

PRODUCCIÓN EN LABORATORIO DE ACERO DUAL PHASE LAMINADO EN CALIENTE, PARA LA FABRICACIÓN DE CILINDROS DE GAS LICUADO.

Alfredo Artigas^{*1}, Rafael Colás², Sebastian Toledo¹, Froilan Barra¹, Felipe Pizarro¹, Linton Carvajal¹, Alberto Monsalve¹

1: Dpto. Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Av. L. B. O'Higgins 3363, Estación Central, Santiago Chile.

2: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, 66451 san Nicolás, NL, México

* e-mail: alfredo.artigas@usach.cl



RESUMEN

En los laboratorios de la Universidad de Santiago de Chile se obtuvo un acero Dual Phase mediante un proceso de laminación en caliente y bobinado, a partir de 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. Su microestructura consiste en martensita en una matriz ferrítica. Esta información fue complementada con ensayos de tracción y anisotropía. Se determinó que las condiciones óptimas para la obtención de la microestructura Dual Phase, a partir del acero inicial, están dadas por una temperatura de término de laminación seguida por un temple hasta el rango óptimo de temperaturas de bobinado (550 – 600 °C) y posterior enfriamiento en el horno. 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. En todos los casos, las propiedades mecánicas de la zona afectada térmicamente no se diferenciaron grandemente de sus respectivos metales base. Se puede concluir que este acero dual phase cumple con los requerimientos mecánicos, de embutibilidad y de soldabilidad que se exigen en la norma Chilena NCh 214 de fabricación de cilindros de gas, y posee mayor resistencia que el acero A45 GL usado actualmente, por lo que se presenta como un material alternativo para la fabricación de cilindros más livianos.

Palabras Claves: Aceros Dual Phase, Soldadura

LABORATORY SCALE PRODUCTION OF HOT ROLLED DUAL PHASE STEEL FOR FABRICATION OF GAS CILYNDERS

ABSTRACT

Starting with a C-Mn-Si AWS 70S-6 steel produced by Huachipato Steel Company (CSH), usually employed to manufacture electrodes for the welding industry, a Dual Phase steel was obtained at the laboratory facilities of USACH by a process of hot rolling and coiling in order to get martensite in a ferritic matrix. The microstructural characterization was complemented by tensile and anisotropy tests. It was determined that the optimum conditions for obtaining the dual phase microstructure from the initial steel are given by an ending rolling temperature near the austenite to ferrite transformation line, followed by quenching to the optimum temperature range of coiling (550 - 600 °C) and furnace cooling. Additionally, three samples were subjected to different heat treatments in order to obtain a dual phase structure in the first specimen; ferrite, bainite and pearlite in the second specimen; and pearlite in a ferritic matrix in the third one. Finally, the specimens were MIG welded. The mechanical properties of all the heat affected zones were similar to those of their respective base metals, and hence the dual phase specimen shows the best results. It may be concluded that this dual phase steel meets the mechanical, drawability and weldability requirements established on the Chilean Standard for fabrication of gas cylinders, while having greater resistance than the A45 GL steel presently at use, which turns it into an alternative material for the fabrication of lighter cylinders.

Keywords: Dual Phase Steels, Welding

Recibido: 02-05-2011 ; Revisado: 03-07-2011

202

pISSN: 0255-6952 | eISSN: 2244-7113

Aceptado: 23-08-2011 ; Publicado: 06-09-2011

Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2012; 32 (2): 202-209

Trabajo presentado en el congreso "XI Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (XI IBEROMET)" celebrado en Viña del Mar (Chile) en Noviembre del 2010, y seleccionado para ser remitido a la RLMM para su arbitraje y publicación.

1. 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 entre el esfuerzo máximo a la tracción y el límite de fluencia (UTS/YS). [1-5].

La fabricación de aceros dual phase es ampliamente conocida y el grupo de investigación tiene una amplia experiencia [1,7-11]. En la figura 1 se aprecia el tratamiento termomecánico que se emplea en la obtención de este tipo de aceros.

