

## FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ACEROS DUAL PHASE LAMINADOS EN CALIENTE A ESCALA DE LABORATORIO

A. Artigas<sup>1</sup>, R. Colás<sup>2</sup>, S. Toledo<sup>1</sup>, F. Barra<sup>1</sup>, F. Pizarro<sup>1</sup>, L. Carvajal<sup>1</sup>, A. Monsalve<sup>1</sup>

(1) Dpto. Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, USACH

(2) Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

E-mail (autor de contacto): alfredo.artigas@usach.cl

### RESUMEN

*Para obtener un acero Dual Phase laminado en caliente, se utilizó un acero al C-Mn-Si AWS 70S-6 producido por la Compañía Siderúrgica Huachipato (CSH), el cual se usa para fabricar electrodos para la industria de la soldadura. Se evaluaron las propiedades mecánicas y microestructurales de los aceros laminados en caliente en el laboratorio de la USACH.*

*Se tomaron muestras del acero y mediante un proceso de laminación en caliente y bobinado se obtuvo acero con microestructura compuesta por martensita en una matriz ferrítica. La caracterización microestructural de las muestras obtenidas se realizó mediante microscopía óptica. Se complementó la información microestructural con la realización del ensayo de anisotropía según la norma ASTM E – 517 para la determinación de los índices de anisotropía normal y plano. Paralelamente, se realizó una caracterización mecánica del material mediante ensayos de tracción según el estándar ASTM E – 8M.*

*Adicionalmente, se tomaron tres muestras del acero para someterlas a distintos tratamientos térmicos con el objetivo de obtener una estructura dual phase en la primera probeta; ferrita, bainita y perlita en la segunda, y perlita en una matriz ferrítica en la tercera. Posteriormente se procedió a soldar las probetas con un proceso de soldadura MIG. La caracterización microestructural de las muestras obtenidas se realizó mediante microscopía óptica. Paralelamente, se realizó una caracterización mecánica del material mediante ensayos de tracción según el estándar ASTM E – 8M.*

*Finalmente se determinó que las condiciones óptimas para la obtención de la microestructura Dual Phase a partir de un acero al C-Mn-Si disponible en el mercado están dadas por una temperatura de término de laminación cercana a AR3 sumada a una fuerte reducción final; a continuación se debe realizar un temple en el rango óptimo de temperaturas de bobinado (500 – 600 °C) y enfriar la placa al aire.*

**Tópico 2:** Materiales Metálicos.

**Palabras clave:** Acero, Dual Phase , Soldadura.

### INTRODUCCIÓN

Los aceros estructurales han experimentado una creciente mejora en sus propiedades como respuesta a las altas exigencias que el mercado requiere. Equilibrar la elevada calidad de los productos con la factibilidad de su fabricación es el desafío de la industria siderúrgica actual. Los materiales pertenecientes a la familia de los HSLA (High Strength Low Alloys) han sido ampliamente demandados en los últimos años debido al creciente interés en reducir el peso de las estructuras sin comprometer su resistencia mecánica; en esta categoría se encuentran los aceros

Dual Phase (DP), cuya microestructura, consistente en ferrita y martensita y eventualmente bainita, les confiere una alta razón UTS/Fluencia. [1-2].

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El proceso experimental de fabricación de aceros Dual Phase, se desarrolló en el laboratorio de fundición del Departamento de Metalurgia de la Universidad de Santiago de Chile (USACH), con el objeto de obtener las características mecánicas y microestructurales de los aceros Dual Phase. Para lograr esto, se consideró la reproducción a nivel de laboratorio de las etapas claves de la industria, laminado en caliente y bobinado, estudiando particularmente la correlación entre las variables del proceso y las propiedades mecánicas y microestructurales obtenidas, en especial aquellas propiedades relacionadas directamente con obtener una baja fluencia, una alta resistencia a la fractura y una fluencia homogénea. [3].

El trabajo en laboratorio tiene la ventaja de una mayor versatilidad en el manejo de las variables industriales con un bajo costo asociado. Su desventaja radica en que la reproducción a nivel de laboratorio no siempre es extrapolable a nivel industrial. Para superar dicha desventaja se debe realizar una homologación rigurosa entre las pruebas de laboratorio y aquellas operaciones industriales que se desea simular. Para esto, se simuló la laminación en caliente en el laboratorio de un acero de composición AWS 70S-6 proveniente de la Cía. Siderúrgica Huachipato y se analizaron las propiedades mecánicas obtenidas. Posteriormente, se realizó una investigación exploratoria con el fin de evaluar su soldabilidad.

