

## EFFECTO DE LA PREPARACIÓN SUPERFICIAL Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA DEL ACERO SAE 1045

### RESUMEN

En este artículo se estudia el comportamiento a fatiga del acero SAE 1045 usando cuatro condiciones superficiales diferentes: pulido, chorreado con partículas de arena, de alúmina y de acero. Además se aplicaron recubrimientos usando rociado térmico por combustión a probetas chorreadas con arena. Se realizaron pruebas de fatiga en flexión rotatoria y la caracterización de la superficie de fractura usando lupa estereoscópica y microscopio electrónico de barrido. Se encontró un aumento de la resistencia a fatiga de las muestras preparadas con arena (458,58 MPa) y de las muestras preparadas con alúmina (428,36 MPa), respecto a la resistencia de las muestras pulidas (422,00 MPa). La resistencia a fatiga de las muestras preparadas con partículas de acero disminuyó (415,44 MPa), debido a marcas superficiales que actuaron como concentradores de esfuerzos y originaron la propagación de grietas por fatiga. Las probetas revestidas con una aleación Fe-Cr-Ni-C presentaron falla debido a delaminación del recubrimiento y por propagación de fisuras a partir del sustrato.

**PALABRAS CLAVES:** Tratamiento superficial, fatiga, microscopía electrónica de barrido, revestimiento.

### ABSTRACT

*In this paper the fatigue behavior of the SAE 1045 steel was studied using four different superficial conditions: polished, blasting with steel, alumina and sand particles. In addition, coatings were applied using flame-thermal spray on samples prepared with sand blasting. Fatigue test were carried out under rotating bending conditions and fracture surface characterization with stereoscopic and scanning electron microscope were made. The samples prepared with sand (458,58 MPa) and alumina (428,36 MPa) presented an increase in fatigue resistance with respect to resistance of the polished samples (422,00 MPa). The samples prepared with steel particles (415,44 MPa) diminished the fatigue resistance due superficial marks that acted as stress concentrators and originated the cracks propagation by fatigue. The test samples were coating with a Fe-Cr-Ni-C alloy, which presented failure due to delamination of the coating and by propagation of cracks from the substrate.*

**KEYWORDS:** Superficial treatment, fatigue, scanning electron microscopy, coating.

### 1. INTRODUCCIÓN

El rociado térmico es un proceso que consiste en la deposición de recubrimientos por medio de pistolas que generan la cantidad de calor necesaria para fundir el material y acelerarlo hacia el sustrato por medio de gas comprimido, luego las partículas chocan contra la superficie formando capas delgadas que se conforman y adhieren a las irregularidades de la superficie. Antes de aplicar estos revestimientos se necesita que la superficie del elemento a recubrir (sustrato) posea un perfil de rugosidad para que el recubrimiento se adhiera por anclaje mecánico. El granallado, chorreado o blasteado es un método que sirve para la limpieza y preparación de superficies por impacto de partículas abrasivas a gran

velocidad. El equipo utilizado para realizar el proceso de deposición de recubrimientos fue el Terodyn 2000; las probetas fueron precalentadas en la superficie a recubrir hasta una temperatura de 90°C.

En la literatura se encuentra amplia información sobre la resistencia a la corrosión, al desgaste, a la adherencia y al cortante de recubrimientos [1,2,3] pero no existe un estudio detallado sobre fallas del acero SAE 1045 recubierto por rociado térmico por combustión y sometido a cargas fluctuantes. Investigaciones anteriores han encontrado una disminución de la vida en fatiga del acero SAE 4140 [4] y SAE 4340 [5] debido a partículas de alúmina retenidas superficialmente antes de ser recubiertas con rociado térmico. En otro estudio Steffens

### JOHN J. CORONADO

Ingeniero Mecánico, M.Sc.  
Profesor Asociado  
Universidad del Valle  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Estudiante de Doctorado en  
Ingeniería Mecánica de la  
Universidad de São Paulo, Brasil.  
johnjairocoronado@yahoo.com

et al. [6] reportaron aumento de la resistencia a fatiga de muestras granalladas con alúmina.