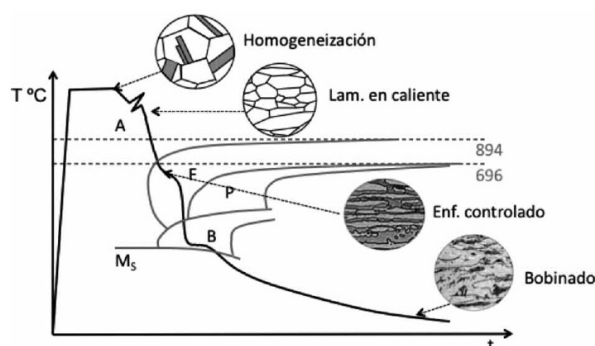


Figura 1. Tratamiento termomecánico del acero estudiado [1].

El objetivo principal de este trabajo es obtener a escala de laboratorio un acero dual phase laminado en caliente, a partir de un acero ya producido por la siderúrgica nacional, como es el acero para la fabricación de electrodos AWS 70S-6. La utilización planteada para este nuevo acero es la fabricación de cilindros para gas licuado, los cuales en la actualidad se fabrican con acero A 45GL [12] (Norma Chilena NCh 214), que debe cumplir ciertos requerimientos, como son calidad de embutición, resistencia mecánica y soldabilidad. En un trabajo anterior de los mismos autores [1], se ha discutido la influencia de las variables de proceso de fabricación

sobre su calidad de embutición, por lo que en este trabajo se dará mayor énfasis a la resistencia mecánica y su posibilidad de ser soldado correctamente. El encontrar las condiciones necesarias para fabricar un acero con mayores resistencias mecánicas, con calidades de embutición aceptables y de soldabilidad garantizada, permitiría disminuir el peso de los cilindros que se comercializan actualmente. Un punto importante es que estos cilindros para gas son soldados mediante soldadura al arco protegido con gas (GMAW o MIG-MAG), justamente con el electrodo AWS 70S-6; por lo tanto, es de mucha relevancia realizar pruebas exploratorias con respecto a la influencia que pueda tener la microestructura del material base sobre su soldabilidad.

2. PARTE 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. [7].

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.

En el presente trabajo, se simuló en el laboratorio la laminación en caliente de un acero de composición AWS 70S-6, utilizado para soldadura MIG-MAG, proveniente de la Cía. Siderúrgica Huachipato (CSH) y se analizaron las propiedades mecánicas obtenidas. Posteriormente, se realizó una investigación exploratoria con el fin de evaluar su soldabilidad. La tabla 1 muestra la composición

química del acero. 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
Porcentaje en peso	0,09	1,56	0,91	0,02	0,02	Bal.

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 2 muestra la secuencia experimental completa utilizada en la reproducción.

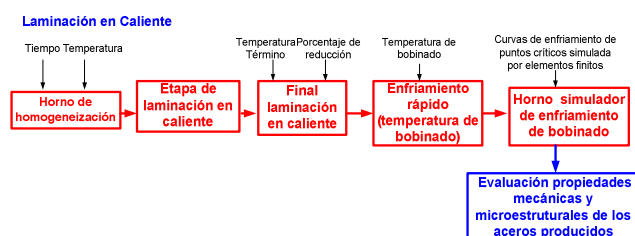


Figura 2. Procedimiento utilizado en la simulación [1-2].

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 (figura 3(a)). 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 (figura 3(b)), de manera de medir su temperatura interna a cada momento; la termocupla fue conectada a un computador por medio de una interfaz, registrando la evolución de la temperatura durante todo el proceso de 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. [8].

