

## Estudio del desgaste de uniones soldadas en tuberías<sup>(\*)</sup>

J. Montero\*, A. García\*, A. Varela\*, S. Zaragoza\*, R. Artiaga\* y J.L. Mier\*

### Resumen

En este trabajo se ha estudiado el desgaste que experimentan las uniones soldadas de tuberías, con el objetivo de minimizar los problemas derivados de las mismas. Se ha efectuado un análisis del comportamiento tribológico de las tres zonas fundamentales de la soldadura: metal base, zona afectada por el calor y cordón, evaluándose la diferencia en las propiedades mecánicas entre ellas. Además, se han propuesto distintas alternativas en el proceso de soldadura con la finalidad de mejorar el comportamiento global de la unión.

### Palabras clave

Desgaste. Soldadura. Dureza.

## A study on the welded joins for pipelines

### Abstract

This study deals with the wear experienced in the welded joins for pipelines. Its aim is to minimise the problems caused by this wear. An analysis is carried out on the tribological behaviour of three crucial areas within the welding: the basic metal, the heat-affected zone and the weld bead zone itself. The differences in mechanical properties between these areas are evaluated. Moreover, various alternatives in the welding process are proposed in an effort to improve the global behaviour of the join.

### Keywords

Wear. Welding. Hardness.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las uniones soldadas metálicas hay tres zonas perfectamente diferenciadas: metal base, zona de afectación térmica (ZAT) y cordón. Estas zonas se caracterizan por su diferente microestructura que influye en su dureza y, por lo tanto, en su comportamiento al desgaste<sup>[1-4]</sup>.

Dentro de los materiales férreos, los aceros aleados al Cr-Mo ocupan un lugar importante entre los aceros especiales soldables por sus aplicaciones en las industrias aeronáutica, naval y ferroviaria. La presencia de cromo y molibdeno en estos aceros aumenta considerablemente la capacidad de temple durante el enfriamiento<sup>[5]</sup> de la soldadura, por lo que las posibilidades de obtener estructuras martensíticas en la ZAT es mayor y, por lo tanto, pueden establecerse diferencias de durezas entre las zonas que se han austenizado y las que no<sup>[6-9]</sup>. Todo ello, además de disminuir la soldabilidad de estos aceros, hace variar, notablemente, el comportamiento frente al desgaste, de esas dos zonas. Por otra parte, existen trabajos previos en los que se estudia el comportamiento al

desgaste de estos aceros en las vías ferroviarias en los que se pone de manifiesto la influencia de las inclusiones de MnS en la velocidad al desgaste de estos materiales<sup>[10-13]</sup>. Sin embargo, en estos casos, el material no formaba una unión soldada y no se ha evaluado el comportamiento de estos materiales en uniones soldadas. En el presente trabajo se estudia el desgaste abrasivo de un acero aleado al Cr-Mo, soldado utilizando el ensayo *pin-on disk*, según la norma ASTM G-99<sup>[14]</sup> "Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus".

## 2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Material ensayado

El estudio se ha realizado sobre las uniones soldadas de tuberías de centrales energéticas con un espesor de 9,2 mm y el material soldado es un acero A 355 Gr. P11, cuya composición determinada mediante un analizador

(\*) Trabajo recibido el día 25 de octubre de 2006 y aceptado en su forma final el día 17 de julio de 2007.

\* Escuela Politécnica Superior. Universidade da Coruña. C/ Mendizabal, s/n. 15403 Ferrol, España.

de carbono y azufre Leco CS 300 y análisis mediante absorción atómica en un espectrofotómetro PERKIN-ELMER 3110 se muestra en la tabla I.