En el presente trabajo se usó un acero AWS 70S-6, utilizado para soldadura MIG-MAG, con una composición química dada en la tabla 1. Se optó por trabajar con esta composición, ya que está dentro del rango para fabricar aceros Dual Phase.

Tabla 1 Composición química Típica del acero AWS 70S-6

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Fe
% en peso	0,09	1,56	0,91	0,02	0,02	Balance

Para reproducir a escala de laboratorio el proceso de laminación en caliente, se obtuvieron por corte y mecanizado, a partir de un trozo de palanquilla fabricada en CSH, lingotes de 16 mm de espesor, 160 mm de largo y 65 mm de ancho, los cuales fueron laminados posteriormente en el laboratorio. La figura 1 muestra la secuencia experimental completa utilizada en la reproducción.

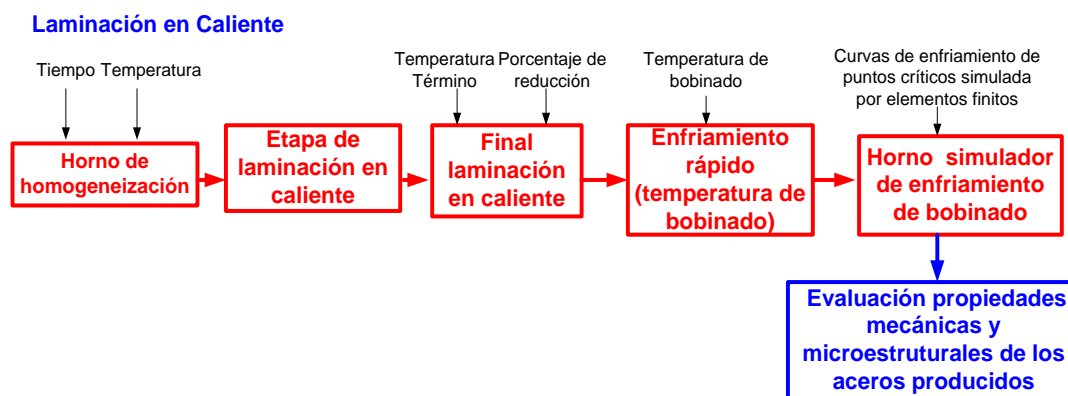


Figura 1. Procedimiento utilizado en la simulación [2].

Los lingotes fueron homogenizados por 30 minutos a 1250 °C en un horno de resistencia marca Lindberg; luego fueron retirados y laminados en caliente en 4 pasos sucesivos en un laminador marca Joliot (fig. 2). El procedimiento de laminación fue realizado en forma continua, esto es, sin volver los lingotes al horno entre pasos, pero monitoreando que la temperatura no fuese inferior a la  $A_3$ , mediante una termocupla introducida en los lingotes por medio de una perforación antes realizada, de manera de medir su temperatura interna a cada momento; la termocupla fue conectada a un computador por medio de una interfaz

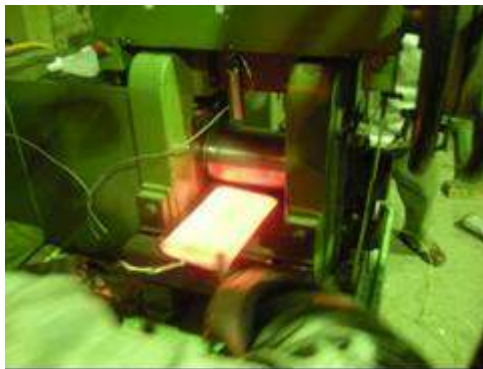


Figura 2 Laminador utilizado en la experiencia, se observa la plancha con la termocupla en su interior mientras es sometida a laminación.

