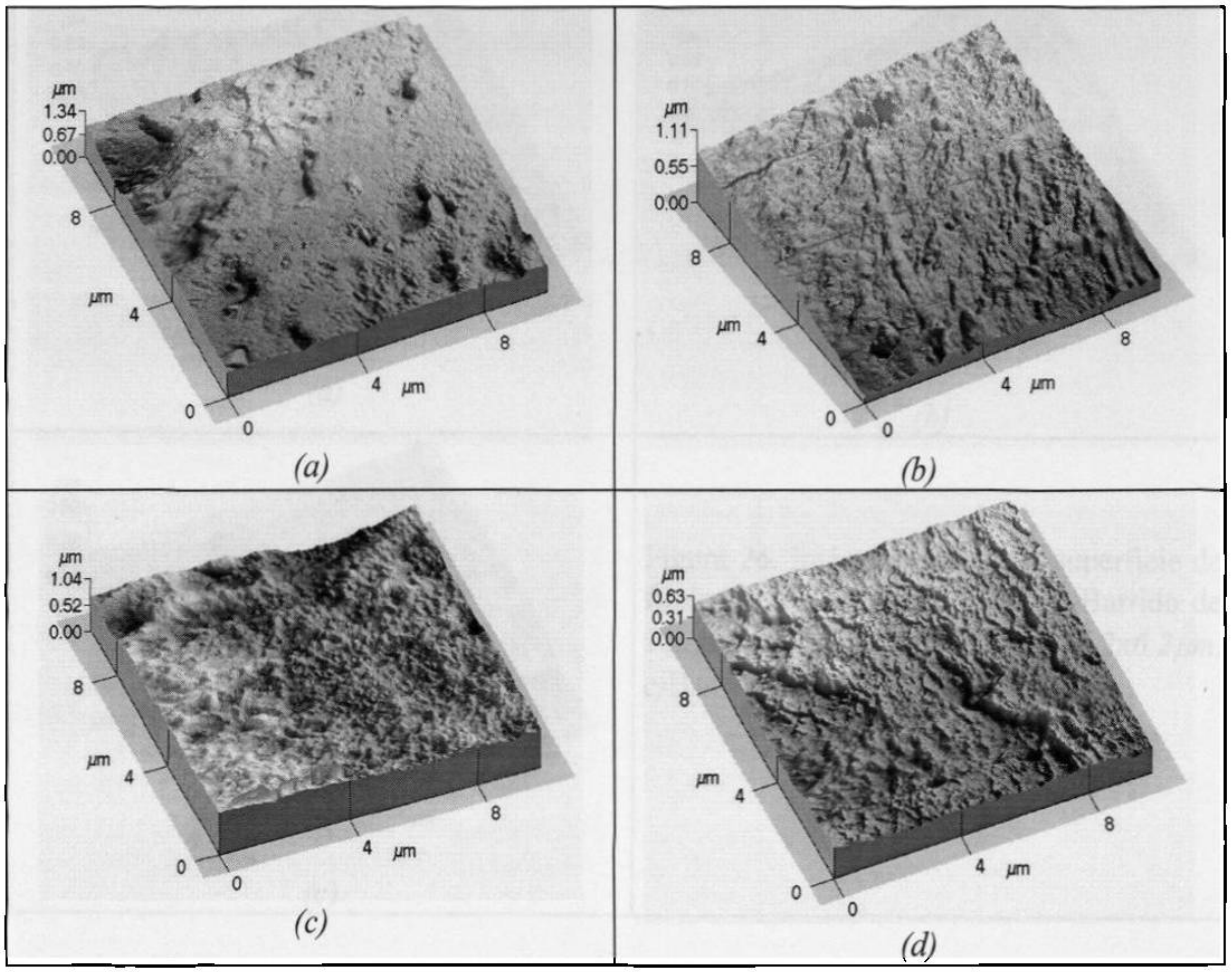

Figura *25*. Imágenes *3D* correspondientes a *4* zonas diferentes sobre una película de PS.

En la figura *26* se muestran *3* imágenes *3D* correspondientes a una misma zona sobre la superficie a *3* tamaños de barrido por parte del escáner, observándose que aunque disminuye el tamaño de barrido sigue apreciándose una superficie irregular carente de algún indicio que sugiera la presencia de un grado de cristalización. Aunque es posible obtener imágenes hasta un barrido por parte del escáner de *3x3µm*, a medida que disminuye el tamaño de barrido las imágenes pierden nitidez y claridad, sin embargo hasta *4x4µm* todavía es posible obtener una buena lectura de datos para generar las imágenes correspondientes.