Según la composición mostrada en la tabla I, el carbono equivalente del acero calculado según la expresión indicada por el International Institute of Welding sería el siguiente:

$$\text{C.E.} = \%C + \frac{\%M}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%Va}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} =$$

$$0,14 + \frac{0,30}{6} + \frac{1,2 + 0,5}{5} = 0,5$$

El procedimiento de soldadura habitualmente empleado para el tipo de instalaciones objeto de estudio es el siguiente:

- Pre calentamiento inicial de la zona a soldar, a una temperatura en torno a los 100 °C.
- Soldadura con pasada de raíz por TIG con varilla de soldar BOHLER AWS A5.28-96: ER80S-G y relleno por soldadura manual por arco eléctrico con electrodo de 3,25 y 2,50 mm AWS A-5.5/Clase E8018-B2L, según la tabla II que se muestran a continuación.

**Tabla I.** Composición química del acero

*Table I. Chemical composition of the steel evaluated*

C (%)	S (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)
0,14	0,004	0,30	0,78	1,2	0,5

- Tratamiento térmico posterior en la zona de soldadura y en la zona de afectación térmica consistente en un calentamiento en torno a 700 °C.

Las alternativas que se analizaron fueron las siguientes:

- Alternativa 1: Eliminación del tratamiento posterior a la soldadura, de manera que controlando rigurosamente las condiciones y parámetros de la propia soldadura se controle la microestructura y, por tanto, las propiedades y se pueda evitar esta etapa y el coste que supone.
- Alternativa 2: Eliminación tanto del pre calentamiento como del tratamiento térmico posterior a la soldadura. Esta propuesta implica un mayor ahorro en coste y tiempo que la alternativa anterior.

Puesto que el objetivo del trabajo es analizar el estudio frente al desgaste de las uniones soldadas en tuberías, se ha realizado una comparación del comportamiento tribológico y mecánico de tres zonas en cada una de las alternativas planteadas: metal base, zona de afectación térmica de la soldadura y cordón de soldadura propiamente dicho.

## 2.2. Trabajo experimental

Para el estudio del comportamiento tribológico de las distintas zonas de cada una de las soldaduras alternativas se realizaron ensayos *pin on disk* sin lubricación, según la norma ASTM G99 “Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus” en un tribómetro de la marca Microtest.

**Tabla II.** Parámetros de soldadura

*Table II. Welding parameter*

		TIG		SMAW				
Material aportación		Varilla Ø 2,4 mm		Electrodo, Ø 3,25 mm		Electrodo Ø 2,5 mm		
<b>Tradicional</b>	T <sup>a</sup> entre pasadas	50 – 55 °C						
	Tiempo	90'	45'	50'	40'	30'	40'	30'
<b>Alternativa 1</b>	T <sup>a</sup> entre pasadas	150 °C	160 °C	170 °C	180 °C	180 °C	180 °C	180 °C
	Tiempo	120'	45'	50'	40'	30'	40'	30'
<b>Alternativa 2</b>	T <sup>a</sup> entre pasadas	180 - 200 °C						
	Tiempo	90'	45'	45'	45'	30'	35'	30'

Dada la influencia del acabado superficial en los resultados que se obtienen en este tipo de ensayos de desgaste se ha tenido un cuidado especial en la preparación previa de las muestras, asegurando que todas ellas presenten un valor de rugosidad similar e inferior en todos los casos a 0,1 micras.

Para todas las muestras los parámetros de ensayo fueron los mismos, aplicándose una carga de 10 N, una velocidad de giro de 200 rpm con un radio de 3 mm y una temperatura de 200 °C, que es la temperatura de operación normal de las tuberías estudiadas. La duración del ensayo fue de 1 h. El pin empleado fue una bola de acero cromado de 4 mm de diámetro con una dureza en torno a 775 HV.

La resistencia al desgaste se determinó como la pérdida de masa experimentada en cada caso por la muestra ensayada después del proceso controlado de desgaste.

Se determinó, también, el coeficiente de fricción experimentado por las diferentes alternativas en cada una de las zonas consideradas.

Se realizaron, además, medidas de microdureza Vickers sobre cada una de las zonas de las tres alternativas barajadas en el estudio y sobre las huellas de desgaste obtenidas en el ensayo *pin on disk*. La carga de ensayo fue de 200 g y el tiempo de aplicación de 20 s.

