

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**SOLDADURA POR FRICCIÓN BATIDO DE TUBERÍAS DE POLIETILENO PARA  
GAS NATURAL**

MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE SOLDADURA

SERGIO ANTONIO MUÑOZ PINZÓN

**ASESOR**

DR. FRANCISCO AURELIO RUMICHE ZAPATA

**JURADO**

PRESIDENTE: DR. PAUL PEDRO LEAN SIFUENTES

1ER MIEMBRO: DR. FRANCISCO AURELIO RUMICHE ZAPATA

2DO MIEMBRO: MÁG. ANÍBAL FREDDY ROZAS GALLEGO

LIMA, PERÚ. 2014

## Soldadura por fricción batido de tuberías de polietileno para gas natural

Tesista: Sergio Antonio Muñoz Pinzón

Asesor: Dr. Francisco Rumiche Zapata

Maestría en Ingeniería de Soldadura - Escuela de Posgrado

Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. 2014

### Resumen

La soldadura por fricción batido FSW, es un nuevo método en la tecnología de unión de plásticos; a diferencia de las aplicaciones tradicionales en aleaciones de aluminio en el caso de los plásticos requiere el desarrollo de herramientas y procedimientos para conseguir uniones de la calidad requerida. La investigación en FSW de polímeros se ha enfocado hasta ahora en la unión de planchas planas, en este documento se presenta un método para unir mediante FSW tuberías plásticas de polietileno para gas natural, las propiedades mecánicas de la unión se evalúan mediante ensayos de resistencia a la tracción, se estudiaron además las superficies de fractura y se analizó la microestructura de las uniones soldadas.



## Soldadura por fricción batido de tuberías de polietileno para gas natural

### Resumen

La soldadura por fricción batido FSW, es un nuevo método en la tecnología de unión de plásticos; a diferencia de las aplicaciones tradicionales en aleaciones de aluminio en el caso de los plásticos requiere el desarrollo de herramientas y procedimientos para conseguir uniones de la calidad requerida. La investigación en FSW de polímeros se ha enfocado hasta ahora en la unión de planchas planas, en este documento se presenta un método para unir mediante FSW tuberías plásticas de polietileno para gas natural, las propiedades mecánicas de la unión se evalúan mediante ensayos de resistencia a la tracción, se estudiaron además las superficies de fractura y se analizó la microestructura de las uniones soldadas.

### 1. Introducción

Una de las mayores y crecientes aplicaciones de las tuberías de polietileno es la entrega de gas natural. Actualmente, aproximadamente un cuarto de todas las tuberías de polietileno se utilizan en esta aplicación. Es utilizado en transporte (grandes distancias, alta presión) y distribución (local, baja presión, típicamente diámetros inferiores a 4 pulgadas) [1].

Una parte integral de cualquier sistema de tuberías es el método usado para unir los componentes del sistema [2]. La soldadura por fricción batido, FSW, es un método desarrollado por The Welding Institute (TWI, Cambridge) y patentado en 1992, consiste en un macho que se mueve cíclicamente calentando el material a su alrededor plastificándolo y luego al solidificar uniendo las piezas [3]. Aunque es exitosa la aplicación de FSW convencional en metales, especialmente aleaciones de aluminio, en plásticos presenta los siguientes problemas: Dificultad para retener el material en la línea de unión generando cavidades en la unión soldada, baja velocidad de soldadura, dificultad para generar un mezclado uniforme del polímero, una superficie poco uniforme en la cara de la soldadura [4]. En Brigham Young University se investigó el uso de la soldadura por fricción batido en plásticos con el uso de una zapata caliente, y se hizo una caracterización de la microestructura resultado del proceso de soldadura [5]. Arici y otros estudiaron el efecto de soldadura en dos pases para eliminar los defectos en la raíz observados hasta entonces [6]. Recientemente en 2013 se estudió el uso de un nuevo diseño de herramienta para la soldadura de polímeros auto-reactiva [7].

Hasta el momento las investigaciones se han enfocado en la soldadura mediante fricción batido de planchas planas de plástico y no existen publicaciones relacionadas con la soldadura en tuberías fabricadas con polímeros, la soldadura de tubería presenta dificultades de accesibilidad por lo que en general únicamente es posible soldar de un solo lado, la cara del diámetro externo de la tubería; esta dificultad impide el uso de la herramienta auto-reactiva o el uso de doble pase por la dificultad de acceder al interior de las tuberías. En este estudio se analiza la factibilidad de usar el método de soldadura por fricción batido en tuberías de polietileno con base en sus propiedades mecánicas y su microestructura.

### 2. Procedimiento experimental

#### 2.1. Materiales, métodos y equipos

En este estudio se utilizaron tuberías de polietileno de 160 mm de diámetro, SDR17, con un espesor de pared nominal de 9,5 mm, fabricadas con un compuesto PE100 bajo la especificación EN 1555-2 [8] para la realización de las soldaduras a tope. Las tuberías ensayadas fueron producidas por Tecnopipe con compuesto ELTEX TUB125 N2025 de Ineos color anaranjado.

Se realizaron pruebas preliminares con el fin de evaluar el comportamiento de la geometría de herramientas utilizadas en trabajos previos utilizando herramientas con hombro giratorio y con hombro estacionario, dado que en el caso particular de las soldaduras de tuberías el acceso es limitado al lado exterior de las mismas se utilizaron herramientas con un solo hombro las cuales fueron fabricadas en acero AISI-SAE 1045 con machos de forma de cono y cilindro roscado los cuales producen juntas de buena calidad y la mejor resistencia de la soldadura [9]. El diseño de la herramienta con hombro giratorio se muestra en la figura 1, consiste de un macho cónico con un hombro con una ranura semicircular; para el caso de la herramienta con hombro estacionario se utilizó un rodamiento de bolas para aislar el hombro del movimiento rotacional, el macho fue roscado con una rosca métrica M6 a mano izquierda, figura 2.

En las pruebas preliminares se usaron secciones de la tubería con forma de arcos de circunferencia de modo que se pudieran realizar soldaduras lineales para evaluar el desempeño de las diferentes geometrías. Con base en los resultados de las pruebas preliminares la herramienta con pin roscado y hombro estacionario fue seleccionada para las soldaduras circunferenciales a tope debido a que la herramienta tradicional con hombro giratorio era incapaz de contener el material en la línea de la unión originando crestas y rebabas en la superficie de la unión, además también se observaron en las soldaduras de prueba poros o cavidades internas en la soldadura que se le atribuyeron al montaje, para las soldaduras finales se mejoró el montaje y la preparación de las juntas para prevenir la aparición de imperfecciones y defectos.