El comportamiento a la fatiga del acero SAE 1045 fue investigado usando cuatro condiciones superficiales diferentes: pulido, chorreado con partículas de arena (*sand blasting*), de alúmina ( $Al_2O_3$ ) y de acero usando el equipo de flexión rotatoria. En éste artículo además se presenta un análisis fractográfico de las probetas para identificar el mecanismo de fractura usando lupa estereoscópica y microscopio electrónico de barrido (SEM).

## 2. CONTENIDO

### 2.1 Materiales

La presente investigación fue realizada con probetas de acero SAE 1045, este material es usado en la construcción de piezas mecánicas sometidas a cargas fluctuantes como ejes. Como materiales para la preparación superficial se usaron partículas de arena, alúmina y acero, usadas habitualmente en el ámbito industrial. Las figuras 1, 2 y 3 muestran la morfología de las partículas usando microscopio estereoscópico. La figura 1 muestra las partículas de arena con esquinas redondeadas. La figura 2 muestra las partículas de alúmina con esquinas redondeadas y agudas. La figura 3 muestra las partículas de acero de mayor tamaño y con morfología esférica, además de esquinas agudas (afiladas) generadas por fractura en el impacto.



Figura 1. Morfología de las partículas de arena.

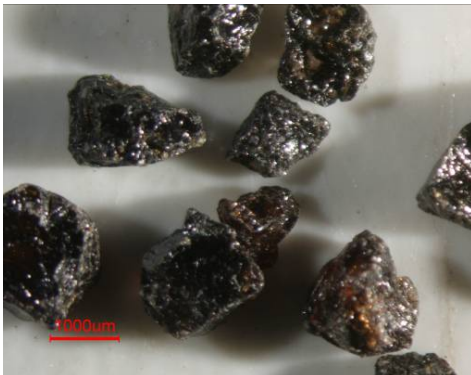


Figura 2. Morfología de las partículas de alúmina.



Figura 3. Morfología de las partículas de acero.

La Granulometría de las partículas fue determinada por tamizado. Las partículas de arena presentaron una granulometría media AFS 30/40, las partículas de alúmina presentaron una granulometría media 20/30 y las partículas de acero presentaron una granulometría media 16/20.

Las probetas fueron maquinadas y pulidas hasta obtener una superficie espejo. La tabla 1 presenta las condiciones de aplicación de las partículas sobre las probetas de acero SAE 1045. La distancia de aplicación y la presión de aire presentadas en la tabla 1 fueron seleccionadas por ser parámetros usados habitualmente en la industria para cada tipo de partícula.

Partículas	Distancia de aplicación (cm)	Diámetro boquilla (cm)	Presión de aire (kPa)
Acero	40	0,9525	620,53
Alúmina	30	0,9525	344,74
Arena	15	0,9525	758,42

Tabla 1 Condiciones de aplicación de las partículas.

La tabla 2 presenta la rugosidad media, la cual fue medida sobre la superficie de las probetas. El chorreado con acero presentó mayor rugosidad superficial debido al mayor tamaño de partículas. Mientras que las partículas de arena (menor tamaño) produjeron el menor valor de rugosidad. La American Welding Society [7] indica que la rugosidad adecuada de las superficies para la mayoría de recubrimientos rociados se encuentra entre  $2,5\mu m$  a  $13\mu m$  Ra.

Estado de la superficial de las muestras	Rugosidad Ra ( $\mu m$ )	Desviación estándar
Acabado espejo	0,15	0,006
Chorreado con arena	2,92	0,05
Chorreado con alúmina	3,53	0,19
Chorreado con acero	7,30	0,15

Tabla 2. Rugosidad de las muestras.

Los recubrimientos fueron aplicados por medio de la técnica de rociado térmico por combustión a probetas chorreadas con arena. La aleación usada como capa base fue: Ni=89%, Al=5,5%, Mo=5,5% para conseguir mayor adherencia con la capa exterior y la aleación usada exteriormente fue: Fe=81,8%, Cr=16%, Ni=2%, C=0,2%, usada en la industria por su alta resistencia al desgaste abrasivo y al impacto.

**2.2 Experimentación**

Las pruebas de fatiga se realizaron en la maquina de flexión rotatoria bajo la norma ASTM E-606. Se realizaron pruebas a tres niveles de esfuerzos: 0,6; 0,7 y 0,8 de la resistencia última ( $S_{ut}$ ) del acero SAE 1045. Para determinar el esfuerzo último se realizó la prueba de tracción y se determinó el  $S_{ut}$  de 961.89 MPa (139,51 Ksi).