Para complementar el estudio se realizó un análisis metalográfico de cada una de las zonas de la soldadura (metal base, zona de afectación térmica y zona de soldadura) para cada una de las alternativas del procedimiento de soldadura propuestas. El ataque previo a la observación en el microscopio óptico se realizó con Nital al 3 %.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la exposición de los resultados se va a emplear la siguiente nomenclatura:

- Muestra A: Procedimiento de soldadura que incluye el precalentamiento previo y el tratamiento térmico posterior.
- Muestra B: Procedimiento de soldadura que incluye, únicamente, el precalentamiento previo.
- Muestra C: Procedimiento de soldadura que omite tanto el precalentamiento previo como el tratamiento térmico posterior.
- MB: Metal base.
- ZAT: Zona de afectación térmica de la soldadura.
- SOL: Zona del cordón de soldadura.

En la figura 1 se muestran los resultados de los ensayos de dureza efectuados para las tres alternativas ensayadas, en función de la localización de la medida.

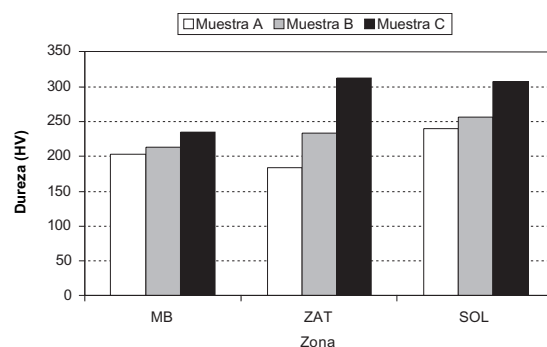


Figura 1. Dureza de las diferentes zonas de la soldadura para los tres procedimientos considerados.

Figure 1. Hardness for the different regions of the weld join for the three processes under investigation.

Se puede observar cómo la dureza medida en cada una de las zonas, para las muestras B y C, varía en función de la zona en la que se mida, siendo el valor menor el que se mide en el metal base y el mayor el medido en la zona de soldadura. En el caso de la muestra A, el procedimiento de soldadura tradicional, el valor de dureza medido en la zona de afectación térmica es el menor.

En todas las zonas, la muestra C presenta el mayor valor de dureza y la muestra A el menor, siendo las diferencias más importantes las que se aprecian en la zona de afectación térmica.

La figura 2 muestra la pérdida de masa que se ha medido en cada uno de los ensayos de desgaste

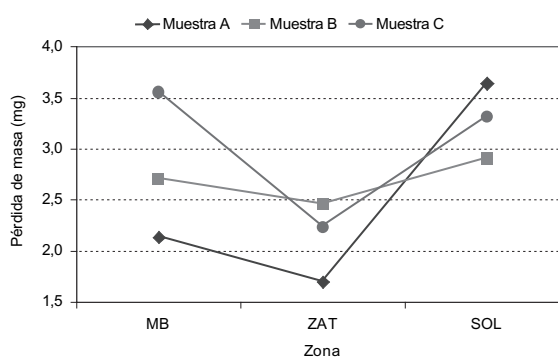


Figura 2. Pérdida de masa experimentada, durante el ensayo *pin on disk*, en las diferentes zonas de la soldadura para los tres procedimientos considerados.

Figure 2. Mass loss for the different areas of samples. (Mass lost during the pin-on-disk test for the different weld regions of the three processes under investigation).

efectuados sobre las distintas zonas de las tres muestras ensayadas. Para este caso, se puede apreciar en la figura cómo, el mejor comportamiento frente al desgaste lo presenta la muestra A y, el peor, la muestra C.