Una vez finalizada la etapa de laminación, las planchas obtenidas se enfriaron bruscamente en un baño de sales que se encontraba a una temperatura que se fue variando entre 550 y 650° C, permitiendo simular experimentalmente la temperatura de bobinado industrial. El horno de sales utilizado poseía una tina lo suficientemente larga (600 mm) para poder depositar las planchas calientes. Luego, las planchas se introdujeron en el horno Lindberg que se encontraba a la misma temperatura que el horno de sales, para enfriarlas lentamente, simulando experimentalmente el enfriamiento al interior de la bobina. [5].

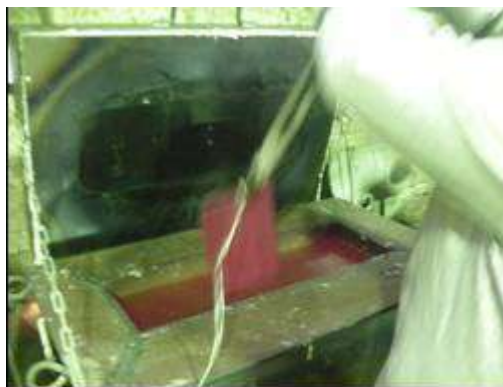


Figura 3 a) Horno de sales utilizado para la simulación de la temperatura de bobinado, b) Plancha con la termocupla en su interior siendo templada en el horno.

Una vez dominado el proceso de laminación en caliente en el laboratorio, se determinaron las variables óptimas para obtener aceros Dual Phase con las propiedades mecánicas y microestructurales deseadas. Para ello se probaron distintas temperaturas de término de laminación, porcentajes de reducción, temperaturas de bobinado y distintos procedimientos para simular lo que sucede a nivel industrial. Estos resultados se evaluaron por análisis metalográficos y ensayos mecánicos.

Para evaluar el procedimiento de soldadura de este acero, se utilizaron 3 planchas de 16 mm de espesor, las cuales fueron laminadas en caliente hasta obtener un espesor final de 2 mm; luego,

previo a la soldadura, se procedió a realizar tratamientos térmicos distintos a cada plancha, los que se describen a continuación:

**Tratamiento Térmico N°1:** La plancha fue introducida en un horno donde se elevó la temperatura de la plancha hasta 800°C, campo bifásico, por 10 minutos y luego se templó al agua. Este tratamiento térmico se efectuó con el objetivo de obtener una microestructura compuesta de ferrita y martensita.

**Tratamiento Térmico N°2:** La plancha fue introducida en un horno donde se elevó la temperatura de la plancha hasta 850°C por 10 minutos. Luego se realizó un enfriamiento al aire hasta temperatura ambiente. Este tratamiento térmico se efectuó con el objetivo de obtener una microestructura compuesta una estructura mixta de perlita, ferrita, bainita y martensita.

**Tratamiento Térmico N°3:** La plancha fue introducida en un horno donde se elevó la temperatura de la plancha hasta 900°C por 10 minutos. Luego se realizó un enfriamiento lento en el interior del horno. Este tratamiento térmico se efectuó con el objetivo de obtener una microestructura compuesta de ferrita y perlita.

Los tratamientos descritos anteriormente fueron realizados con el fin de observar el comportamiento de todas la microestructuras posibles del acero de composición AWS 70S-6 con respecto a la soldadura aplicada, dando principal énfasis a la ZAT (zona afectada térmicamente) y al cordón de soldadura. Las planchas fueron decapadas químicamente y soldadas a tope mediante MIG con un electrodo AWS 70-S6 de 0.8 mm con una corriente de 70 A.

## RESULTADOS Y DISCUSION

De las laminaciones realizadas, 9 fueron exitosas. De ellas se obtuvieron probetas y se realizaron ensayos de tracción según norma ASTM E-8[6] para la determinación del esfuerzo de fluencia, UTS e índice de endurecimiento  $n$ , y además, ensayos de anisotropía según norma ASTM E-517[7] para la determinación del índice de anisotropía normal ( $\bar{r}$ ). En la tabla 2 se presentan los resultados de tales ensayos ordenados de acuerdo a la temperatura de bobinado de las muestras (LC: laminado en Caliente; xxx/yyy: temperatura de término de laminación y temperatura de bobinado respectivamente). Se observa claramente una relación inversa entre la temperatura de bobinado y el índice de anisotropía, que, en principio, podría ser atribuible a la presencia de martensita.

