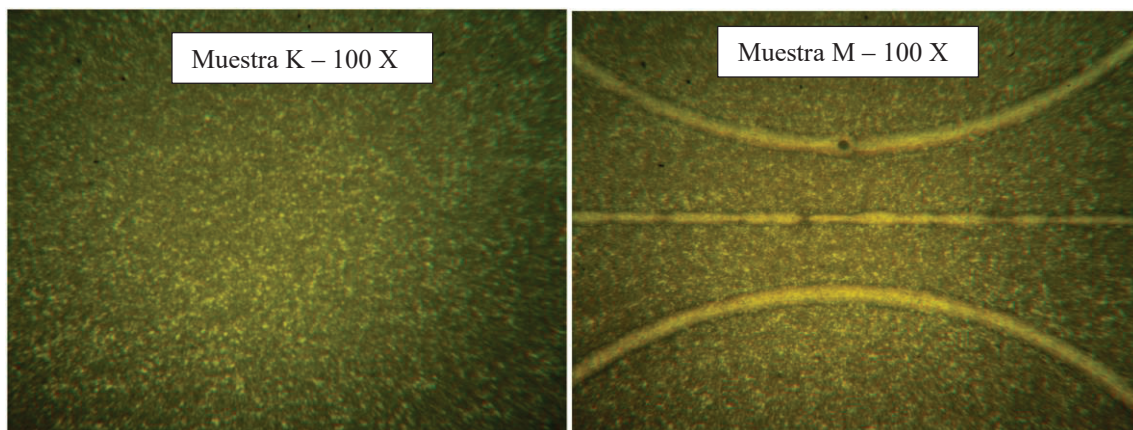


Figura 15: Metalografía sobre la superficie grabada – Probetas K y M

De las observaciones de este primer grupo de inclusiones metalográficas se desprende que todas presentaron una estructura ferrítico-martensítica compacta correspondiente con un acero Dual-Phase. Por su parte, solo la muestra M permitió observar la afectación por el proceso de grabado.

La afectación ocurrida en este último grupo (M) se efectuó la inclusión de una sección transversal, con el fin de evidenciar tanto la afectación térmica producida, como la geometría del grabado. Asimismo, se realizaron mediciones de microdureza en el espesor de la probeta. La microdureza se realizó con un microdurómetro marca Digimess, modelo MHVD-1000 AP.

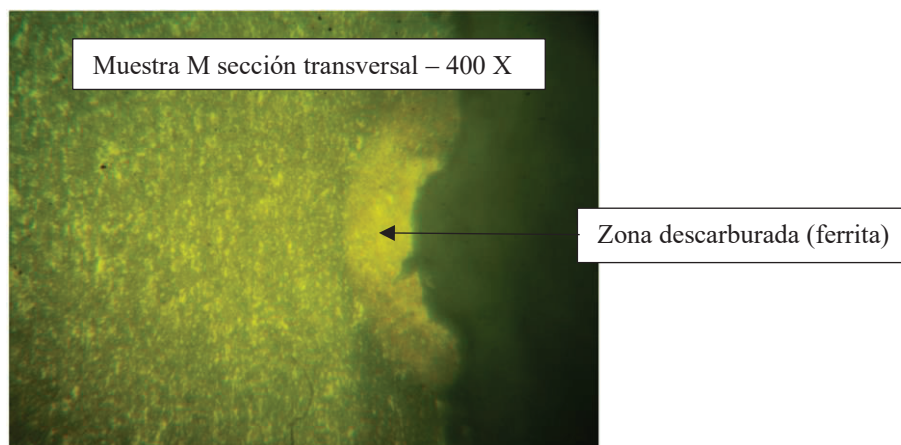


Figura 16: Sección transversal del marcado – Probeta M

En la imagen anterior se puede observar el aporte térmico producido por el grabado láser, mostrando una zona descarburada, así como un tamaño del grabado de unos 80 μm de ancho por 54 μm de profundidad.