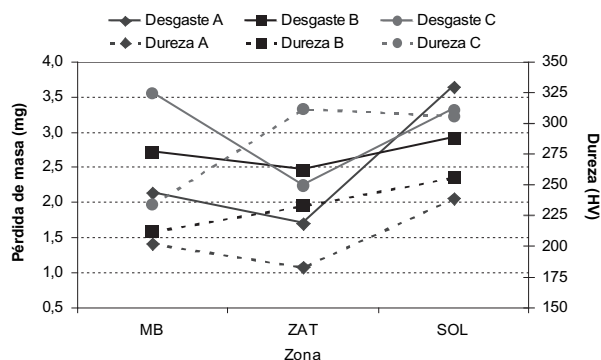
Si se comparan los resultados obtenidos en cada muestra para las diferentes zonas se puede apreciar que, tanto la muestra A como la C presentan bastante diferencia en la pérdida de masa que se mide en las diferentes zonas. La diferencia entre la zona que menos se desgasta (ZAT) y la de máximo desgaste es mayor del 110 %, en el caso de la muestra A y del 60 %, para la C. En el caso de la muestra B, los resultados son más estables y la diferencia se mantiene por debajo del 20 %, en todos los casos.

El diferente comportamiento frente al desgaste en función de la zona que se estudia, para las muestra A y C, puede implicar una mayor distorsión en el flujo del fluido que transporta la tubería, por lo que se puede agravar el problema de desgaste debido a las turbulencias que se generan. También, hay que considerar que las diferencias entre la pérdida de masa experimentada por las zonas que más se desgasten para las distintas muestras no son demasiado significativas. De esta forma, se puede presuponer que el mejor resultado frente al desgaste lo presentará la muestra B, aunque en términos absolutos no sea así.

El coeficiente de fricción medido en cada de las zonas para las muestras A, B y C no presenta variaciones significativas y se encuentra comprendido entre 0,64 y 0,70.

La figura 3 muestra, comparados, los resultados de desgaste y dureza obtenidos para las tres muestras en función de la zona de ensayo.

Puede observarse cómo, tanto para la muestra B como sobre todo para la C, existe una tendencia



**Figura 3.** Comparación entre la dureza y la resistencia al desgaste de cada una de las zonas de las tres muestras consideradas.

*Figure 3. Hardness and wear resistance for each weld region of the three samples.*

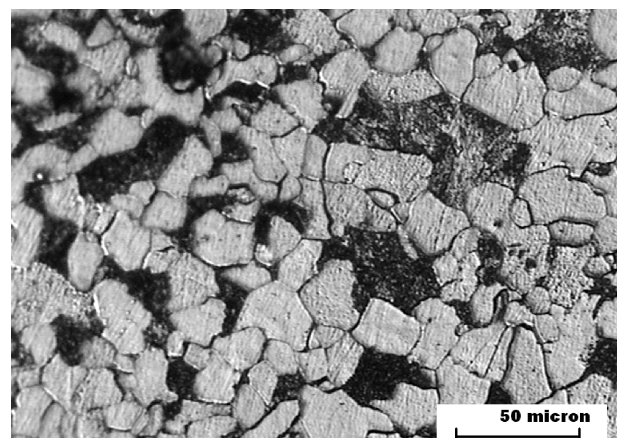
opuesta en función de las zonas entre la resistencia al desgaste y la dureza, de manera que, cuanto mayor es la dureza en la zona menor es la pérdida de masa que se obtiene en el ensayo *pin on disk*. De nuevo, en este caso se ve que la muestra A no sigue este patrón y, en este caso, las regiones con mayor dureza son las que se comportan peor al desgaste.

La figura 4 muestra la microestructura del metal base para el caso de la muestra A. En esta figura, puede observarse la estructura ferrítico-perlítica del acero, estructura que no se ve afectada, significativamente, por los diferentes tratamientos térmicos de las distintas muestras. El acero presenta un carbono equivalente del 0,5 %, tal y como se calculó anteriormente, por lo que este contenido dificulta la aparición de martensita como consecuencia de los ciclos térmicos a los que se someten las muestras durante los procesos de soldadura.