Las soldaduras se realizaron en una fresadora con control numérico computarizado. Para el caso de las pruebas preliminares soldando arcos de circunferencia se utilizó una placa de respaldo plana de acero, figura 3. La rotación de las tuberías para la soldadura circunferencial se realizó con un cabezal rotativo, figura 4, en este caso se utilizó como respaldo una tubería de acero mecanizada en un torno para que ajustara con la superficie interior de la tubería de polietileno, se cortaron y mecanizaron tramos de tubería de 100 mm de longitud, durante las pruebas preliminares se evidenció la influencia de la preparación de la junta en la calidad de la misma.

## 2.2. Preparación del proceso, ensayos y pruebas.

Se soldaron los cupones de tuberías con los parámetros indicados en la tabla 1, una vez concluida la soldadura se realizó inspección visual en busca de imperfecciones y discontinuidades, se incluyó en la tabla 1 el parámetro adimensional calculado  $K$ , definido como  $K = \text{rotación} / \text{avance} * \text{diámetro herramienta}$  que debería estar entre 150 y 400 para asegurar una unión de buena calidad [10]. De cada cupón se extrajeron 3 probetas con la forma tipo A ISO 13953 [11] y una probeta con la forma tipo 1B ISO 527-2 [12] para determinar la resistencia a la tracción de la unión, los ensayos de resistencia a la tracción se realizaron en una máquina Zwick/Roell Z050, la velocidad fue fijada a 5 mm/min, en los ensayos con probetas ISO 527-2 se utilizó un extensómetro con una longitud inicial entre marcas de 50 mm, con el fin de observar el comportamiento de la deformación y la ductilidad de las uniones. De cada cupón además se extrajeron 3 secciones en corte transversal del cordón de soldadura para la observación en el microscopio óptico en modo transmisión Leica DM750M para determinar la microestructura de la soldadura, la observación se realizó a 50 aumentos y se ensamblaron posteriormente en un editor de imágenes las fotografías para poder apreciar toda la soldadura. Adicionalmente se observaron en un microscopio estereoscópico Leica S6D a 6.3 aumentos y en el microscopio electrónico de barrido (SEM) FEI Quanta 650 en diferentes aumentos, con un potencial de 5 kV las superficies de fractura de las probetas sometidas al ensayo de tracción.

La soldadura se produce como resultado del calor generado por la fricción y batido en el material en estado pastoso generada por el macho giratorio [6]. En el caso de FSW

convencional con hombro giratorio también se genera por la fricción entre el hombro y las superficie externa de las piezas a unir, en el caso de la herramienta con hombro estacionario no se cuenta con esta fuente de energía, sin embargo se observó durante la ejecución de las soldaduras que se aportaba energía térmica al proceso por la fricción entre los elementos rodantes y las pistas de rodadura del rodamiento de bolas, este hombro estacionario actuó durante las soldaduras como una zapata que confinó el material en estado pastoso y dio forma a la superficie exterior de la soldadura.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Inspección visual de la unión

Durante la inspección visual de las uniones se encontraron diferentes imperfecciones y defectos en las uniones, el defecto de raíz observado en las pruebas preliminares se redujo y casi se eliminó, se determinó que sus principales causas son las deficiencias en la preparación y el montaje de la junta. Una vez concluidas las soldaduras se determinó que en el proceso de soldadura por FSW es bastante sensible a las imperfecciones geométricas en las tuberías como excentricidad (espesores no uniformes) y ovalidad (diámetros no uniformes). A 600 RPM la apariencia superficial mostró apariencia superficial similar a grumos como se muestra en la figura 5, esta apariencia es atribuible al bajo calentamiento producto de la operación a bajas velocidades, no se formó en este caso un refuerzo por encima de la superficie exterior de las tuberías.

La apariencia externa de la soldadura a 1000 RPM fue mejor que la de la soldadura a 600 RPM, en esta unión se formó un ligero refuerzo detrás de la trayectoria de la herramienta, el hombro estacionario también dejó una huella lisa suavizando las marcas longitudinales del proceso de extrusión de la tubería de polietileno, figura 6.

Las soldaduras con mejor apariencia se consiguieron trabajando a 2000 RPM, sobre la unión se formó un refuerzo muy suave y de apariencia muy lisa y brillante en el lado de avance de la herramienta, el refuerzo es más alto que el que resulto de soldar a 1000 RPM, presenta pequeñas estrías en el lado de retroceso de la herramienta. La apariencia de este refuerzo es similar a la que se consigue en los dos labios del proceso de soldadura por termofusión a tope mediante placa caliente, figura 7.

A 3000 RPM se aprecia visualmente débil adherencia entre la soldadura y el material base, la soldadura presenta una fisura longitudinal en la línea de unión con el polímero base, defectos similares se observaron en las soldaduras de prueba, figura 8.

El refuerzo a 3000 RPM es discontinuo, no es suave, durante la ejecución de la operación se soldeo se apreció que el material perdió viscosidad, con lo que fluía con demasiada facilidad fuera de la zona donde encontraba el macho giratorio de la herramienta. Inspeccionando la raíz de la soldadura se encontró únicamente en estas soldaduras que el material fluyó fuera de la raíz entre la tubería de plástico y la tubería de respaldo de acero, defecto mostrado en la figura 9, atribuible a la excesiva fluidez de polietileno debido a las altas temperaturas alcanzadas como producto de la elevada velocidad.

#### 3.2. Resistencia a la tracción

Los resultados de los ensayos ISO 527-2 se presentan en la tabla 2 y gráficamente en la figura 10, la mayor resistencia a la tracción y ductilidad se observaron en la soldadura realizada a 2000 RPM, la soldadura realizada a 1000 RPM presenta una resistencia intermedia pero se observa una importante caída en la deformación máxima, las probetas de las soldaduras a 600 RPM y 3000 RPM presentan valores de deformación máximos cercanos, sin embargo la menor resistencia a la tracción se observó en la soldadura a 3000 RPM.

En el ensayo de tracción según ISO 13953, se prepararon tres probetas de cada cupón para ser sometidas a tracción, en dichas probetas se mantuvieron los refuerzos de las soldaduras. Los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 3 y en la figura 11.

En esta prueba de tracción también se observó la mayor resistencia mecánica en la soldadura realizada a 2000 RPM. De estos resultados se puede concluir que la resistencia mecánica a la tracción incrementa con la velocidad de giro de la herramienta hasta un punto máximo a partir del cual incrementando esta velocidad la resistencia desciende rápidamente.