Tabla2: Propiedades mecánicas para las laminaciones exitosas.

Probeta	Fluencia(MPa)	UTS(MPa)	Def.(%)	Razón (UTS/Fluencia)	Indice r
LC 806/550	389	514	21	1,32	1,16
LC 810/550	411	524	27	1,27	1,14
LC 813/550	421	531	23	1,26	1,09
LC 817/580	365	504	17	1,38	1,01
LC 825/580	392	490	25	1,25	0,98
LC 805/600	429	545	21	1,27	0,96
LC 830/600	442	538	23	1,22	0,95
LC 900/630	384	495	24	1,29	0,94
LC 880/630	434	537	27	1,24	0,80

## Resultados Metalográficos

Para efecto de presentación, en las figuras 4 y 5 se observan las metalografías de dos aceros fabricados de manera muy distinta, que son los LC 817/580 y LC 805/600.

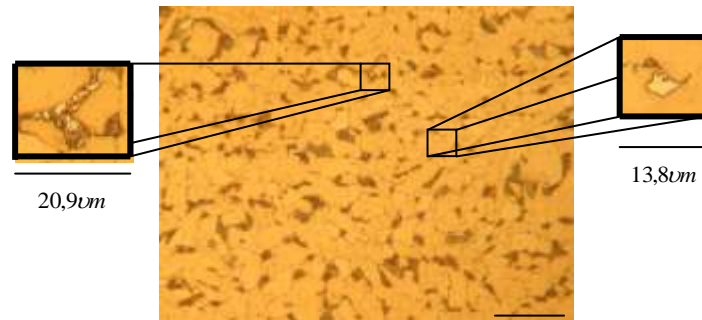


Figura 4: micrografía atacada con LePera [8].de la muestra LC 817/580.

En la figura 4 se aprecian trazas de martensita (aumentos realizados en la fotografía) rodeadas de bainita (o perlita fina) y algo de perlita en una matriz ferrítica.

En la figura 5 se puede apreciar una microestructura constituida por una matriz ferrítica y un crecimiento de una segunda fase en los bordes de grano ferríticos que pudiese corresponder a bainita o perlita fina. Ahora bien, se aprecia una fase de tonalidad más clara que el resto, lo cual podría corresponder a martensita. Para estos aceros, la  $M_s$  corresponde a  $443^{\circ}\text{C}$ [4], pero puede ser aún mayor en algunas zonas dentro del material, debido a la segregación que se produce producto del manganeso y de una incompleta homogenización de la pieza. Puesto que el tiempo de permanencia entre la temperatura de temple, en este caso  $600^{\circ}\text{C}$ , y la  $M_s$  era breve, puede ocurrir una transformación de austenita a martensita.

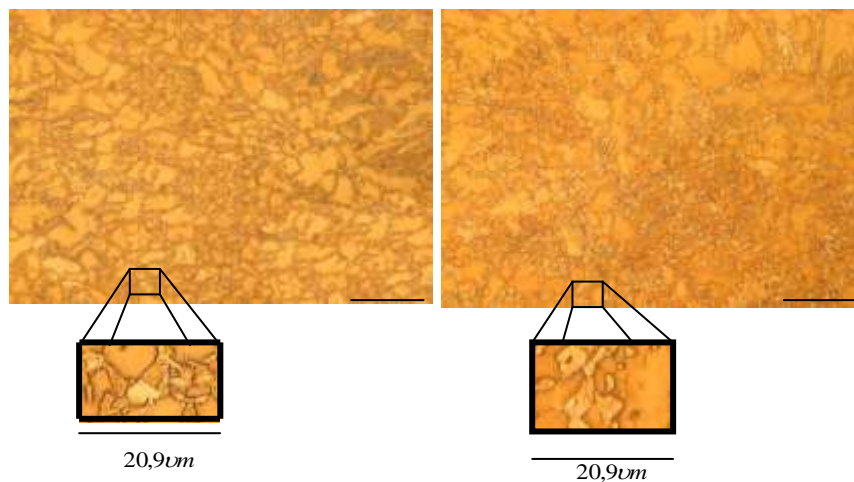


Figura 5: micrografías atacada con LePera de la muestra LC 805/600.