Las figuras 5 y 6 muestran la microestructura de la zona de afectación térmica y del cordón de soldadura para la muestra A, respectivamente.

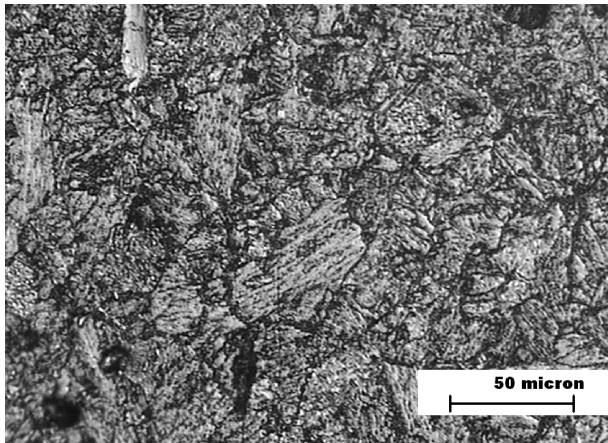
Puede observarse cómo, en la zona de afectación térmica se produce un aumento del tamaño de grano en relación al propio del metal base que se mostraba en la figura anterior, lo que implica una ligera disminución en el valor de la dureza medido en la ZAT frente al medido en el metal base de la misma muestra. En este caso, la estructura que se observa es bainítica y no ferrítico-perlítica, lo que explica que la resistencia al desgaste de esta zona, en la muestra A, sea mayor.

En el caso de cordón de soldadura (Fig. 6) se observa la estructura columnar del material de aportación con la aparición de bandas estrechas de ferrita proeutectoide en el borde de grano, que presenta una dureza mayor que la del metal base. En este caso, la



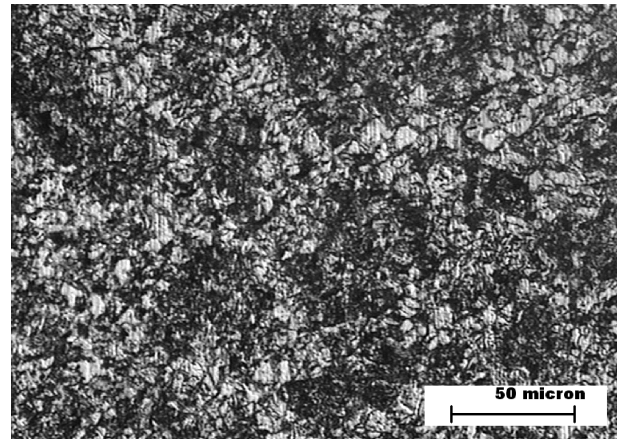
**Figura 4.** Microestructura del metal base para la muestra A.

*Figure 4. Microstructure of the base metal for sample A.*



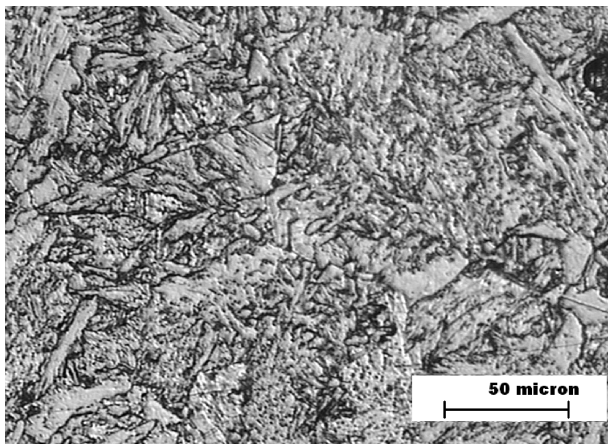
**Figura 5.** Microestructura de la zona de afectación térmica para la muestra A.