En la tabla 3 se presenta en la última fila resultados de ensayos obtenidos en tuberías de 110 mm PE100 SDR17 etiquetadas como “muestra 1”, soldadas mediante termofusión a tope con placa caliente, con probetas según ISO 13953, comparando los resultados de resistencia obtenidos con los dos métodos de soldadura se aprecia claramente que la unión mediante fricción batido presenta inferiores propiedades mecánicas respecto la unión mediante termofusión, en cuanto a la ductilidad los valores obtenidos mediante soldadura por fricción batido son bastante inferiores a los publicados para soldaduras por termofusión [13].

### 3.3. Observación de la fractura

Todas las probetas ensayadas presentaron en las superficies de fractura con fragilidad, macroscópicamente se observa en las soldaduras a 600 y 1000 RPM se observan fibrilaciones que evidencian ductilidad a nivel macroscópico, en la figura 12 se aprecia este fenómeno y también se observa la falta de unión en la parte superior de la unión, defecto al que se atribuye el inicio de la fractura en esta probeta. En las superficies de las soldaduras a 2000 y 3000 RPM la deformación macroscópica debido a la ductilidad es muy baja, en la figura 13 se muestra una imagen de la superficie de fractura de una soldadura a 2000 RPM, del análisis de las marcas de la superficie se concluyó que la fractura se propagó de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, se observa en la imagen un defecto de falta de unión en la parte superior de la soldadura que actuó como concentrador de tensiones dando origen a la fractura; en la imagen también se ven claramente dos zonas en la fractura, una zona blanquecina y una zona suave sin brillo del color anaranjado del polímero con marcas denominada zona frágil.

Las superficies de fractura también se observaron con mayores aumentos en un microscopio electrónico de barrido, en las superficies de fractura con ductilidad macroscópica como las que se observaron en las soldaduras a 600 y 1000 RPM, sobre las fibrilaciones macroscópicas surgen fibrilaciones microscópicas que se originan como resultado de la ductilidad del polímero a nivel microscópico, ver figura 14. En las superficie de la soldadura a 2000 RPM se observaron en el SEM las dos zonas descritas con anterioridad, la zona blanquecina presenta muestras de ductilidad microscópica y evidencias del fenómeno de ‘crazing’ que muy posiblemente llevó a la fractura frágil [14], se observan en la figura 15 las cavidades que se fueron uniendo delante del frente de la grieta. La zona frágil presenta marcas que producen como resultado de las tensiones y deformaciones cortantes, el resultado se puede ver en la figura 16 y 17.

### 3.4. Observación de la microestructura

La microestructura observada muestra 4 zonas: avance, retroceso, central y raíz, las micrografías se observaron con el lado izquierdo como avance y el lado derecho como retroceso; en las soldaduras a 600 y 1000 rpm es característica la microestructura en la zona central que coincide con la descripción dada por Strand para los “anillos de cebolla” [5], los cuales son líneas de flujo del polímero concéntricas, ejemplo de esta microestructura se ve en la figura 18, en estas soldaduras también observa débil unión en la zona de la raíz.

Se observa en la figura 18 que esta estructura de anillos de cebolla difiere

considerablemente de la estructura homogénea y lisa del polímero base, esta estructura con líneas de flujo tan pronunciadas se explica por el nivel bajo de temperaturas alcanzado durante el proceso de soldadura, que por la acción del giro de la herramienta deformó el polímero y no permitió su recristalización, esto causó además la disminución en las propiedades mecánicas de estas soldaduras y explica también la superficie de fractura con fibrilaciones a nivel macroscópico, se ven además espacios vacíos o faltas de unión en las zonas de avance y retroceso de debilitaron aún más la unión.

En las soldaduras realizadas a mayor velocidad la microestructura de la zona central es homogénea y similar a la observada en el polímero base debido al mayor calentamiento por la alta velocidad, figura 19, además hay buena unión en la zona de raíz, en las zonas de avance y retroceso permanecen algunas líneas de flujo y discontinuidades que pudieron favorecer el 'crazing' e iniciación de grietas en esas zonas al someter la soldadura a esfuerzos externos, el defecto más que originó la rotura es la fisura en el lado avance que se origina en la base del refuerzo.

#### 4. Conclusiones

Es posible adaptar la soldadura por fricción batido (FSW) a la soldadura de tuberías de polietileno, la aplicación es prometedora dado el bajo costo del herramental requerido aunque en el estado actual no produce uniones con la calidad suficiente para su utilización comercial en los sistemas de transporte y distribución de gas natural. La aplicación de este método en superficies curvas como las de las tuberías presenta dificultades adicionales respecto de la unión de planchas planas originadas en las tolerancias geométricas en ovalidad y excentricidad a los cuales el método de unión es bastante sensible, lo que exige una adecuada preparación previa de las superficies a unir. Una microestructura homogénea garantiza mejores resultados en las propiedades mecánicas de la unión cercanas a las del material base, la falta de homogeneidad origina la fragilidad que se presenta principalmente en los límites de las zonas de avance y retroceso; en estas zonas es más drástico el enfriamiento del polímero y es allí donde es más probable encontrar discontinuidades y defectos. La investigación futura debería enfocarse en el efecto del ciclo térmico en el polímero y en mejorar la geometría de la herramienta para conseguir mayor uniformidad en las diferentes zonas de la soldadura.

#### Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a Steintrices, a la Unidad de Ingeniería de Soldadura, al laboratorio de manufactura, y al laboratorio de materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

#### Referencias

- [1] Peacock, A. J. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structure, Properties and Applications*. New York: Marcel Decker Inc.
- [2] Plastics Pipe Institute (2012). *Handbook of Polyethylene (PE) Pipe*, Plastic Pipe Institute.
- [3] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needam, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P., & Dawes, C. J. (1995). GB Patent application 9125978.8 (1991); 9125978.8, December 1991 and US Patent No. 5460317.
- [4] Troughton, M. J. (2008). *Handbook of plastics joining: a practical guide*. Norwich, NY: William Andrew Inc.
- [5] Strand, S. R. (2004). *Effects of friction stir welding on polymer microstructure* (MSc Thesis, Brigham Young University. Department of Mechanical Engineering).
- [6] Arici, A., & Sinmaz, T. (2005). Effects of double passes of the tool on friction stir welding