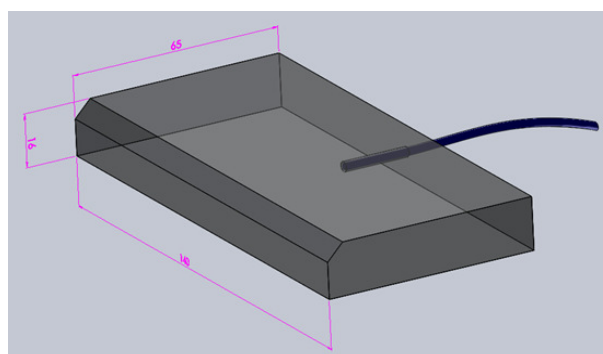
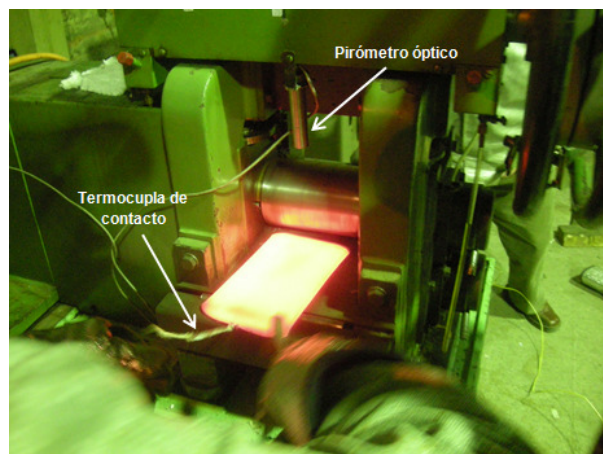


Figura 3. (Superior) Laminador utilizado en la experiencia, se observa la plancha con la termocupla en su interior mientras es sometida a laminación. (Inferior) esquema de la posición de la termocupla en el lingote (medidas en mm).

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 la soldabilidad de este acero en distintas condiciones, 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-MAG con un electrodo AWS 70-S6 de 0.8 mm con una corriente de 70 A y protección gaseosa de argón CO₂.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las laminaciones realizadas, 9 fueron exitosas. De ellas se obtuvieron probetas y se realizaron ensayos de tracción según norma ASTM E-8[13] para la determinación del esfuerzo de fluencia, UTS e índice de endurecimiento n , y además, ensayos de anisotropía según norma ASTM E-517[14] 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. Al comparar estos resultados con los requerimientos de la Norma Chilena para la construcción de cilindros de gas (NCh 214), que exige un nivel adecuado de embutibilidad, UTS mayor a 450MPa y soldabilidad garantizada, se observa que los aceros bobinados a temperaturas de 550°C presentan un índice de anisotropía aceptable y mayor UTS, por lo que son buenos candidatos para fabricar cilindros con menores espesores que los actuales de acero A45 GL, sólo faltando evaluar su respuesta a la soldadura.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros estudiados.

Probeta	Fluencia (MPa)	UTS (MPa)	Def. (%)	Razón (UTS/YS)	Índice 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

3.1 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.

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 Ms corresponde a

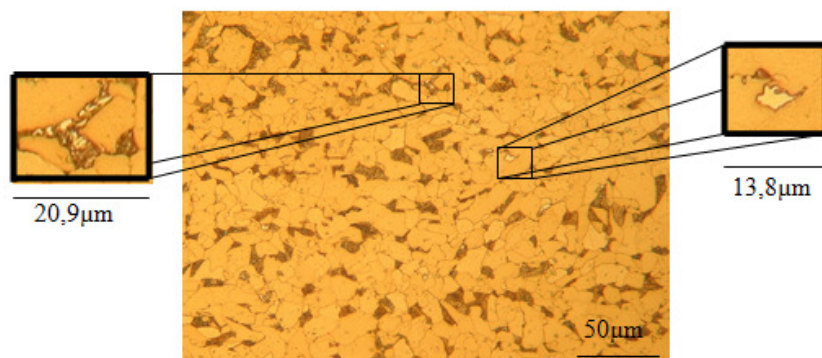


Figura 4. Micrografía atacada con LePera [16].de la muestra LC 817/580.