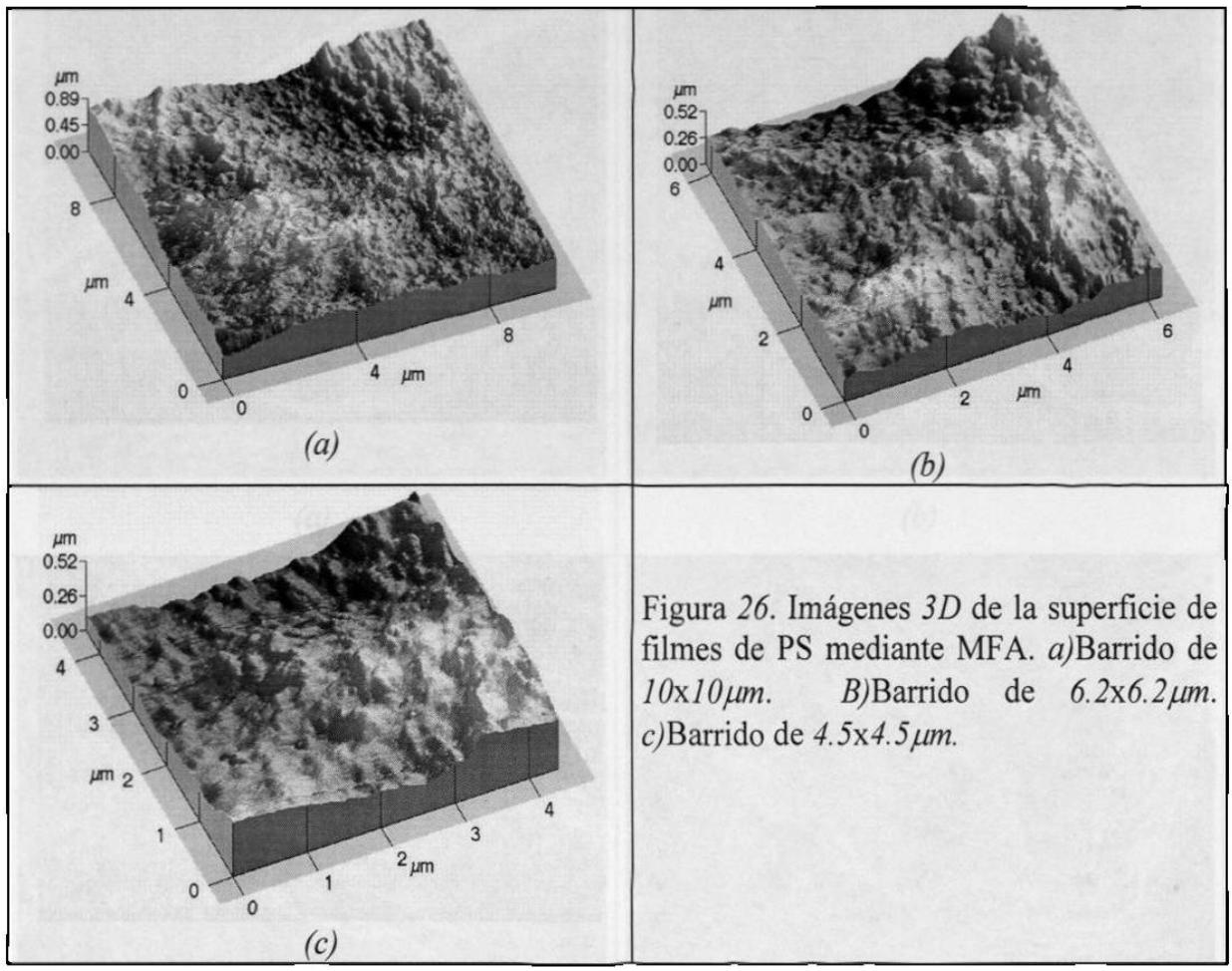

Figura *26*. Imágenes *3D* de la superficie de filmes de PS mediante MFA. *a)*Barrido de *10x10µm*. *B)*Barrido de *6.2x6.2µm*. *c)*Barrido de *4.5x4.5µm*.

4.3 Análisis de superficies de fractura

4.3.1 Microscopía electrónica de barrido

La fractografía de las superficies de fractura de los filamentos de i-PP y PS (muestras B) se llevó a cabo mediante SEM. Se observó su morfología y se evaluaron de manera cualitativa. Para el análisis cuantitativo se utilizó posteriormente MFA.

4.3.1.1 Polipropileno isotáctico

En la figura *27* se muestran *4* imágenes correspondientes a una superficie de fractura de i-PP a diferentes magnificaciones.

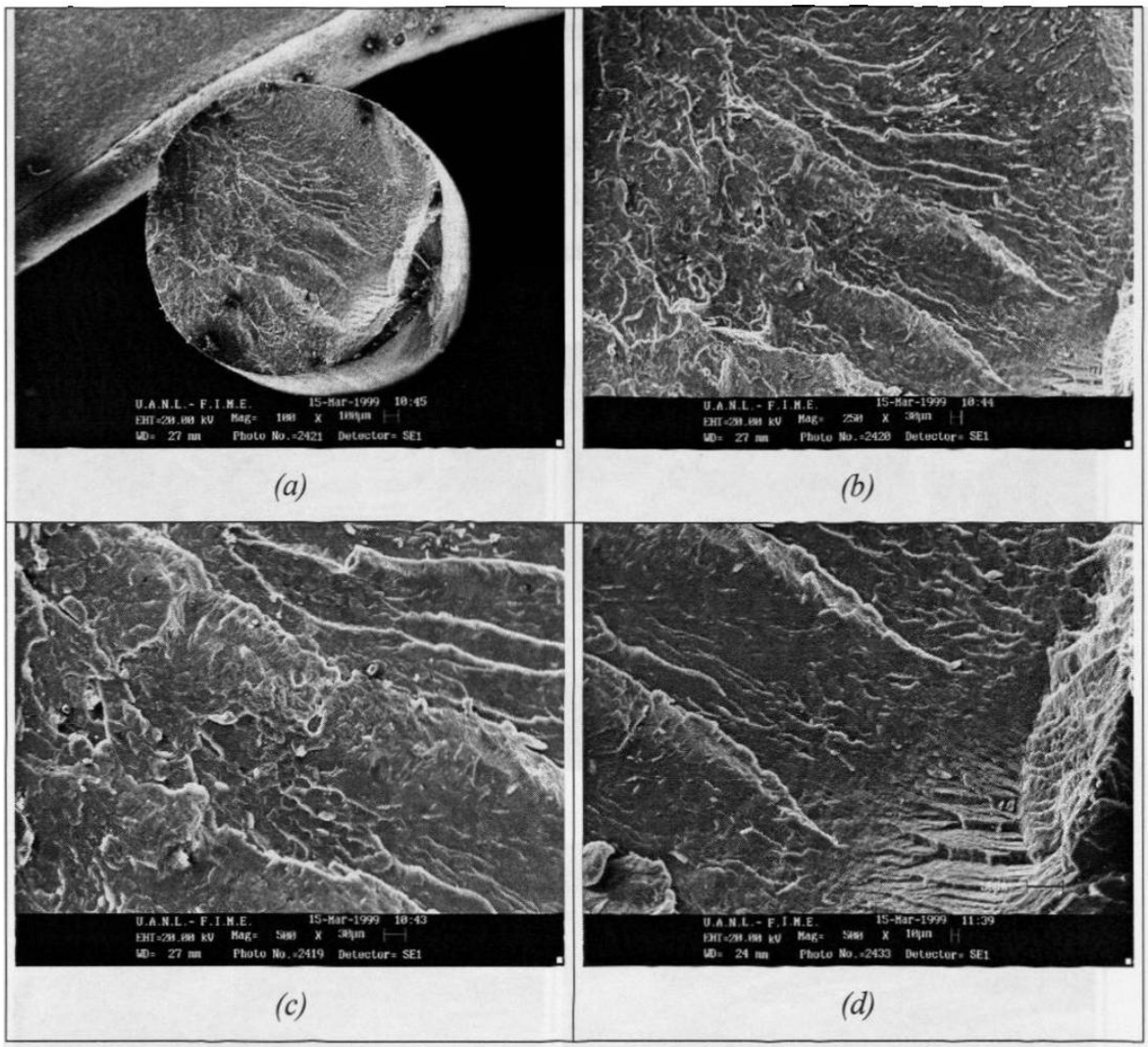

Figura *27*. Imágenes de Superficies de Fractura de i-PP, mediante MEB. *a)*100X. *b)*250X. *c)*500X. *d)*500X