Para un porcentaje de error del 5% y un nivel de confianza del 90% fue determinado un tamaño de muestra de 17 probetas para cada tipo de preparación superficial, en la tabla 3 se muestra los resultados del diseño de experimentos para cada nivel de esfuerzos. El coeficiente de variación permitido es 4% para el nivel de esfuerzo de  $0.8S_{ut}$ , 5% para el nivel de esfuerzo de  $0.7S_{ut}$  y 7% para el nivel de esfuerzo de  $0.6S_{ut}$  [8]. En caso que el coeficiente de variación sea mayor que el esperado en alguno de los niveles de esfuerzo, especímenes adicionales deberán ser ensayados con el fin de mantener el mismo porcentaje de error y la confianza en todos los niveles de esfuerzo. Los resultados obtenidos para las condiciones ensayadas y para los tres niveles de esfuerzos fueron satisfactorios, desde el punto de vista del comportamiento estadístico de la muestra, así que no fue necesario realizar pruebas adicionales.

Nivel de esfuerzo	Porcentaje del coeficiente de variación	Porcentaje de error/porcentaje del coeficiente de variación	Tamaño de la muestra
0,6 $S_{ut}$	4	1,25	4
0,7 $S_{ut}$	5	1	5
0,8 $S_{ut}$	7	0,71	8

Tabla 3. Tamaño de muestra para cada nivel de esfuerzos.

La figura 4 presenta la grafica de número de ciclos (N) contra el esfuerzo alternante (S), para todas las condiciones de rugosidad. En la tabla 3 se muestran los resultados del limite de resistencia a fatiga. Las probetas chorreadas con arena presentaron el mayor límite de resistencia a fatiga, seguido de las probetas chorreadas con alúmina. El límite de resistencia a fatiga de las probetas chorreadas con arena y alúmina fue superior que la del acero SAE 1045 con acabado espejo, ya que la superficie queda con esfuerzos de compresión debido al impacto de las partículas. Mientras que el granallado con

acero presentó menor límite de resistencia a fatiga comparada con las probetas pulidas.

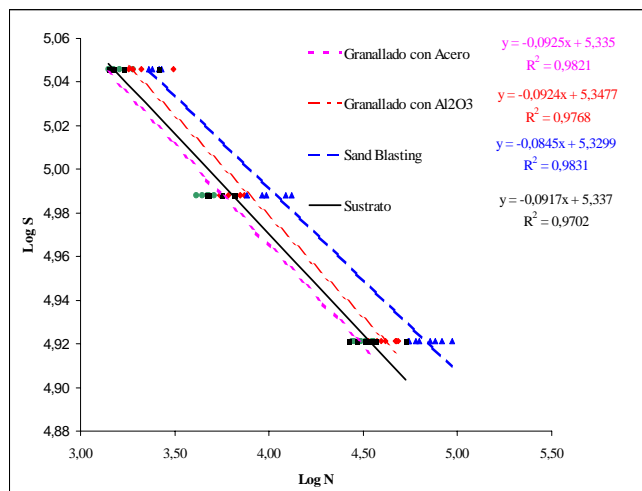


Figura 4. Grafica de número de ciclos contra esfuerzo alternante.

Condición superficial	Límite de resistencia a la fatiga en MPa (Psi)
Acabado espejo	422,00 (61206,85)
Chorreado con arena	458,58 (66511,99)
Chorreado con alúmina	428,36 (62129,81)
Chorreado con acero	415,44 (60255,96)

Tabla 4. Resultados del limite de resistencia a la fatiga.

**2.3 Análisis Fractográfico**

Para identificar los lugares de iniciación de grietas por fatiga fueron examinadas las superficies de fractura con lupa estereoscópica y SEM de las probetas ensayadas con un esfuerzo alternante de  $0,6 S_{ut}$ . La figura 5 ilustra la superficie de fractura de una muestra pulida donde una fisura se propagó hasta producir la fractura de la probeta.