*Figure 5. Microstructure of the heat-affected zone for sample A.*



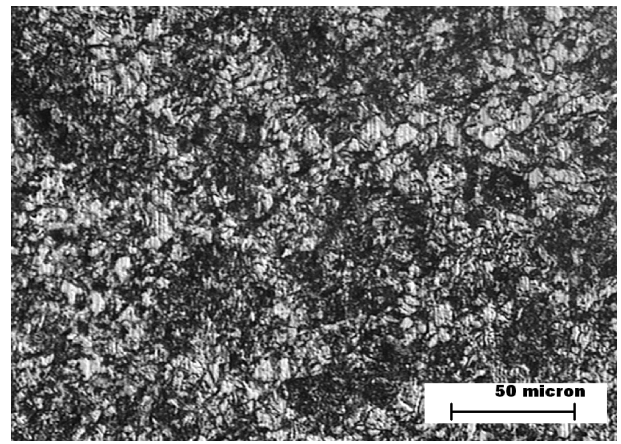
**Figura 7.** Microestructura la zona de afectación térmica para la muestra B.

*Figure 7. Microstructure of the heat-affected zone for sample B.*



**Figura 6.** Microestructura del cordón de soldadura para la muestra A.

*Figure 6. Microstructure of the seam weld for sample A.*



**Figura 8.** Microestructura del cordón de soldadura para la muestra B.

*Figure 8. Microstructure of the seam weld for sample B.*

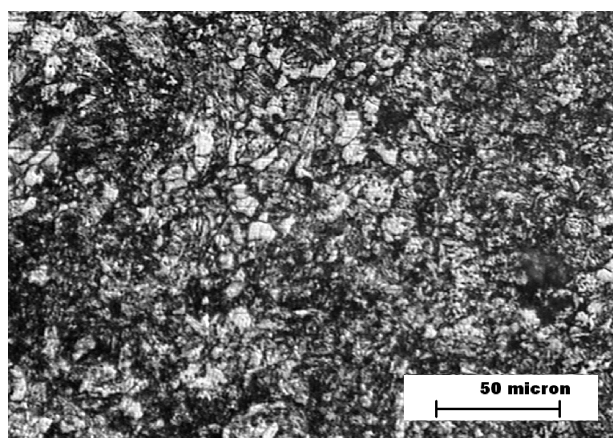
estructura resultante presenta el mayor valor de dureza de las tres zonas consideradas en el estudio; sin embargo, la heterogeneidad de las fases es mayor, coexistiendo fases de diferente dureza, lo que implica que la respuesta frente al desgaste abrasivo sea peor. En esta situación, la fase más blanda, minoritaria, se arranca con mayor facilidad, lo que provoca una superficie más irregular que empeora la resistencia al desgaste que se mide.

Las figuras 7 y 8 muestran las zonas de afectación térmica y el cordón de soldadura para la muestra B. En la primera, se puede apreciar un tamaño de grano menor que en la ZAT de la muestra A y la presencia de porciones pequeñas de ferrita. Esta estructura

implica un valor de dureza ligeramente superior al que se mide para el metal base después del proceso de soldadura y sensiblemente superior al de la zona de afectación térmica de la muestra A. La resistencia al desgaste es algo peor que la de la muestra A, aunque la dureza que se mide es mayor. Esto, se puede explicar en razón de la presencia de la ferrita que se observa en la figura, lo que provoca, tal y como ya se comentó para el caso anterior, una heterogeneidad mayor en la superficie, que implica una respuesta frente al desgaste abrasivo menor que la que cabría esperar en función de la dureza que presenta. El cordón de soldadura presenta, en este caso, una estructura fina acicular bainítica de granos columnares del metal de

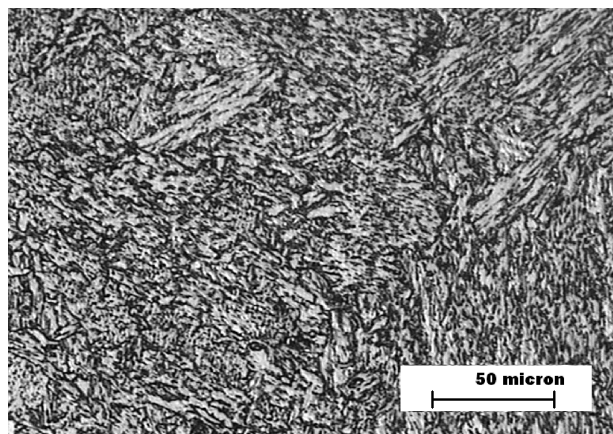
aportación, junto con la presencia de pequeñas porciones de ferrita proeutectoide, que da como resultado una dureza semejante a la anterior.