En la figura *27a* se aprecia una serie de líneas blancas irregulares que se curvan y parecen tener inicio en una zona donde posiblemente se encontraba la grieta o las grietas que dieron lugar a la superficie de fractura. Esto en fractografía se conoce como marcas de Chevron[34], sirviendo para inferir la dirección de propagación de la grieta y por ende la posible localización del origen de la misma. En la figura *27b* y *27c* se observan de una manera más clara las marcas antes mencionadas. La figura *27d* presenta los mismos aumentos que la figura *27c* (500X), corresponde al extremo contrario de la zona donde posiblemente dio inicio la propagación de la grieta, se aprecia que en el extremo de las marcas de Chevron ocurre un cambio en la morfología de la superficie en cuestión. Se ha reportado que en superficies de fractura en ocasiones es posible observar la huella

que deja la propagación de grietas en diferentes planos, manifestándose como una especie de escalones, lo anterior se justifica argumentando la imposibilidad de que las grietas preexistentes en un material se propaguen todas en un mismo plano[34], sobre todo cuando se trata de fractura no controlada, en las figuras *28* se aprecia este fenómeno de una manera más clara, manteniéndose dicha morfología inclusive a magnificaciones mayores de la figura *27d.*

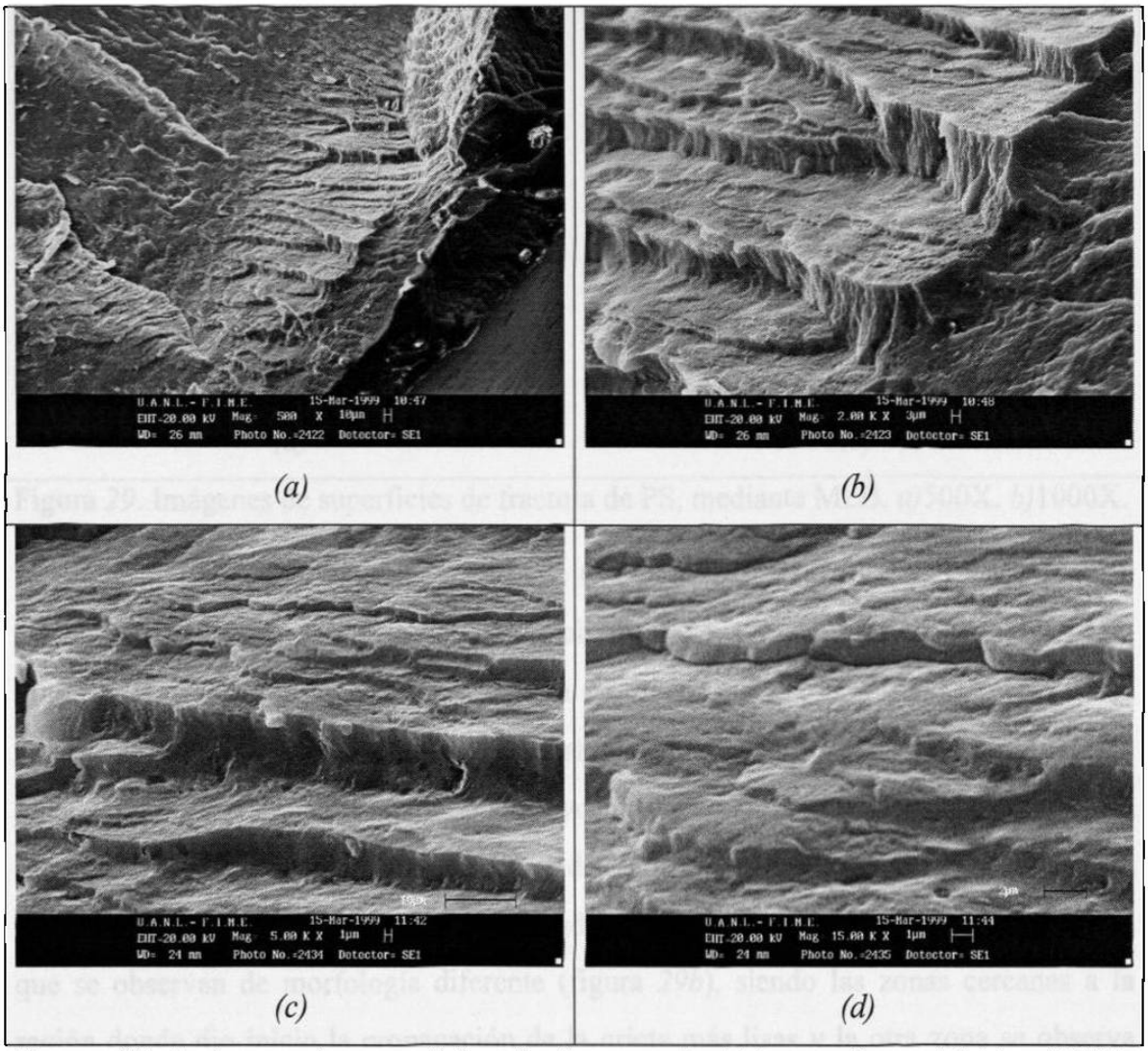

Figura *28.* Imágenes de superficies de fractura de i-PP, mediante MEB. *a)*500X. *b)*2000X. *c)*5000X. *d)*15000X.

En general podemos decir que en todas las superficies de fractura analizadas para esta muestra se observan morfologías similares, inclusive a diferentes magnificaciones. Lo anterior es un indicador cualitativo de que dichas superficies presentan un comportamiento autoafín.

4.3.1.2 Poliestireno

En la figura *29* se muestran *2* imágenes a diferente magnificación correspondientes a una superficie de fractura en la zona donde inicio la propagación de la grieta que originó la superficie de fractura. Las marcas de Chevron se observan con una orientación radial con respecto a dicha zona.