- of polyethylene. *Journal of Materials Science*, 40(12), 3313-3316.
- [7] Pirizadeh, M., Azdast, T., Rash Ahmadi, S., Mamaghani Shishavan, S., & Bagheri, A. (2014). Friction stir welding of thermoplastics using a newly designed tool. *Materials and Design*, 54, 342-347.
- [8] UNE-EN 1555-2: *Sistemas de canalización en materiales plásticos para el suministro de combustibles gaseosos. Polietileno (PE). Parte 2: Tubos.* (2010). Madrid: AENOR.
- [9] Bilici, M. K., & Yüklér, A. I. (2012). Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets. *Materials and Design*, 33(1), 145-152.
- [10] Kiss, Z., & Czigány, T. (2012). Effect of welding parameters on the heat affected zone and the mechanical properties of friction stir welded poly (ethylene-terephthalate-glycol). *Journal of Applied Polymer Science*, 125(3), 2231-2238.
- [11] ISO 13953 *Polyethylene (PE) pipes and fittings -Determination of the tensile strength and failure mode of test pieces from a butt-fused joint.* (2001). Geneva: ISO.
- [12] UNE-ISO 527-2 *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión.* (1997). Madrid: AENOR.
- [13] deCourcy, D. R., & Atkinson, J. R. (1977). The use of tensile tests to determine the optimum conditions for butt welding polyethylene pipes of different melt flow index. *Journal of Materials Science*, 12(8), 1535-1551.
- [14] ASM International. (2003). *Characterization and Failure Analysis of Plastics.* Materials Park, OH: ASM International.





## TABLAS

Tabla 1. Parámetros de soldeo

Velocidad de giro en RPM	Diámetro Pin en mm	Tiempo de soldeo en min	Longitud soldada en mm	Avance promedio en mm/min	K
3000	6	5,25	510	97,14	185,29
2000	6	12,20	489	40,08	299,39
1000	6	22,33	508	22,75	263,78
600	6	41,55	488	11,74	306,52

Tabla 2. Resistencia a la tracción y deformación, ISO 527-2

Velocidad de giro en RPM	Resistencia máxima a la tracción, MPa	Deformación máxima en tracción, %
3000	2,85	3,9
2000	19,6	9,8
1000	12,0	1,8
600	4,42	3,9

Tabla 3. Resistencia a la tracción y deformación, ISO 13953

Probeta	Resistencia máxima a la tracción, MPa
3000-1	5,81
3000-2	3,46
3000-3	5,65
2000-1	18,7
2000-2	14,1
2000-3	15,7
1000-1	10,4
1000-2	8,05
1000-3	13,1
600-1	2,75
600-2	6,21
600-3	6,62
Muestra 1	22