Por último, se realizaron durezas Vickers con una carga de 500 g sobre la zona descarburada y en zonas alejadas de la afectación térmica, resultado los valores de la tabla siguiente:

Tabla 9: Microdureza sobre la zona afectada por el láser

Zona	Dureza HV promedio	Desviación estándar
Descarburada	415.6	14.0
Material sin afectar	466.0	34.1

Los promedios de dureza obtenidos para ambas zonas muestran que, la zona afectada por el calor del grabado tiene una dureza menor en un 10.8 % al material original. Estos valores son compatibles con la visualización de ferrita en la zona afectada por el Láser.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo describe un procedimiento que tiene por finalidad evaluar la posibilidad de aplicar el marcado laser sobre probetas planas de tracción obtenidas a partir de aceros de alta resistencia. Asimismo, se buscó establecer la influencia de los parámetros del láser sobre las propiedades mecánicas estudiadas. Se pueden enumerar los siguientes hallazgos:

Durante los ensayos realizados no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas sobre los alargamientos porcentuales tanto para la tensión última como para la tensión de fractura, derivados del proceso de marcado. Sin embargo, el marcado láser si ha producido una influencia sobre las tensiones, aumentándolas ligeramente (fluencia, ultima y de fractura). Este efecto podría ser atenuado reduciendo la densidad del marcado, esto es dejando sólo la matriz circular y eliminando la cuadrangular.

El proceso de marcado láser, aplicado con las condiciones adecuadas, es capaz de imprimir una grilla legible y sin afectar las propiedades mecánicas de los aceros estudiados. Sin embargo, existe una relación de compromiso entre la legibilidad del patrón de marcado y la mínima afectación.

Mientras que el aumento de la potencia y la cantidad de pasadas incrementan la resistencia, al elevar el foco (ampliación del *spot* del láser) se genera una disminución de la resistencia. A su vez la visualización de las interacciones mediante superficies facilita la interpretación de esta conclusión.

Por otra parte, en las condiciones de marcado de las probetas designadas como M (en foco, mayor cantidad de pasadas y de potencia), la fractura de la probeta ocurrió siguiendo las líneas del marcado. Este efecto se corresponde con lo visualizado en los ensayos metalográficos de la sección transversal

donde puede observarse una entalla profunda con ferrita en su perímetro.

Finalmente, de todos los estudios llevados a cabo se desprende que, las condiciones operativas del láser, utilizadas para las probetas grilladas designadas como J y H, y en ese orden, produjeron la menor afectación sobre las propiedades mecánicas, con grillas visibles en ambos casos, tanto a simple vista como empleando un microscopio óptico.

4.1 Trabajos a futuro:

Ampliar la batería de ensayos a condiciones intermedias para validar las regresiones utilizadas.

Estudiar el caso de aplicar una capa de pintura sobre la cual realizar el marcado y si la misma protege a la probeta de la afectación o permite mayor contraste en las condiciones más favorables.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los Sres. Facundo Rochi y Juan Manuel Gómez por los aportes realizados al presente trabajo, que surgen del proyecto denominado “*Afectación térmica de un acero de alta resistencia grillado por láser en distintas condiciones de proceso*”, proyecto de fin de carrera de la tecnicatura en Metalurgia de la Universidad Nacional de Hurlingham.

Asimismo, agradecer a las autoridades de la citada institución, Ings. Antonio Bencardino y Diego Migliorino, por haber facilitado el desarrollo del mencionado proyecto.

References

- [1] Altan T, Tekkaya E, Sheet Metal Forming. Processes and applications. ASM International, 2012. ISBN-13: 978-1-61503-844-2
- [2] Bong H, Barlat F, Lee M, Ahn D, The forming limit diagram of ferritic stainless-steel sheets: Experiments and modeling. International Journal of Mechanical Sciences 64 (2012) 1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.08.009>
- [3] Schwindt C, Stout M, Iurman L, Signorelli J, Forming Limit Curve Determination of a DP-780 Steel Sheet. Procedia Materials Science 8 (2015) 978 – 985. doi: 10.1016/j.mspro.2015.04.159.
- [4] Antúnez N, Martynenko V, Abate G, Perez D, Chiapparoli W, Martínez Krahmer D, Simulación computacional de un ensayo Erichsen aplicado a una chapa de acero DC-06. Revista Materia V23 N°2 (2018), Rio de Janeiro, Brasil. DOI: 10.1590/S1517-707620180002.0362.
- [5] Martínez Krahmer D, Simoncelli A, Antúnez N, Martynenko V, Abate G, Perez D, Lopez de Lacalle N, Influencia del Grillado láser sobre el comportamiento de probetas de tracción de un acero de alta resistencia. Revista DYNA (2020), BILBAO, España.
- [6] Martínez Krahmer D, Polvorosa R, López de Lacalle L. N, Alonso-Pinillos U, Abate G, Riu F, Alternatives for Specimen Manufacturing in Tensile Testing of Steel Plates. Experimental Techniques, July 2016. DOI: 10.1007/s40799-016-0134-5.