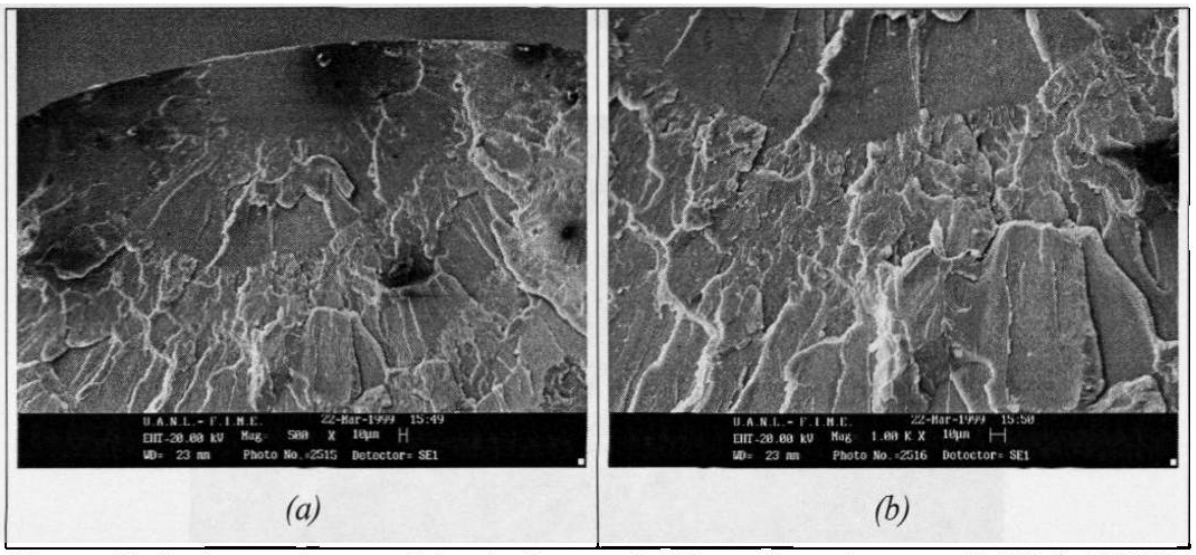

Figura *29*. Imágenes de superficies de fractura de PS, mediante MEB. *a)*500X. *b)*1000X.

A diferencia del i-PP, las marcas de Chevron se observan menos curvadas y las zonas entre éstas son más lisas, además se observa que en la zona donde probablemente inicio la propagación de la grieta éstas ya no se distinguen, esto puede deberse a la naturaleza amorfa del PS y a que probablemente existen menos heterogeneidades microestructurales en este material que provocan que la propagación del frente de grieta sea menos irregular. Sin embargo, después de cierta distancia de propagación se observa una morfología más irregular. Distinguiéndose sobre la superficie de fractura *2* zonas que se observan de morfología diferente (figura *29b*), siendo las zonas cercanas a la región donde dio inicio la propagación de la grieta más lisas y la otra zona se observa más irregular. En la figura *30* se logra apreciar éstas *2* zonas. Este tipo de morfología de superficie de fractura se ha reportado en materiales totalmente amorfos, como el vidrio[35], en la que la zona más lisa se le conoce como zona espejo y la otra zona se le conoce como zona Hackle, la presencia de estas *2* regiones se explica sobre la base de que cuando la velocidad de propagación de la grieta alcanza su valor máximo, la energía que se está liberando en el transcurso de la fractura, ya no puede ser utilizada para incrementar la velocidad de propagación de la grieta, entonces dicha energía es utilizada

para desarrollar otros mecanismos de propagación, obteniéndose morfologías diferentes que se caracterizan por ser más irregulares que la obtenida en la zona espejo. El tamaño de estas zonas está directamente relacionado con el esfuerzo que genera la fractura, además se ha demostrado que el frente de grieta se propaga como si el material fuese de tamaño infinito, por lo que la presencia o no de dichas zonas en materiales como el vidrio o cerámicos depende del tamaño de éstos.

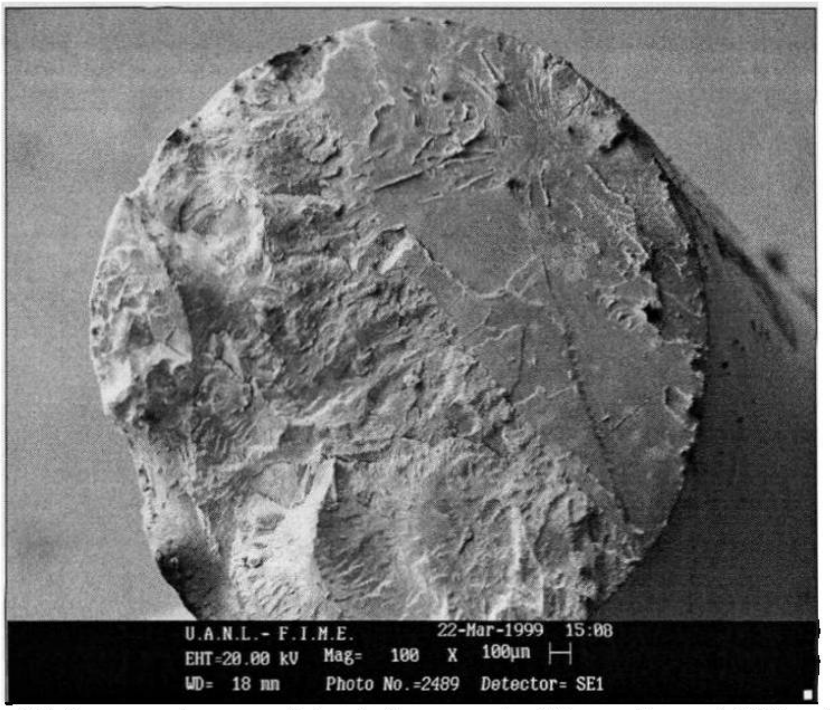

Figura *30*. Imagen de superficie de fractura de PS, mediante MEB a 100X.

En el vidrio entre las *2* zonas antes mencionadas existe una zona de transición conocida como zona difusa, la cual se forma debido a un proceso de nucleación de grietas, en las superficies de fractura de PS dicha zona no se distingue, probablemente debido a la preexistencia de grietas en el material, por lo que no es necesario un proceso de nucleación de grietas.