### Soldadura

En la figura 6 se muestran las microestructuras de las tres planchas tratadas térmicamente, donde puede observarse claramente la influencia de los tratamientos.

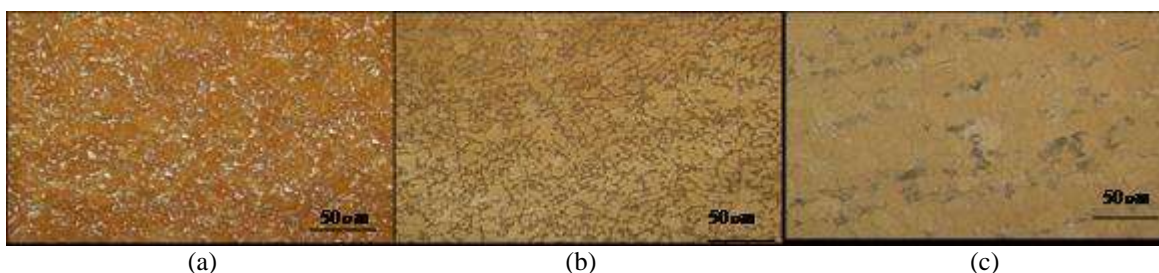


Figura 6: micrografías atacada con LePera (a) Tratamiento Térmico N°1 (acero dual phase) (b) Tratamiento Térmico N°2 (acero ferrítico, bainítico y martensítico) y (c) Tratamiento Térmico N°3 (acero ferrítico perlítico).

El ciclo térmico generado por el proceso de soldadura en las cercanías del cordón, modifica la microestructura original del metal base produciendo una zona afectada térmicamente (ZAT) cuya microestructura es en apariencia similar, tipo Dual Phase, en todas las planchas. Por su parte, y como era de esperarse, la microestructura del cordón de soldadura es idéntica en todas las planchas, también del tipo Dual Phase, pero con la característica de una estructura bruta de fusión. En la figura 7(a) se muestra la estructura del cordón de soldadura y en la figura 7(b), la estructura encontrada en la ZAT.

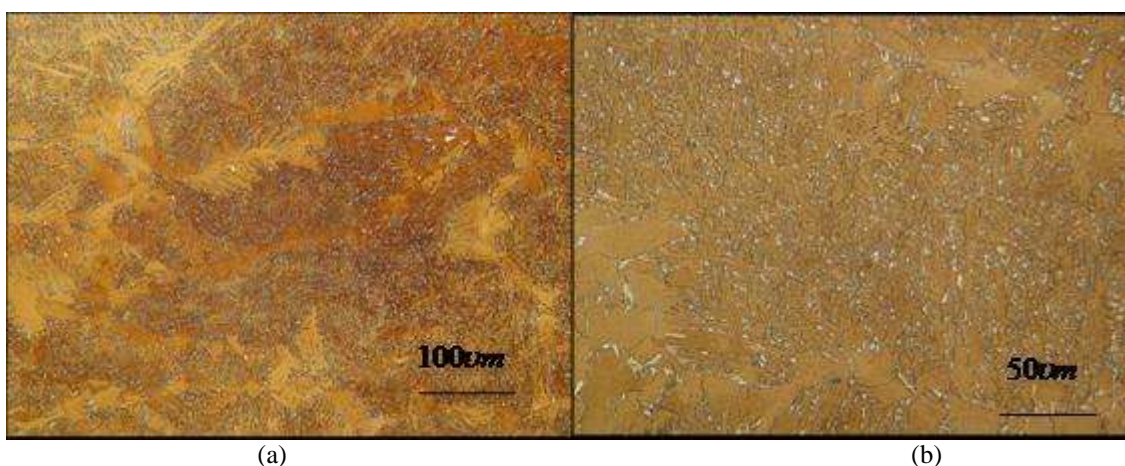


Figura 6: micrografías atacada con LePera (a) cordón de soldadura (b) zona afectada térmicamente.