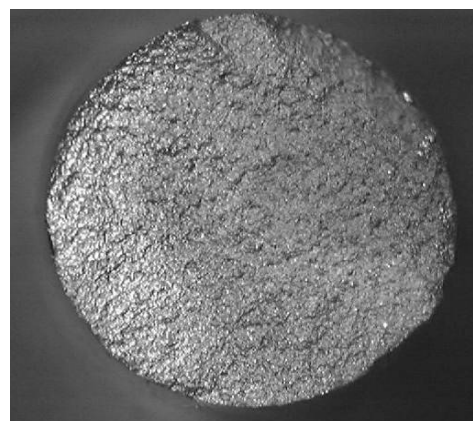


Figura 5. Superficie de fractura de la probeta pulida.

Las figuras 6, 7 y 8 muestran las superficies de fractura de las probetas preparadas superficialmente, se evidencian varios puntos de iniciación de grietas por fatiga y en la parte central se presenta una fractura final dúctil. Las probetas preparadas superficialmente con partículas de acero presentaron mayor cantidad de puntos de iniciación de fisuras por fatiga, la propagación simultánea de múltiples fisuras causó la disminución de la resistencia a fatiga en estas probetas.

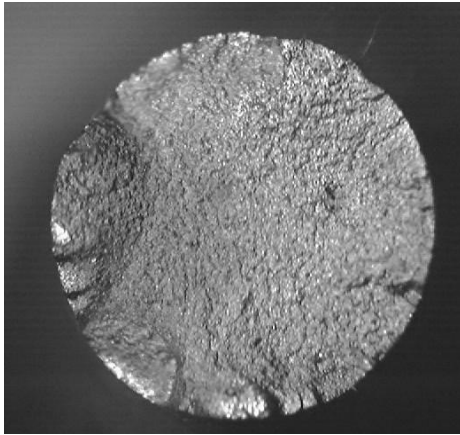


Figura 6. Superficie de fractura de la probeta chorreada con partículas de arena.



Figura 7. Superficie de fractura de la probeta chorreada con partículas de alúmina.

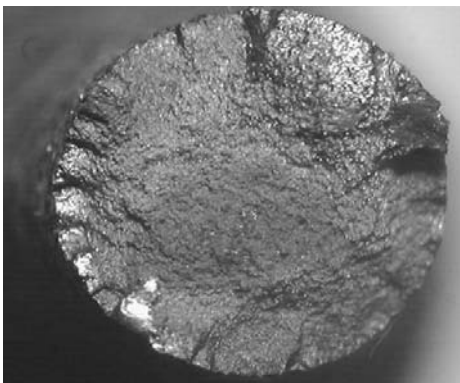


Figura 8. Superficie de fractura de la probeta chorreada con partículas de acero.

La figura 9 muestra varios escalones en la superficie de fractura de la probeta chorreada con partículas de acero, los cuales separan las áreas a lo largo de las cuales dos grietas se han propagado por fatiga. Los escalones se forman debido a propagación de dos grietas en diferentes planos que al encontrarse dejan escalones en la superficie. La periferia de la probeta presenta forma irregular debido a impacto de las partículas de acero. En la parte central de la probeta se aprecia una zona dúctil, con formación de microhoyuelos (*dimples*) producidos en la fractura final.

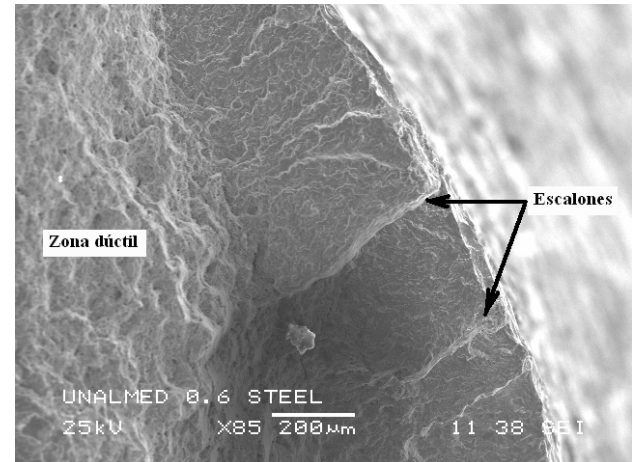


Figura 9. Escalones de fractura de la probeta chorreada con acero.