En la figura *31* se presentan imágenes correspondientes a la zona más irregular antes mencionada, a mayores magnificaciones.

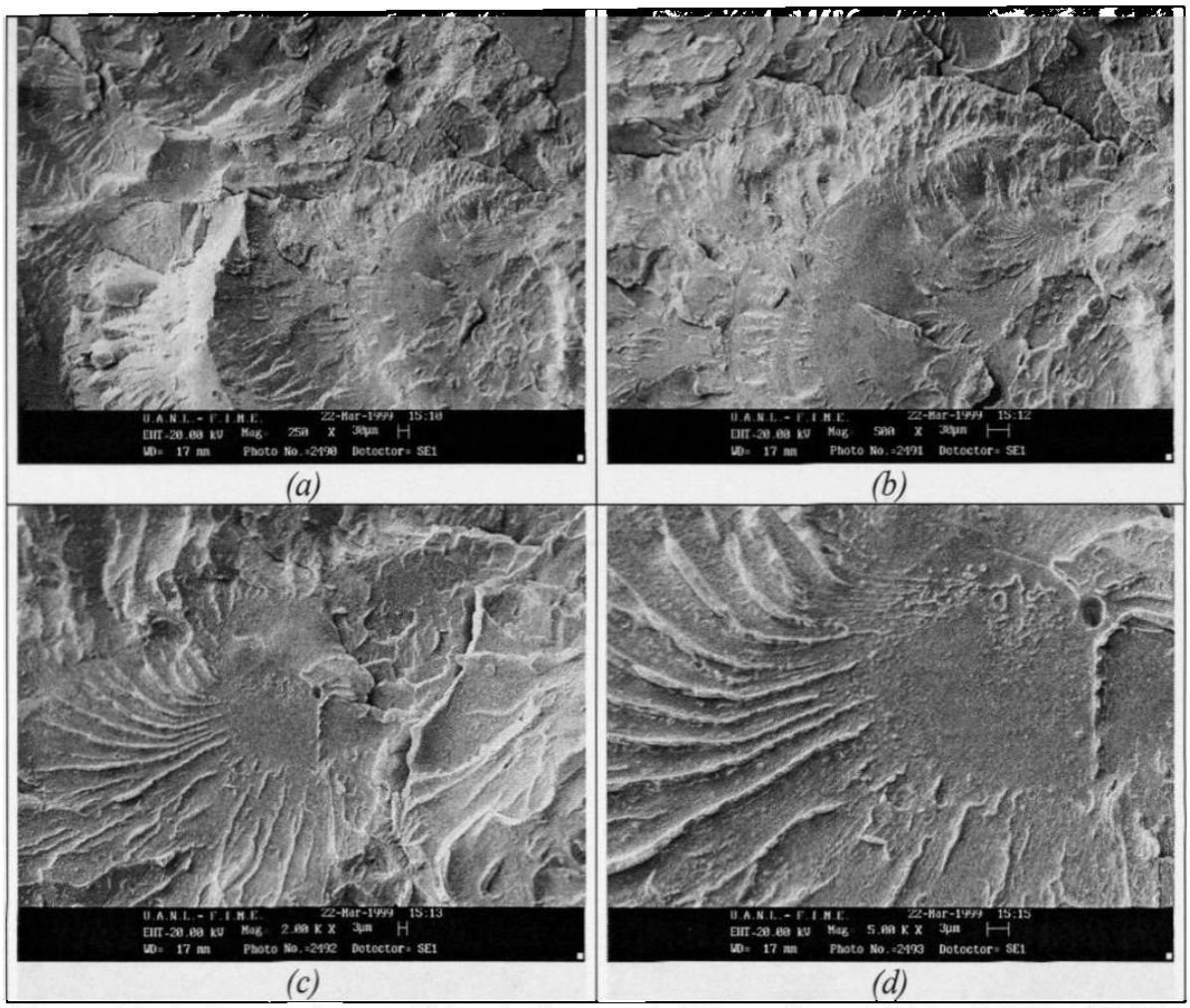

Figura *31*. Imágenes de superficies de fractura de PS, mediante MEB. *a)*250X. *b)*500X. *c)*2000X. *d)*5000X.

En las figuras *31c* y *31d* se logra observar un pequeño poro o defecto de extrusión, el cual al momento de aplicar la carga se comportó como una grieta de gran tamaño, propagándose a través del material. Es posible observar la dirección que ésta siguió, a través de las marcas de Chevron, observándose éstas como líneas gruesas blancas, irregulares y curvadas que aparentemente convergen en el poro. Sin embargo en la zona muy cercana a éste, dichas marcas no se logran apreciar, correspondiendo a dicha zona a lo que se conoce como zona espejo.

La figura *32* muestra que también se presenta la morfología en forma de escalones para el PS, distinguiéndose de manera más clara a magnificaciones mayores a 500X.