FIGURAS

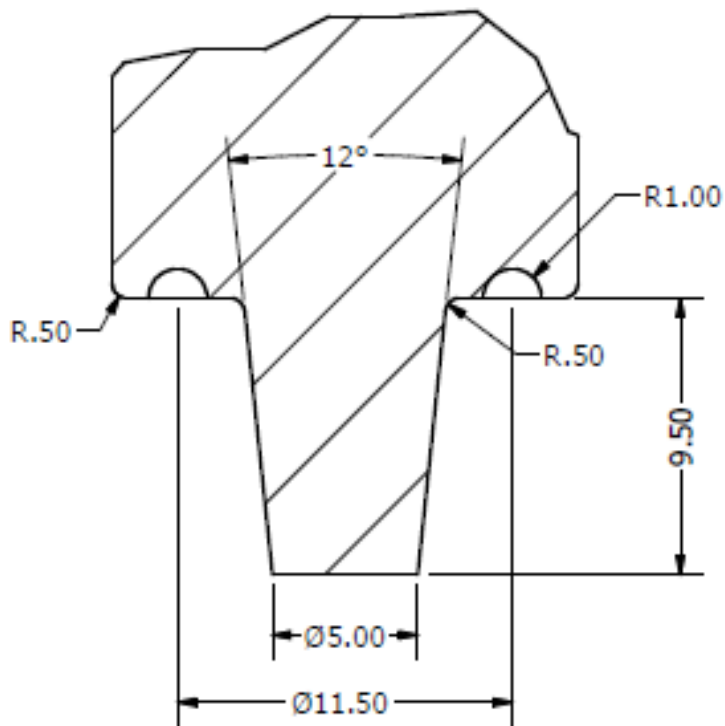


Figura 1. Herramienta con hombro giratorio

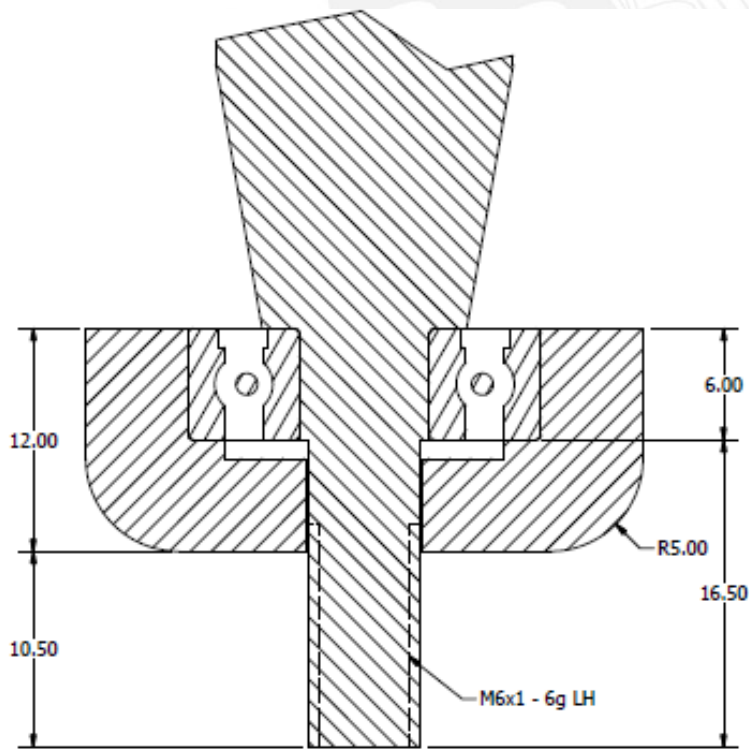


Figura 2. Herramienta con hombro estacionario

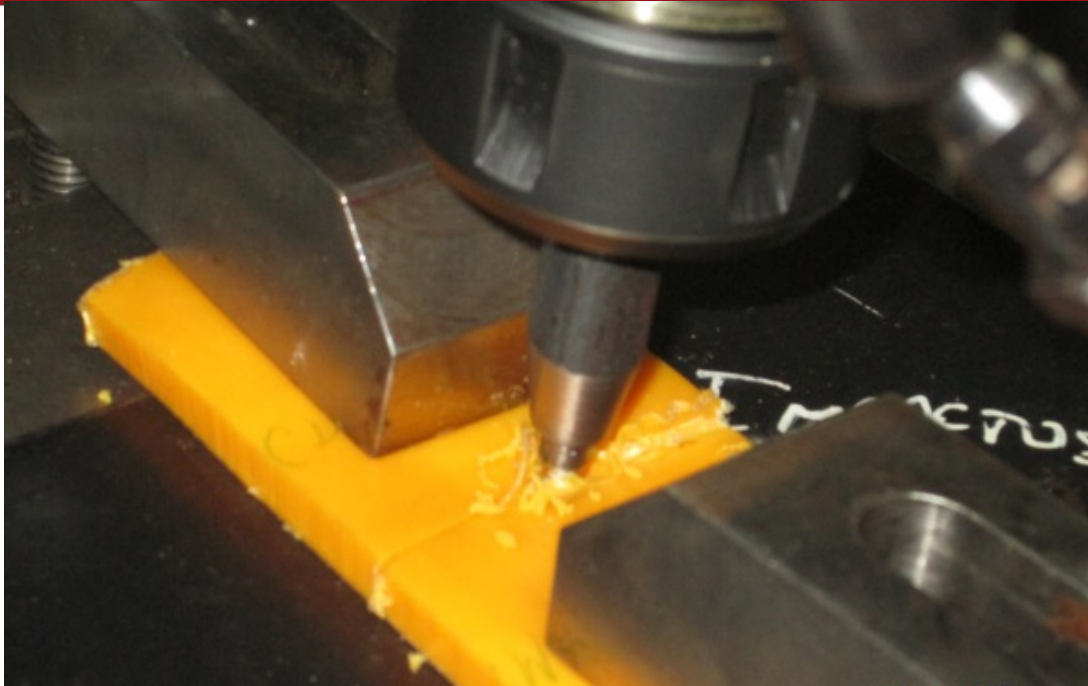


Figura 3. FSW pruebas preliminares



Figura 4. FSW de tuberías



**Figura 5.** Apariencia externa soldadura a 600 RPM



**Figura 6.** Apariencia externa soldadura a 1000 RPM



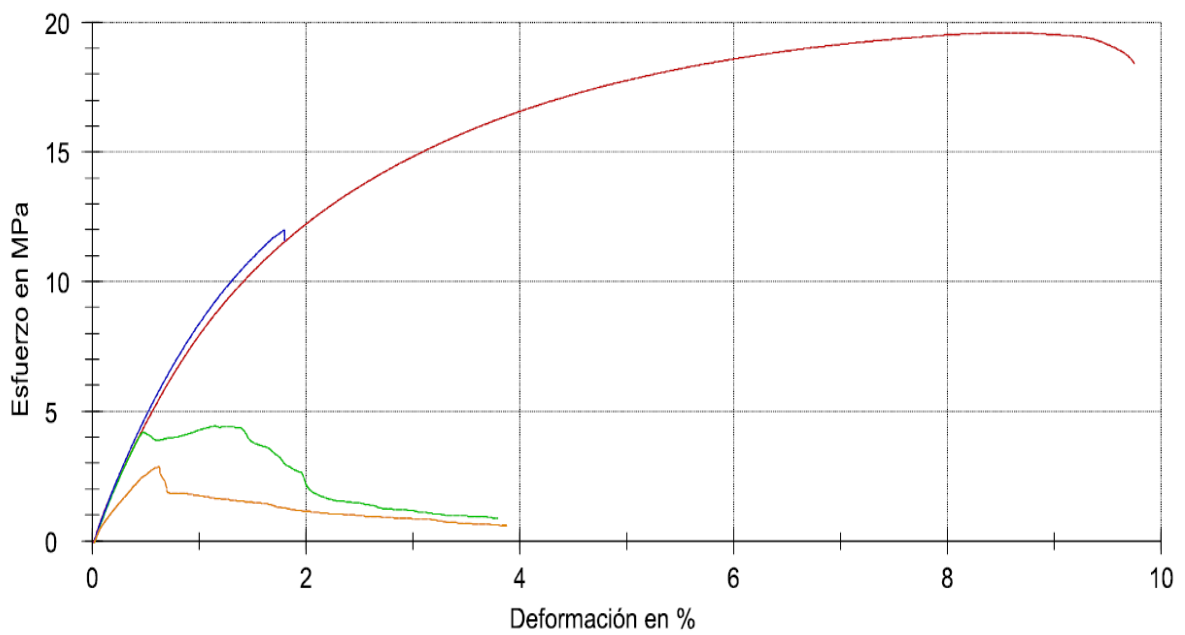
**Figura 7.** Apariencia externa soldadura a 2000 RPM