La figura 10 presenta la superficie de fractura de una probeta chorreada con arena. La flecha indica el origen y la dirección de propagación de una grieta por fatiga, donde se aprecia una zona deformada plásticamente a partir de la cual se propagó la fisura. La figura 11 muestra el espectro del microanálisis químico indicando rastro de arena dejado por las partículas al impactar sobre la superficie.

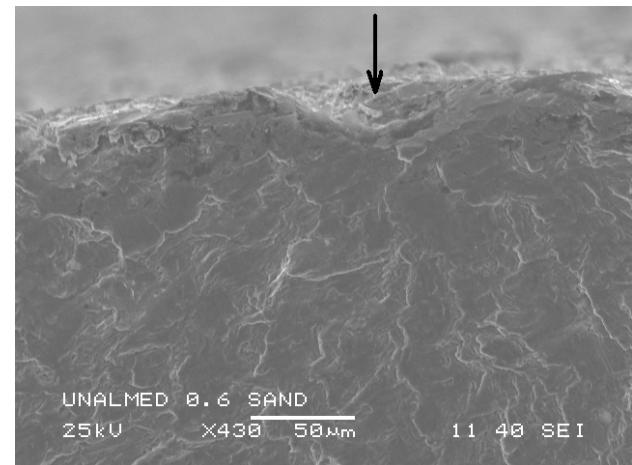


Figura 10. SEM de probeta chorreada con partículas arena.

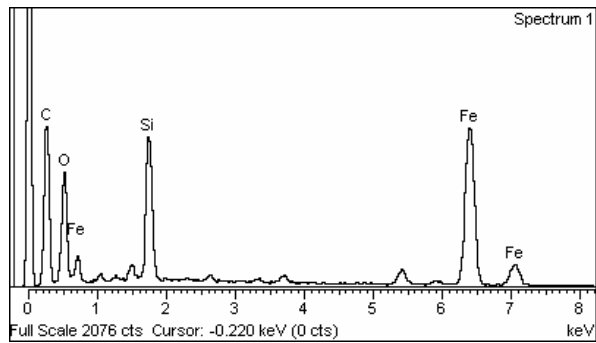


Figura 11. Microanálisis químico de la zona deformada

La figura 12 muestra la superficie de fractura de la probeta chorreada con alúmina, la flecha indica el origen y la dirección de propagación de la grieta por fatiga en una zona de deformación plástica. La figura 13 muestra el espectro del microanálisis químico indicando rastros de alúmina y sílice (contaminación durante el proceso de limpieza y preparación) dejado por las partículas al impactar sobre la superficie.

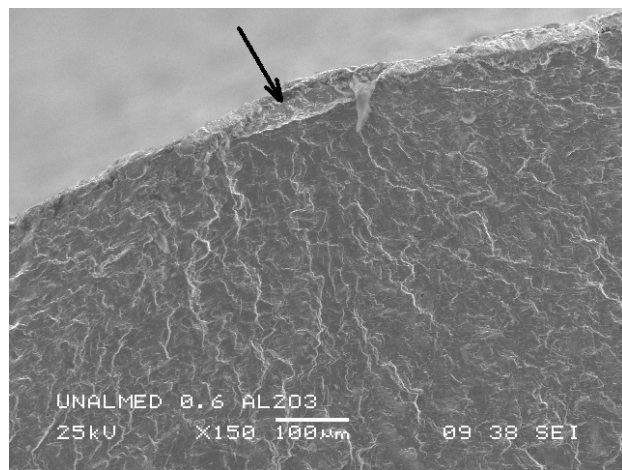


Figura 12. SEM de probeta chorreada con partículas alúmina.

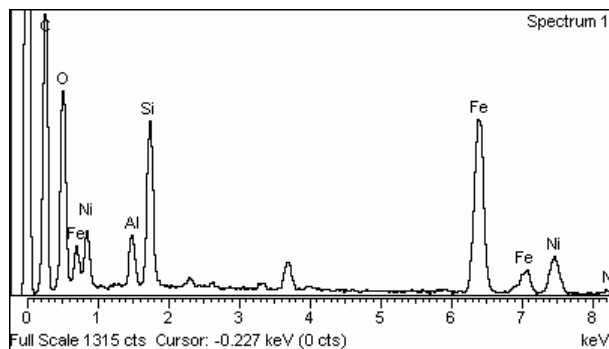


Figura 13. Microanálisis químico de la zona deformada (alúmina).