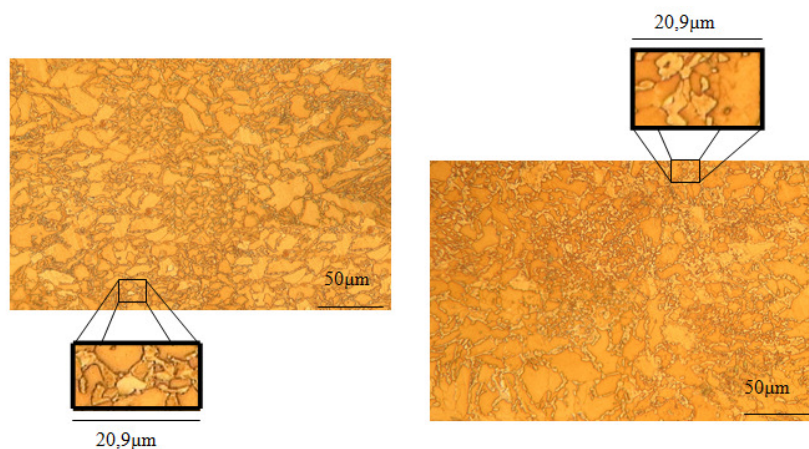


Figura 5. Micrografías atacada con LePera de la muestra LC 805/600.

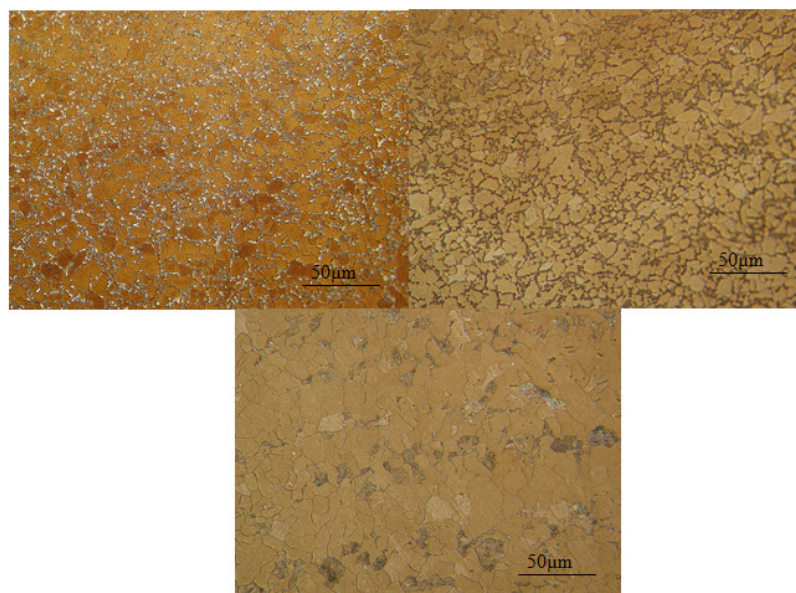


Figura 6. Micrografías atacada con LePera (a) Tratamiento Térmico N°1 (acero dual phase) (b) Tratamiento Térmico N°2 (acero ferrítico, bainítico y martensítico) y (c) Tratamiento Térmico N°3 (acero ferrítico perlítico).

443°C[15], 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°C, y la Ms era breve, puede ocurrir una transformación de austenita a martensita.

3.2 Soldadura

En la figura 6 se muestran las microestructuras de las tres planchas tratadas térmicamente, donde puede observarse las distintas estructuras. En (a), producto del tratamiento en la zona bifásica y el temple se produce una estructura ferrítico martensítica; en (b) producto del enfriamiento al aire se forma una estructura ferrítica bainítica, con pequeñas cantidades de martensita; en (c) producto de un enfriamiento lento se obtiene una estructura ferrítico perlítica.

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.