**Figura 8.** Apariencia de la soldadura a 3000 RPM



**Figura 9.** Defecto en la raíz de la soldadura a 3000 RPM



**Figura 10.** Comportamiento en tracción ISO 527-2

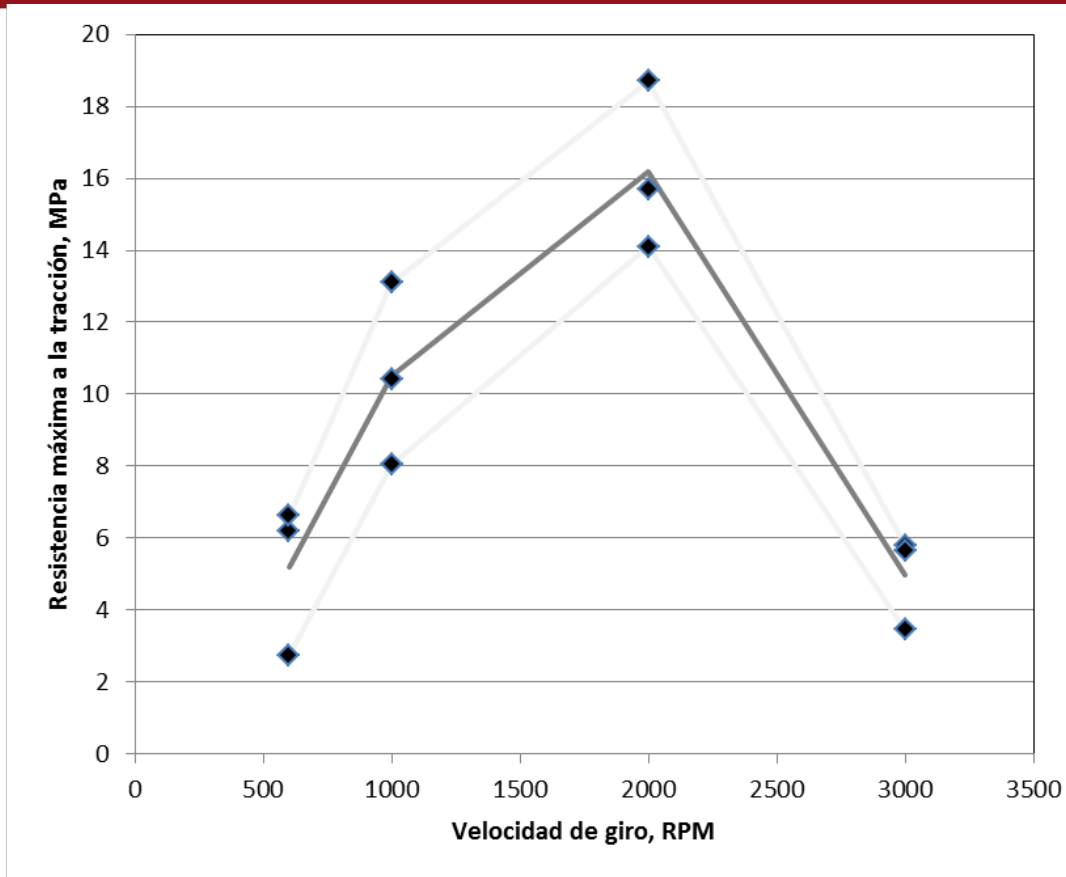


Figura 11. Variación de la resistencia a la tracción con la velocidad de giro

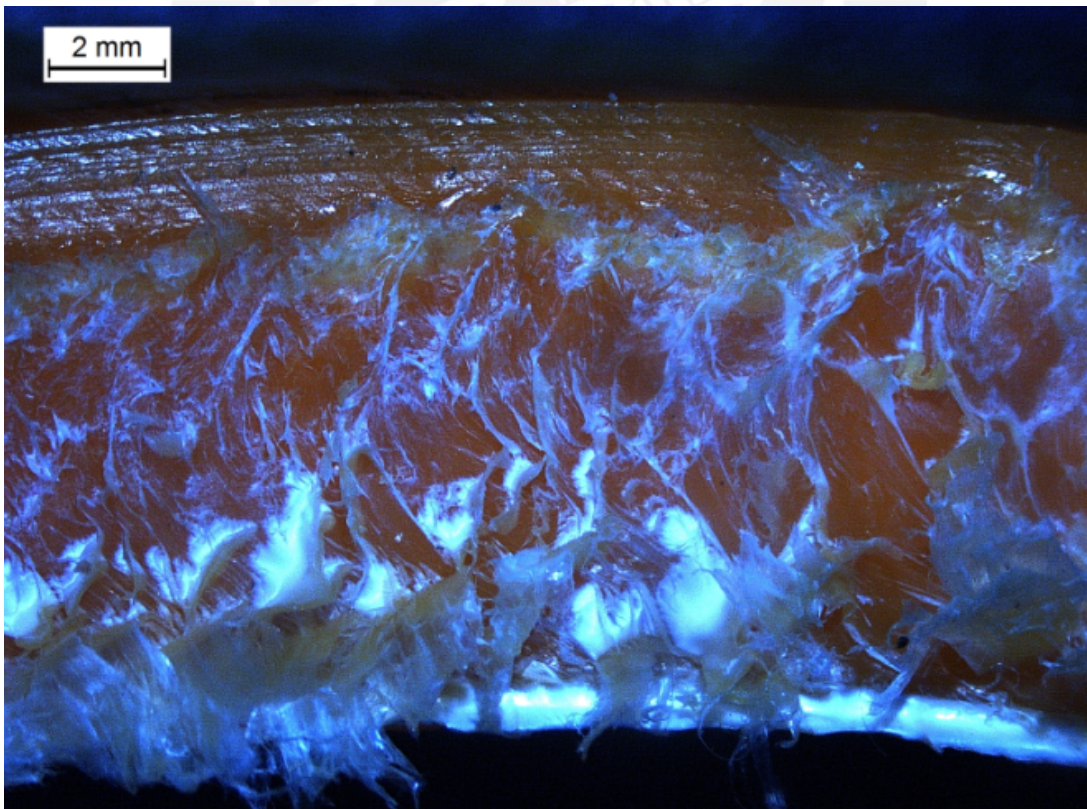