La figura 14 muestra la superficie de fractura de una muestra chorreada con acero. Las flechas indican el

origen y la dirección de propagación de una grieta por fatiga a partir de una zona deformada plásticamente, por las partículas de acero.

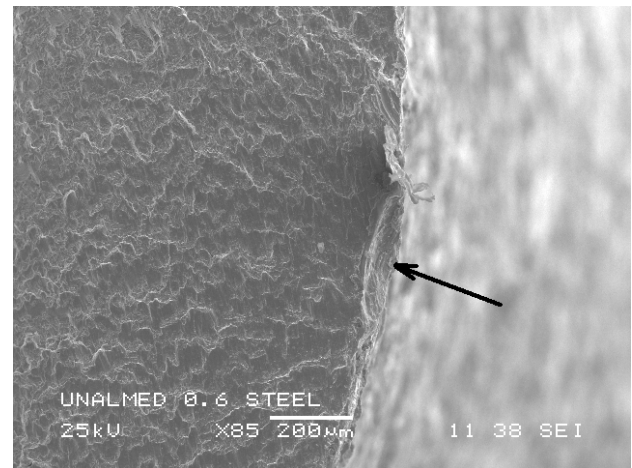


Figura 14. SEM de probeta chorreada con partículas acero.

Debido a que el mayor límite de resistencia a fatiga se presentó en las muestras preparadas con arena, este procedimiento de preparación superficial fue seleccionado como método de preparación para aplicar los recubrimientos. Las muestras fueron chorreadas con arena y se depositaron los recubrimientos usando rociado térmico por combustión. En la figura 15 se aprecia la sección transversal pulida de una probeta con recubrimiento, se identifican claramente el sustrato, la capa base y la capa exterior. La multicapa presentó estructura laminar, granos no fundidos, poros y óxidos.

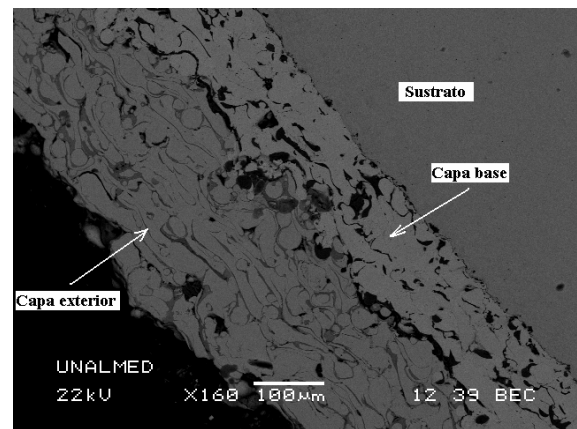


Figura 15. SEM de la multicapa y el sustrato.

La resistencia a fatiga de las muestras recubiertas disminuyó comparada con todas las condiciones superficiales estudiadas. Un tipo de falla encontrado en los recubrimientos fue delaminación de la capa base en la interfase con el sustrato (figura 16), otro tipo de falla se presentó debido a la concentración de esfuerzos por deformación plástica causada por las partículas de arena

en la superficie de las probetas y propagación de múltiples fisuras (figura 17).

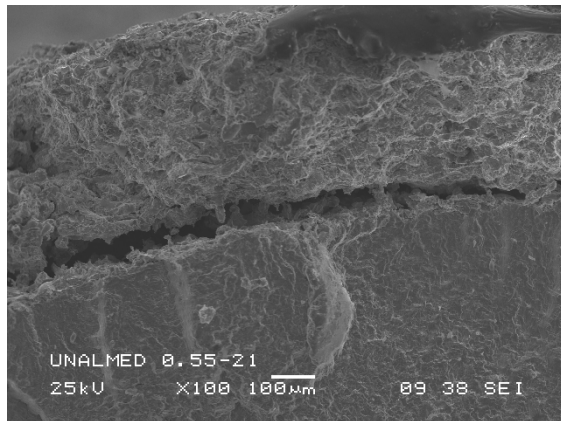


Figura 16. Delaminación del recubrimiento.