La figura 8 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 curva de dureza de la probeta del acero Dual Phase (soldadura 1) a lo largo de la ZAT indica que el proceso de soldadura no afecta en forma importante las propiedades mecánicas del material base. Los menores valores observados a partir de los 5 mm se deben aun revenido de la estructura del metal base; mientras que desde el borde del cordón hasta los 5 mm se obtiene una microestructura dual phase, lo que indica que esa zona alcanzó la temperatura de austenización. Esto último ocurre también en la región cercana al cordón de las otras dos probetas, mientras que al alejarse la dureza es prácticamente igual a la de los respectivos metales base.

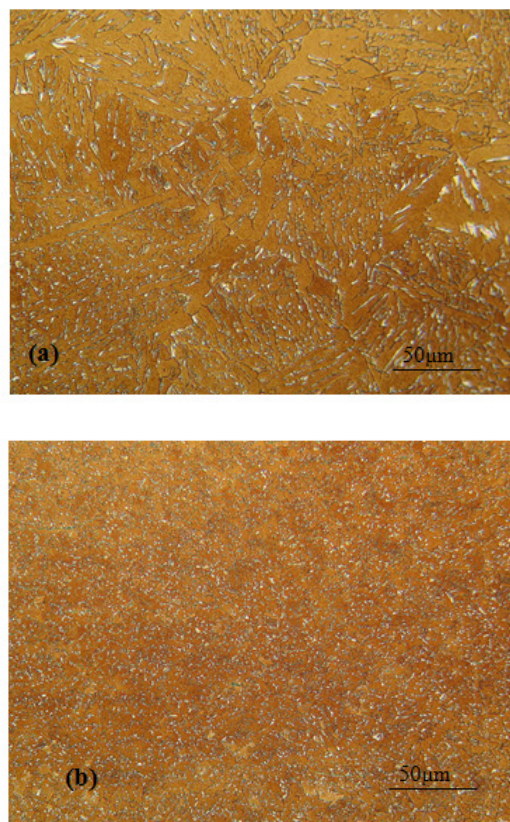


Figura 7. Micrografías atacada con LePera (a) cordón de soldadura (b) zona afectada térmicamente.

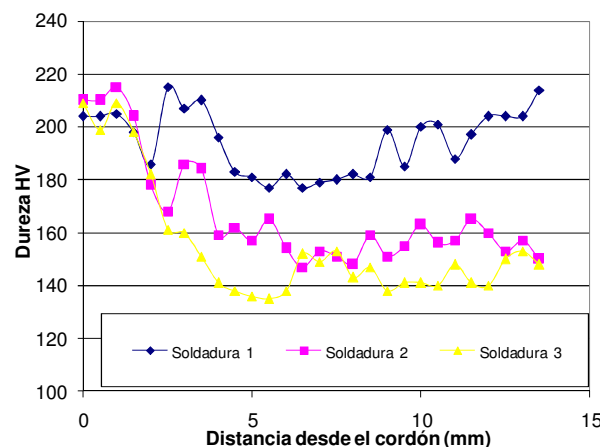


Figura 8. Perfil de dureza desde el centro del cordón hasta el metal base

Además se evaluaron las propiedades mecánicas de las muestras, las que se muestran en la tabla 3. En todas las muestras ensayadas, la fractura fue en el material base, lo que ratifica que el proceso de soldadura fue efectuado de buena forma; a esto se suma que en todos los casos el ensayo de doblado

resultó exitoso. De los resultados de propiedades mecánicas se desprende claramente que el acero con estructura dual phase posee elevadas propiedades mecánicas y excelente comportamiento luego de ser soldado, confirmándose, entonces, que es un muy buen candidato para ser utilizado en la fabricación de cilindros de gas de menores espesores.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de las muestras soldadas.

Probeta	Fluencia (MPa)	UTS (MPa)
Soldadura 1, Dual Phase	490	610
Soldadura 2, Estructura mixta	270	360
Soldadura 3, Estructura ferrítico perlítica	265	390

Con todos los análisis realizados, se desprende que es posible fabricar en la usina nacional un acero Dual Phase que sea compatible con los que actualmente se utilizan en la fabricación de cilindros de gas, donde producto de sus propiedades mecánicas, se podrían fabricar de menor espesor y en consecuencia más livianos.