Figura 12. Superficie de fractura soldadura a 600 RPM, probeta 600-2

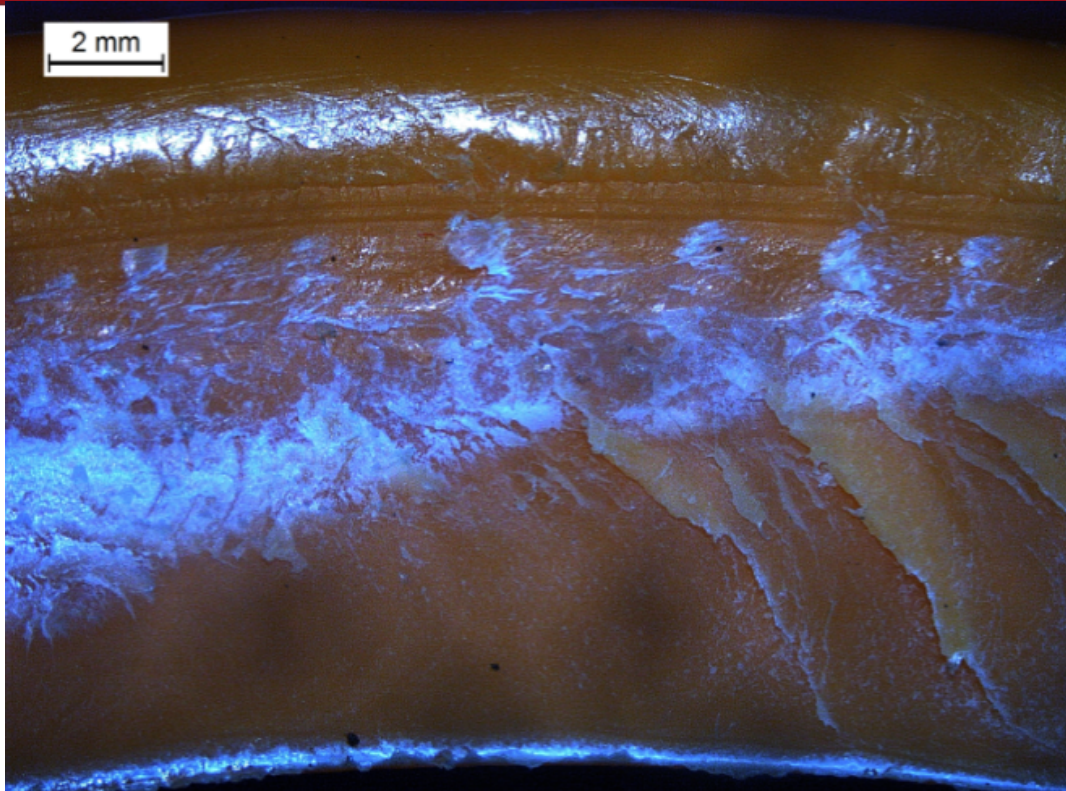


Figura 13. Superficie de fractura soldadura a 600 RPM, probeta 2000-2

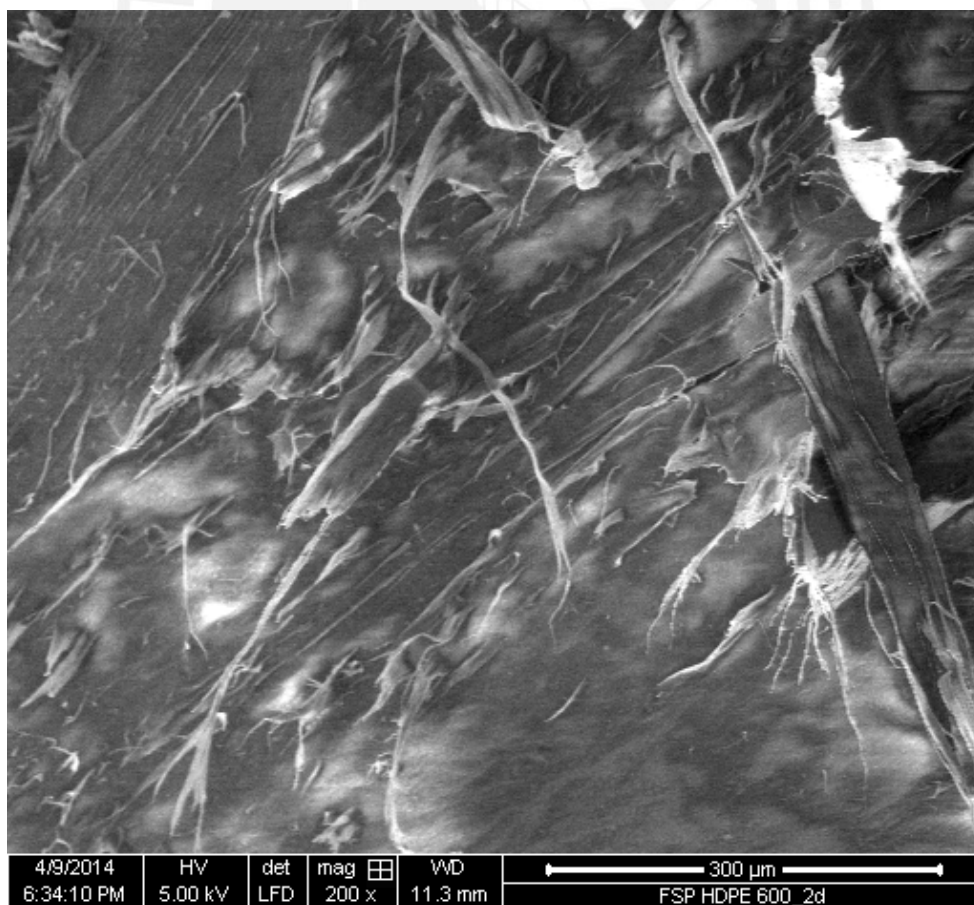
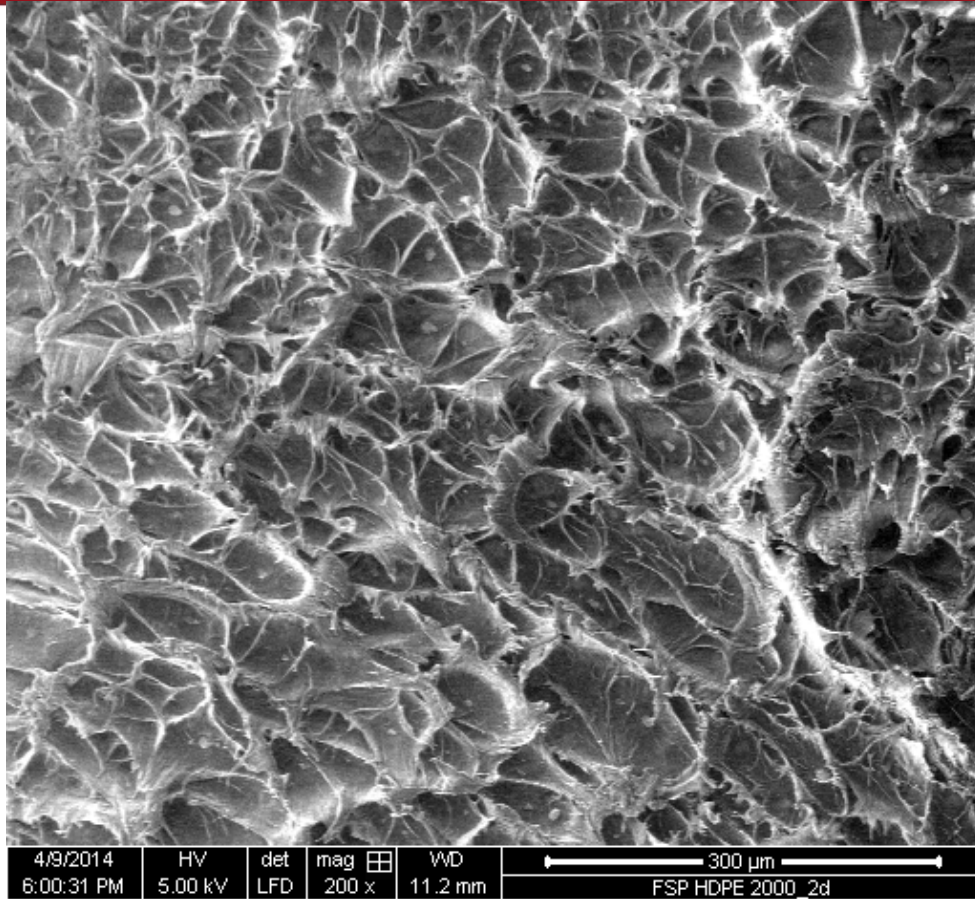
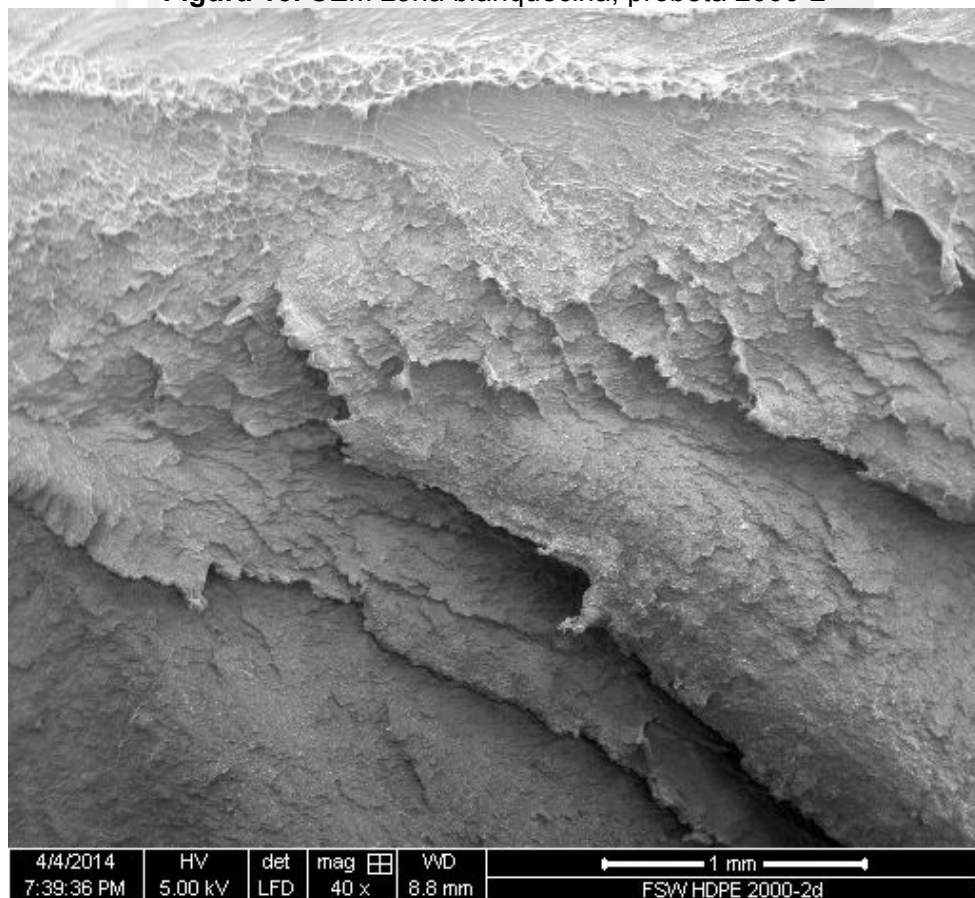