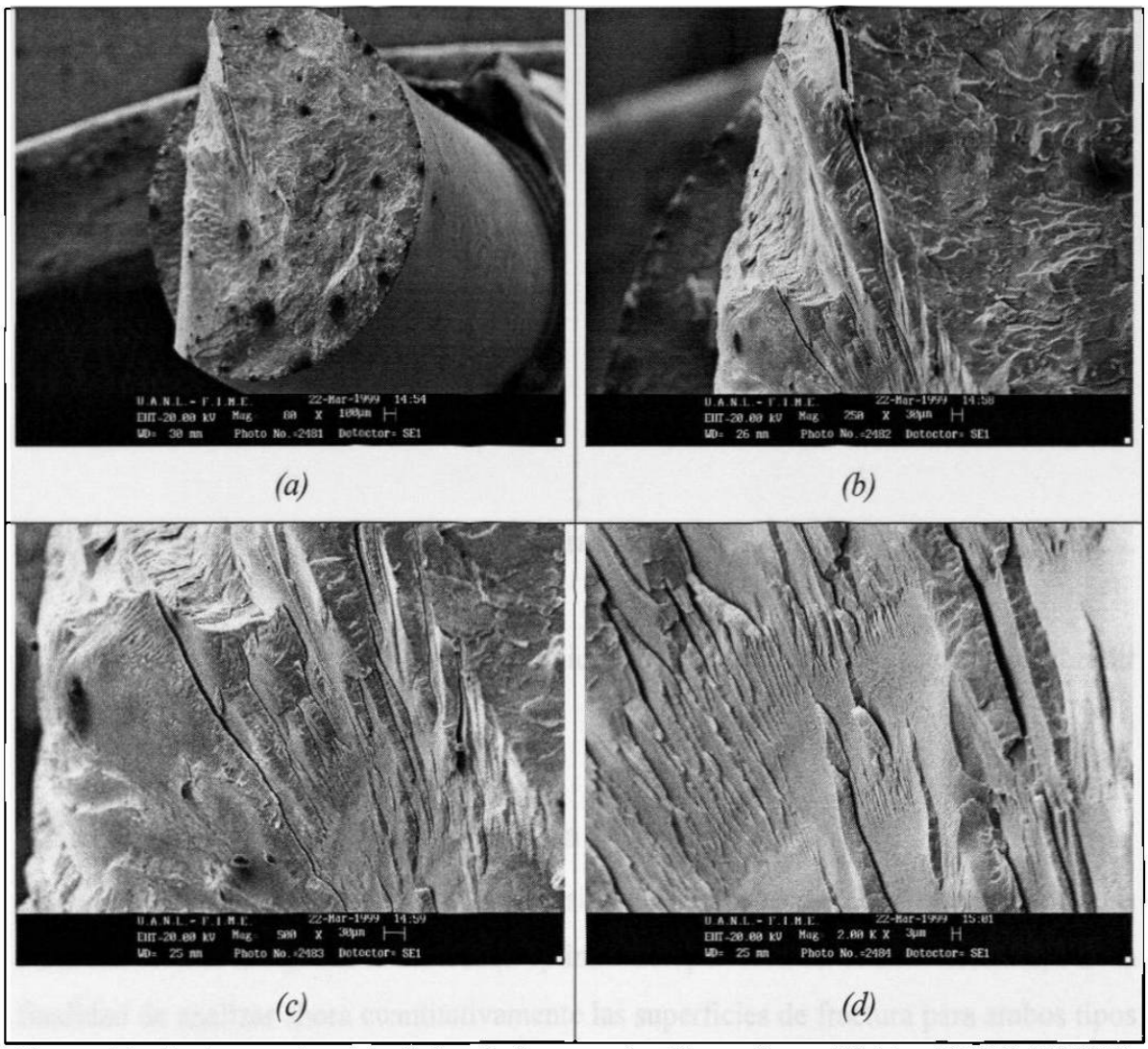

Figura *32.* Imágenes de superficies de fractura de PS, mediante MEB. *a)*100X. *b)*250X. *c)*500X. *d)*2000X.

La figura *33a* y *33b* corresponden a una zona de la figura *32d* a mayores magnificaciones. Se distinguen una serie de morfologías similares a lo que se ha reportado como morfologías de "parche" y que son el resultado de la remoción de "parches aislados" de material plástico[34]. Esto se debe a la presencia de regiones en que cadenas del polímero tienen en conjunto una orientación perpendicular a la carga que genera la fractura, desprendiéndose éstas y generándose de está manera dichos "parches".

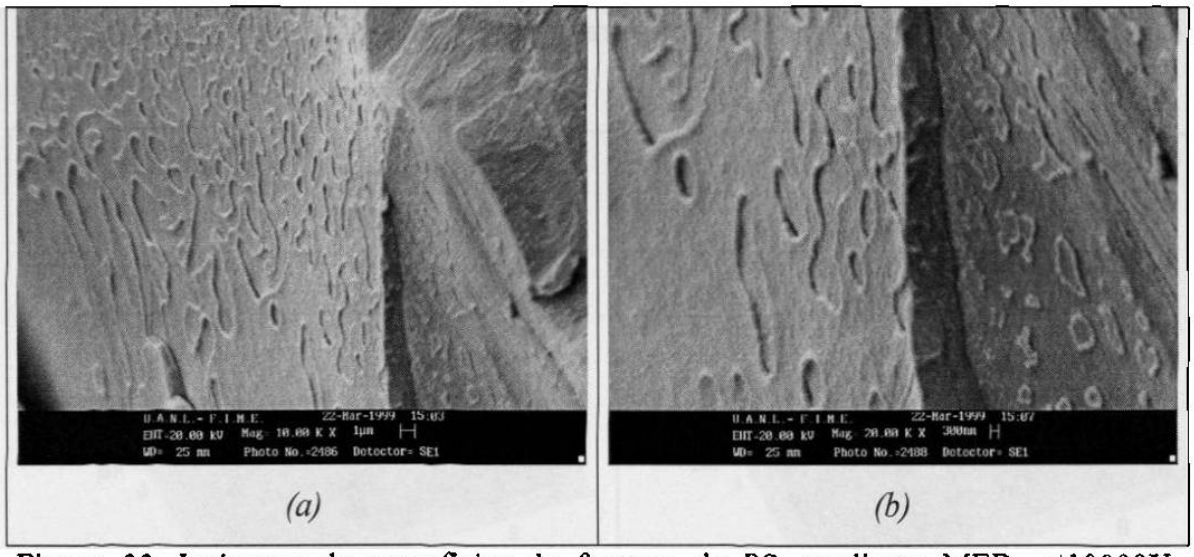

Figura *33*. Imágenes de superficies de fractura de PS, mediante MEB. *a)*10000X. *b)*20000X.

Debido al elevado grado de cristalinidad que presenta el i-PP, es difícil encontrar lo anterior en sus superficies de fractura.

4.3.2 Microscopía de fuerza atómica

Muestras de superficies de fractura sin recubrimiento metálico fueron analizadas mediante C-MFA, bajo las condiciones óptimas de operación antes mencionadas, con la finalidad de analizar ahora cuantitativamente las superficies de fractura para ambos tipos de materiales.

4.3.2.1 Polipropileno isotáctico

La figura *34* muestra imágenes *3D* que revelan la irregularidad que caracteriza a las superficies de fractura de i-PP, en 4 zonas diferentes a través de un área de barrido de $10\mu m$ x $10\mu m$. En la figura *34d* se logra observar una morfología con orientación radial que es muy parecida a lo que se ha reportado en imágenes obtenidas mediante MEB para materiales poliméricos semicristalinos fracturados bajo condiciones mínimas de viscoelasticidad, como la propagación de la grieta a través de una esferulita, generándose este tipo de morfología sobre la superficie de fractura[34].