4. 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.
- 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.
- En base a los resultados mecánicos obtenidos los aceros bobinados a 550°C, son compatibles con las propiedades de un acero A45GL.

- Según los resultados de las muestras soldadas, no debería presentar problemas la soldadura de los aceros bobinados a 550°C; en consecuencia es un buen candidato de reemplazo del acero que actualmente se comercializa en la fabricación de cilindros de gas, pudiendo trabajar con menores espesores y por ende bajar los pesos netos de los cilindros.

5. 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.

6. REFERENCIAS

- [1]. Monsalve A, Artigas A, Castro F, Colás R, Houbaert Y. Rev. Metal. Madrid 2011; 47: 5-14.
- [2]. Vargas J. Obtención de aceros Dual Phase por laminación en caliente, Tesis Ingeniero Civil en Metalurgia, Santiago (Chile): Universidad de Santiago de Chile, 2005.
- [3]. Spiech G, "Physical Metallurgy of Dual Phase Steels" Kot R.A, Bramfitt B.L (eds), Fundamentals of Dual-Phase Steels. Chicago (EE.UU), The Metallurgical Society of AIME. 1978, p 3-45.
- [4]. Spiech G, Miller R.L. "Mechanical Properties of Ferrite-Martensite Steels", Kot R.A, Morris J.W (eds), Structure and properties of Dual-Phase Steels. New Orleans (EE.UU), The Metallurgical Society of AIME. 1979, p 145-182.
- [5]. Watershoot T, Kestens L, Vandeputte S, De Cooman B. "Development of the Texture in MnCr Hot Rolled Dual Phase Steel: Influence on the r-value", ISS, 43rd Mechanical Working and Steel Processing Conference 2001, Charlotte (EE.UU): 2001, Vol. XXXIX, p. 373-383.
- [6]. Gunduz S y col. Ironmaking and Steelmaking 2008; 35(1): 63-68.
- [7]. Pizarro F, Toledo S, Barra F, Monsalve A y Artigas A. "Fabricación a Escala de Laboratorio Aceros Dual Phase de Baja Aleación Laminados en Caliente", IX Congreso Sam Conamet 2009, Buenos Aires (Argentina), Instituto Sabato, 2009.
- [8]. Artigas A., "Caracterización del Acero Grado 448", Tesis de Ingeniero Civil en Metalurgia Santiago,(Chile): Universidad de Santiago de Chile. 1999.
- [9]. Artigas A, Colás R, Barra F, Carvajal L, Pizarro L, Monsalve A, "Caracterización y Estudio de las Variables de Operación de dos Aceros Dual Phase Laminados en Caliente" XI Congreso Iberomet

- Conamet Sam 2010, Viña del Mar (Chile). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Universidad de Santiago de Chile, 2010.
- [10]. Artigas A, Monsalve A, Celentano D, “Validación de un Modelo de Enfriamiento de una Bobina de Acero de Bajo Carbono”, XIV, Jornadas De Transferencia de Calor y Materia 1999. Santiago (Chile); Universidad de Chile 1999.
- [11]. Monsalve A, Artigas A, Celentano D, Meléndez F. Rev. Met. Madrid. 2004; 40 (3): 193-198.
- [12]. Norma NCh 214 of 1997, Acero para Cilindros Soldados para Gases Licuados de Petróleo”, Santiago Chile: Instituto Nacional de Normalización, 1997.
- [13]. Norma ASTM E 8-08, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, [On-Line], Filadelfia (EE.UU): American Society for Testing and Materials, 2011.
- [14]. Norma ASTM E 517-00, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, [On-Line], Filadelfia (EE.UU): American Society for Testing and Materials, 2011.
- [15]. Bhadeshia H, Bainite in Steels Transformations, Microstructure and Properties, Second 2da Ed. Cambridge (Inglaterra): IOM communications Ltd, 2001, Cap 2,4.
- [16]. LePera F, Journal of Metals 1980, Marzo: 38-39.