Figura 14. SEM probeta 600-2





**Figura 15.** SEM zona blanquecina, probeta 2000-2



**Figura 16.** SEM zona frágil, probeta 2000-2

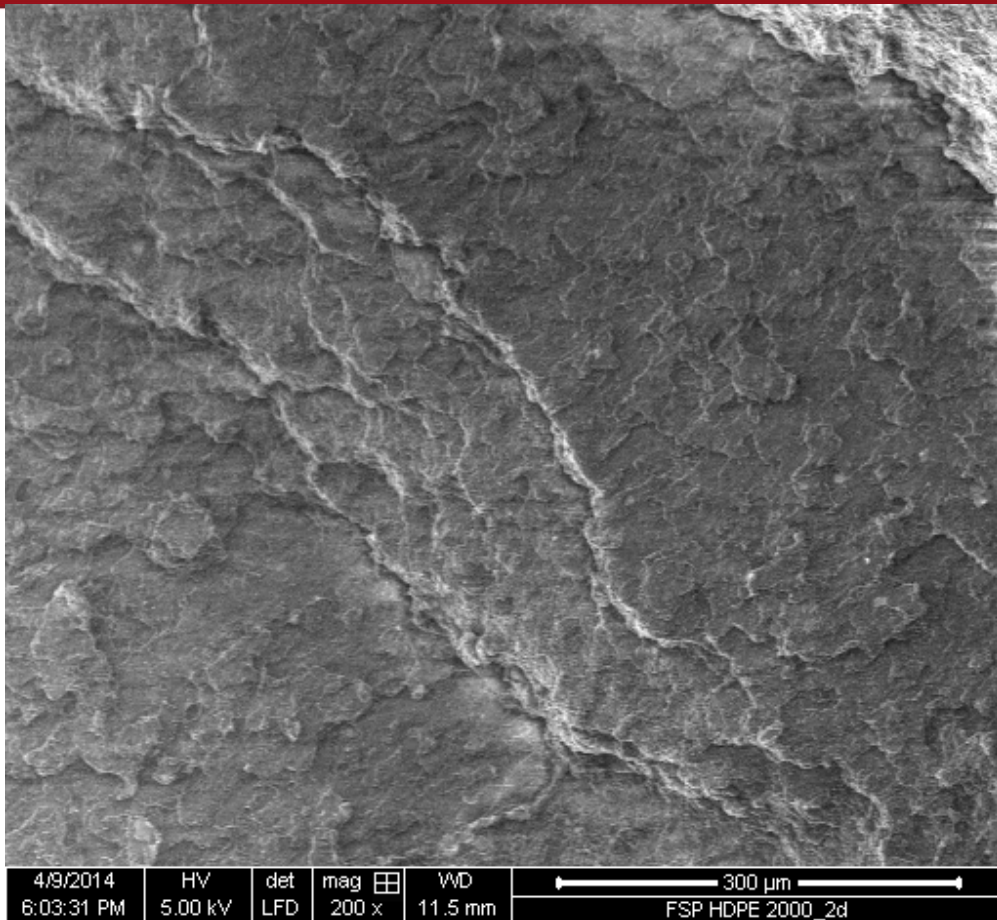


Figura 17. SEM zona frágil, probeta 2000-2



Figura 18. Microestructura de la soldadura a 600 RPM



• 2 mm •

**Figura 19.** Microestructura de la soldadura a 2000 RPM