Imágenes no mostradas aquí muestran que al efectuar barridos de menor tamaño sobre cada una de estas zonas se siguen observando detalles que reflejan la irregularidad

de dichas superficies, esto puede considerarse como indicador cualitativo de que existe autoafinidad.

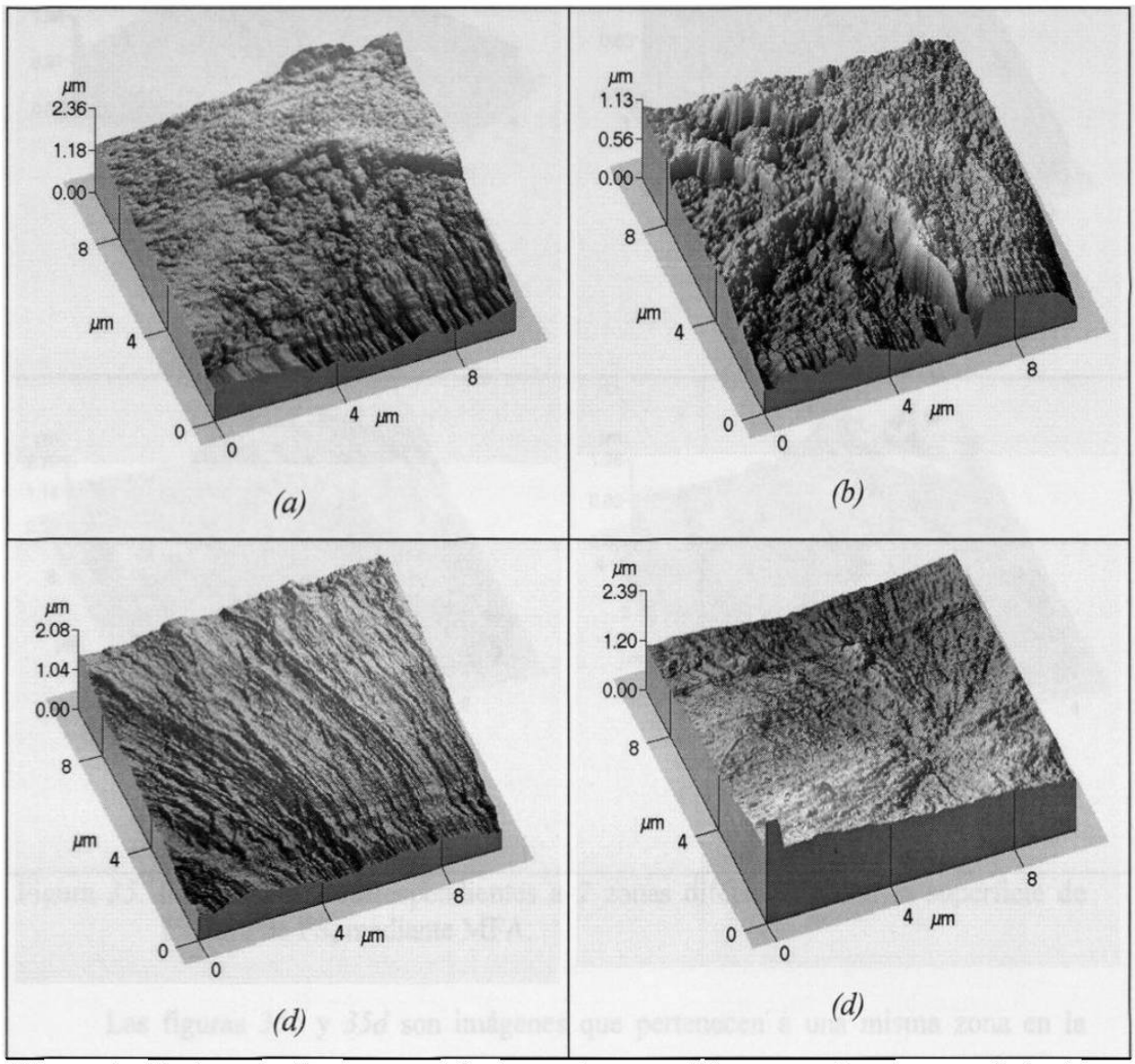

Figura *34*. Imágenes *3D* correspondientes a 4 zonas diferentes sobre la superficie de fractura de i-PP mediante MFA.

4.3.2.2 Poliestireno

En la figura *35* se muestra la irregularidad que es el resultado del proceso de fractura para el Poliestireno. La figuras *35a* y *35b* pertenecen a una misma región a tamaños de barrido de *10µm* x *10µm* y de *3.5µm* x *3.5µm*, estas imágenes corresponden a la zona menos irregular que se observó en las imágenes mediante MEB.