La figura 9 muestra una estructura fina formada por bainita con porciones dispersas de ferrita, observada para la ZAT de la muestra C, y la figura 10 muestra la estructura columnar del metal depositado y la presencia de ferrita proeutectoide con estructura Widmanstätten, en el centro de los granos. En ambos casos, la dureza que se alcanza es semejante y la mayor de todas las zonas y muestras que se han analizado. El comportamiento al desgaste de la zona de afectación térmica



**Figura 9.** Microestructura la zona de afectación térmica para la muestra C.

*Figure 9. Microstructure of the heat-affected zone for sample C.*



**Figura 10.** Microestructura del cordón de soldadura para la muestra C.

*Figure 10. Microstructure of the seam weld for sample C.*

ca es muy semejante al que se obtiene para la misma zona de la muestra B, mientras que el de la zona del cordón de soldadura es ligeramente peor.

## 5. CONCLUSIONES

Se han realizado ensayos de desgaste, dureza y metalografía sobre el metal base, zona de afectación térmica y cordón de soldadura de tres muestras soldadas con diferentes procedimientos.

La dureza, el desgaste y la estructura metalográfica en cada muestra varía, en función de la zona en al que se mida.

La mayor dureza la presenta la muestra soldada sin someterse a tratamiento pre y post soldadura y, la menor, la muestra tratada en ambos casos.

La zona que más se desgasta es la ZAT, siendo el desgaste entre zonas más uniforme para la muestra precalentada y no tratada después de la soldadura (muestra B).

## REFERENCIAS

- [1] P. L. HURRICKS, *Wear* 26 (1973) 285-304.
- [2] S.N. KRISHNAN, V. TOPPO Y A. BASAK Y K.K. RAY, *Wear* 260 (2006) 1.285-1.294
- [3] P. K. KOLHE Y C. K. DATTA, *Indian Welding Journal* 37 (2004) 39-41.
- [4] S.N. KRISHNAN, A. BASAK Y K.K. RAY, *Metals, Materials and Processes* 16 (2004) 375-384.
- [5] C. GARCIA, M. P. DE ANDRES, *Rev. Metal. Madrid* 18 (1982) 329-347.
- [6] S. F. MEDINA, P. FABREGUE Y V. LOPEZ, *Rev. Metal. Madrid* 25 (1989) 238-246.
- [7] M. P. DE ANDRES, C. GARCIA, V. LOPEZ Y J.M. CASALS, *Rev. Metal. Madrid* 11 (1975) 171-184.
- [8] M. P. DE ANDRES, *Rev. Metal. Madrid* 11 (1975) 103-118.
- [9] J. M. BELLO, M. P. DE ANDRES, F. MUNOZ DEL CORRAL, *Rev. Metal. Madrid* 5 (1969) 401-11.
- [10] J. KALOUSEK, D.M. FEGREDO Y E.E. LAUFER, *Proc. Int. Conf. Wear of Materials* (1985) 212-231.
- [11] D. M. FEGREDO, M. T. SHEHATA, A. PALMER, J. KALOUSEK, *Wear* 126 (1988) 285-306.
- [12] P. CLAYTON Y R. DEVANATHAN, *Wear* 156 (1992) 121-131.
- [13] D. M. FEGREDO, J. KALOUSEK Y M.T. SHEHATA, *Wear* 161 (1993) 29-40.
- [14] ASTM G99-05, *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*, ASTM, 203.