La figura 7 muestra los perfiles de dureza desde el centro de cada cordón de soldadura hasta el metal base. La dureza de los tres cordones de soldadura (de 0 a 2 mm) es la misma, reflejo de la microestructura dual phase en todos los casos. La probeta del acero Dual Phase (soldadura 1) muestra una dureza casi constante a lo largo de la ZAT, lo que indica que el proceso de soldadura no afecta en forma importante las propiedades mecánicas del material base. Desde los 12,5 hasta los 8,5 mm se produce un revenido de la estructura del metal base; mientras que desde el borde del cordón hasta los 8,5 mm se obtiene una microestructura dual phase, lo que indica que esa zona alcanzó la temperatura de austenización. En las otras 2 probetas el comportamiento es similar, lo que explica el aumento de dureza en la región más cercana al cordón.

Además, se realizaron ensayos de tracción, ocurriendo el lugar de fractura, en todos los casos en el material base, y ensayos de doblado que también cumplieron con los estándares que se piden para evaluar los procesos de soldadura.

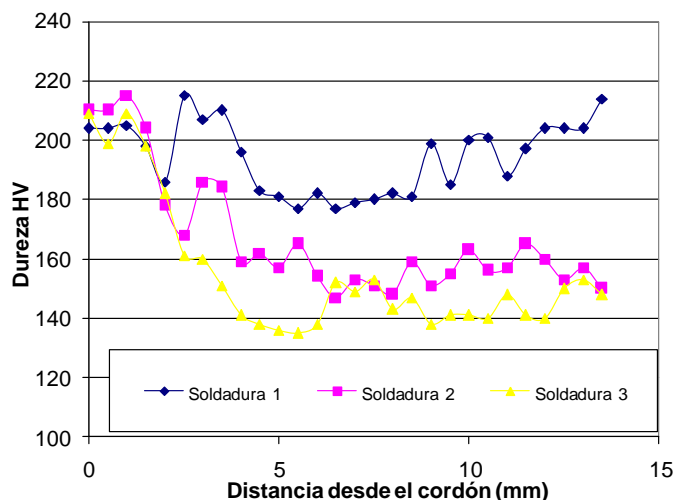


Figura 7: Perfil de dureza desde el centro del cordón hasta el metal base

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en esta investigación es posible concluir lo siguiente:

- Se logró obtener un proceso de laminación en caliente de un acero con una microestructura con presencia de martensita en una matriz ferrítica, a partir de un acero al C-Mn-Si comercialmente disponible.
- El análisis microestructural muestra que los aceros que fueron bobinados a una temperatura mayor a 600°C no presentan martensita en su microestructura.
- Al mantener la probeta a una temperatura de bobinado alta, la austenita se transforma en otras microestructuras (perlita, bainita) debido a que la probeta se mantiene a una elevada temperatura, entrando en las curvas de transformación de las fases ya antes citadas.
- En general las muestras que fueron bobinadas a temperaturas más bajas mostraron los mejores índices de anisotropía.
- La aplicación de un proceso de soldadura MIG, no afecta al acero Dual Phase debido a que se introduce la misma microestructura en el cordón de soldadura y en gran parte de la ZAT, manteniéndose las propiedades mecánicas del material base.

## AGRADECIMIENTOS:

Los autores desean agradecer la ayuda otorgada por CONICYT (Proyecto Fondecyt N°1108003), y a la DICYT (Universidad de Santiago de Chile) para la realización de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vargas J., “Obtención de aceros Dual Phase por laminación en caliente”, Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Metalúrgico, Universidad de Santiago de Chile. 2005.
- [2] S. Gunduz y col. “Effect of aging temperature and martensite by volume on strain aging behaviour of Dual phase steel”. Ironmaking and Steelmaking 2008 Vol.35, No 1, pag.63-68.
- [3] Pizarro, Toledo, Barra, Monsalve y Artigas “Fabricación a escala de laboratorio aceros dual phase de baja aleación laminados en caliente”, SAM Conamet, Buenos Aires Argentina 2009

- [4] H. K. D. H. Bhadeshia: Bainite, Steels Microstructure and Properties, Third edition, 2006
- [5] Artigas A., "Caracterización del acero grado 448", Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Metalúrgico, Universidad de Santiago de Chile. 1998.
- [6] ASTM E 8, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 2004
- [7] ASTM E 517, "Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal", 2004.
- [8] LePera F., "Improved Etching Technique to Emphasize Martensite and Bainite in High-strength Dual-Phase steel", Journal of Metal, Marzo 1980, pp.38-39.