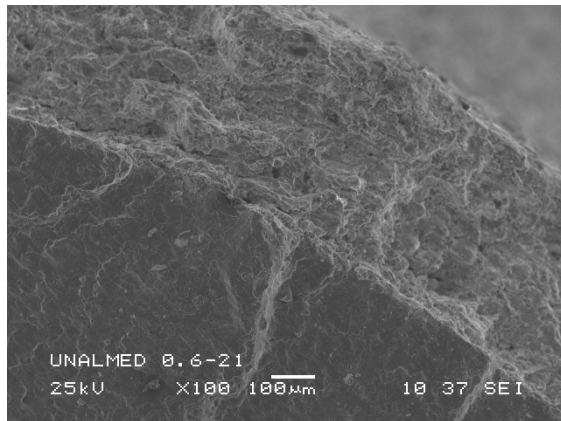


Figura 17. Propagación de fisuras de en una probeta que posee recubrimiento.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El límite de resistencia a la fatiga de las muestras preparadas con arena fue de 458,58 MPa y de las muestras preparadas con alúmina fue de 428,36 MPa, valores superiores a los presentados por las probetas pulidas y sin preparación superficial (422,00 MPa), debido a la inducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie de las probetas.

Las muestras preparadas con partículas de acero disminuyeron el límite de resistencia a fatiga (415,44 MPa) comparada con las probetas pulidas, debido a la excesiva deformación plástica causada por grandes partículas con esquinas agudas que dejaron marcas que actuaron como concentradores de esfuerzos y originaron la propagación simultánea de múltiples grietas por fatiga. Este efecto se superpuso a la generación de esfuerzos residuales de compresión.

Las probetas revestidas presentaron falla por delaminación en la interfase de la capa base con el sustrato, además fallaron por concentración de esfuerzos

causados por partículas de arena en la superficie que nuclearon múltiples grietas por fatiga.

En los procesos de preparación superficial no se deben reciclar las partículas abrasivas especialmente los perdigones de acero, ya que al fracturarse generan esquinas agudas produciendo severos concentradores de esfuerzos disminuyendo la resistencia a fatiga de los componentes mecánicos.

### 4. AGRADECIMIENTOS

A COLCIENCIAS, el Ingenio Manuelita, Juan Diego Pardo de la Compañía Sager S.A., John Jairo Josa estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, Sara Rodríguez de la Universidad de São Paulo (Brasil), Alejandro Toro y Felipe Santa de la Universidad Nacional de Medellín. A todos ellos muchas gracias por fomentar la investigación en Colombia.

### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SALINAS C., J.J. CORONADO., G. LATORRE, Evaluación de la Multicapa Ni, Al, Mo / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> Aplicada por el Proceso de Rociado Térmico por Combustión, *Tecnura*, 16, p.15-25, 2005.
- [2] CLARKE, D.R. AND PHILLPOT, S.R. Thermal Barrier Coating Materials, *Materials Today*, June, p.22-29, 2005.
- [3] MARANHO, O. Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente [Ph.D. Tese], São Paulo: Universidade de São Paulo, Brasil, 2006.
- [4] PADILLA, K., VELÁSQUEZ, A., BERRÍOS, J.A., PUCHI-CABRERA, E.S. Fatigue Behavior of a 4140 Steel Coated with a NiMoAl Deposit Applied by HVOF Thermal Spray, *Surface and Coating Technology*, Vol. 150, p.151-162, 2002.
- [5] HERNÁNDEZ, F., OLIVEIRA, J.A., BERRÍOS, C., VILLALOBOS, A., PERTUZ, E.S., PUCHI-CABRERA, E.S. Fatigue Properties of a 4340 Steel Coated with a Colmonoy 88 Deposit Applied by High-velocity Oxygen Fuel, *Surface and Coating Technology*, Vol. 133 p.68-77, 2000.
- [6] STEFFENS, H.D. WILDEN, J. NASSENSTEIN, K. MOBUS, S. Proc. 8<sup>th</sup> Nat. Thermal Spray Conf., Thermal Spray Science and Technology, ASM Internat, Materials Park, OH, USA, p.469, 1995.
- [7] AMERICAN WELDING SOCIETY. Thermal spraying: practice, theory, and application, Miami, 1985.
- [8] Lipson C., Narendra S. Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments. New York, McGraw-Hill, 1973.