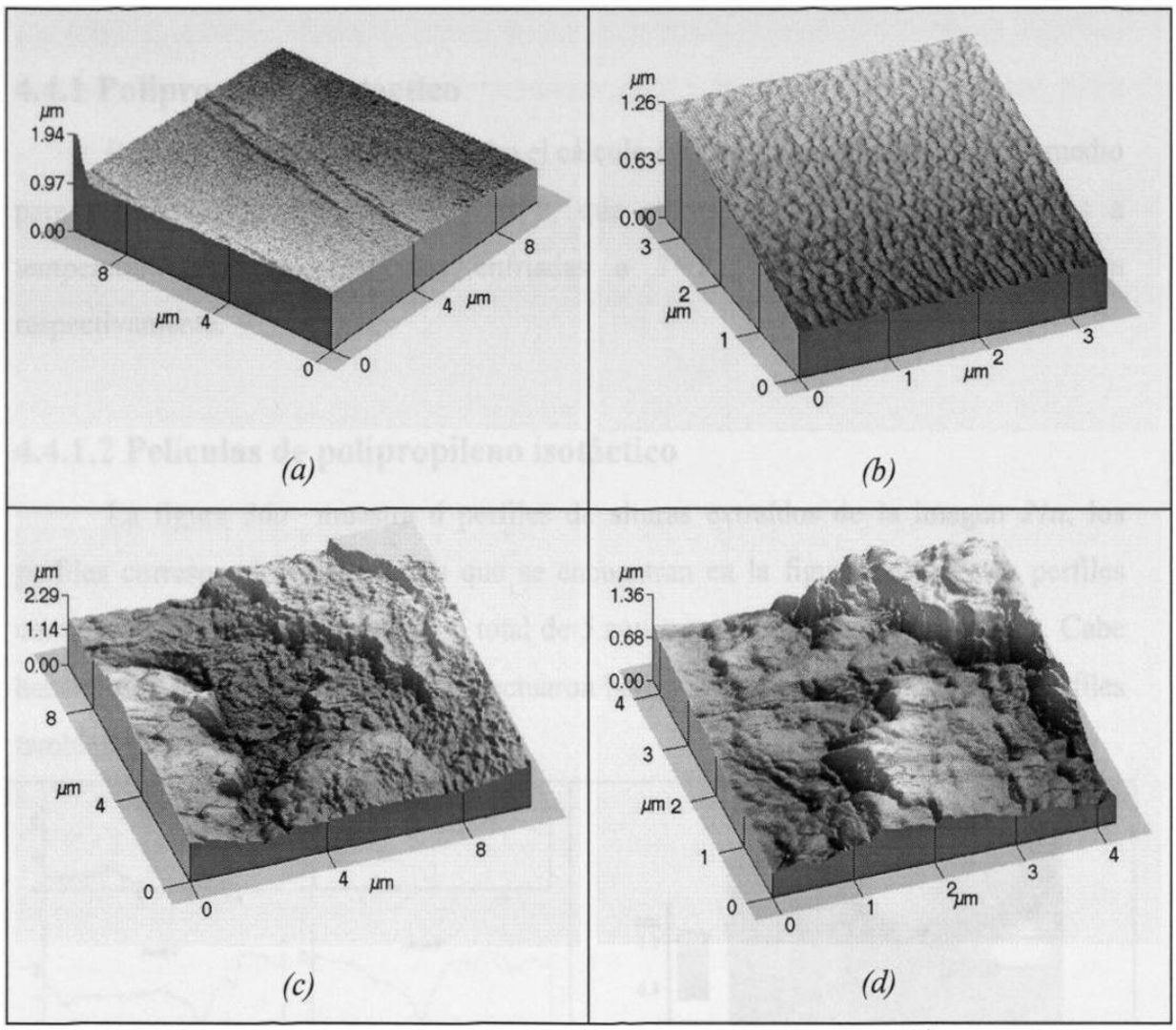

Figura *35*. Imágenes *3D* correspondientes a *2* zonas diferentes sobre la superficie de fractura de PS, mediante MFA.

Las figuras *35c* y *35d* son imágenes que pertenecen a una misma zona en la región más irregular de la superficie de fractura.

En general podemos decir que en las zonas más lisas se observa cierto grado de irregularidad superficial a barridos menores de *5x5µm*. Para la otra zona, se sigue observándose irregular, esto se puede considerar como un indicador cualitativo de que las superficies de fractura en ambas zonas presentan autoafinidad.

4.4 Análisis de autoafinidad

Mediante el método de ventanas de ancho variable se estimó el exponente de rugosidad promedio para superficies de i-PP y PS tanto para las películas como para las superficies de fractura, a continuación se muestran los resultados obtenidos.

4.4.1 Polipropileno isotáctico

Para este material se llevó a cabo el cálculo del exponente de rugosidad promedio para las muestras APP1, APP2 y BPP, que corresponde a películas enfriadas a temperatura ambiente, películas enfriadas a $T=1^oC$ y superficies de fractura respectivamente.

4.4.1.2 Películas de polipropileno isotáctico

La figura *36a* muestra *6* perfiles de alturas extraídos de la imagen *21a*, los perfiles corresponden a las líneas que se encuentran en la figura *36b*. Estos perfiles corresponden a una sola zona de un total de *5* zonas analizadas para esta muestra. Cabe hacer mención que en cada zona se efectuaron barridos de menor tamaño, cuyos perfiles también fueron analizados.

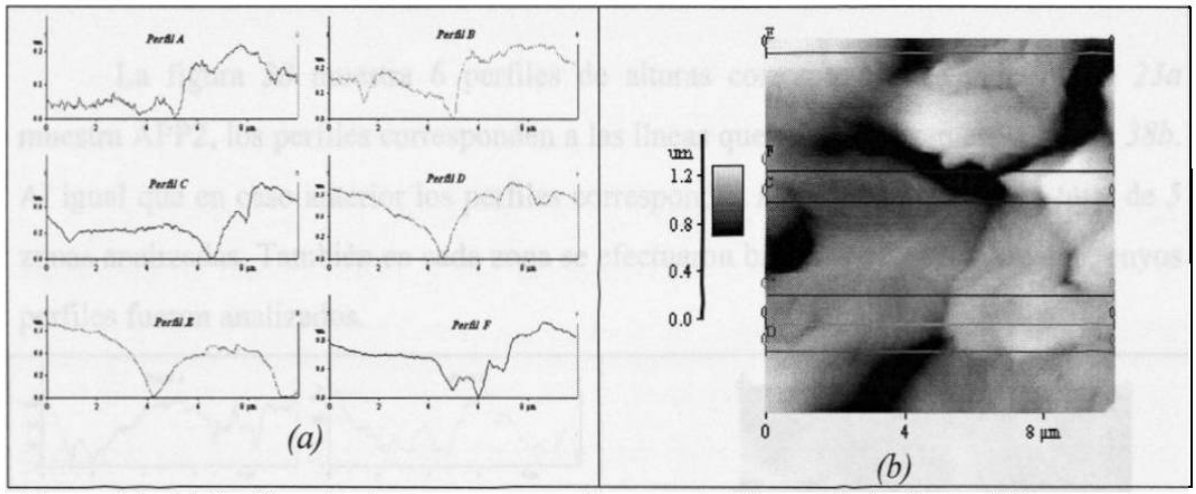

Figura *36*. *(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *36b*.
(b) Imagen 2D correspondiente a la figura *21a*.

En la figura *37* se muestra el gráfico de Z_{max} vs r en escala log-log para todos los perfiles de alturas analizados, correspondientes a todas las zonas para la muestra APP1. La regresión lineal efectuada sobre el gráfico nos refleja que el valor del exponente de rugosidad promedio para esta muestra fue de *0.789* con una desviación estándar de *0.019*. Es decir que el crecimiento esferulítico del i-PP genera una superficie cuya rugosidad o irregularidad presenta un comportamiento autoafín. Dicho comportamiento se mantiene a lo largo de una longitud que va desde $0.01\mu m$ hasta $1.0\mu m$, sin que esto

signifique que dicho comportamiento, solo esté presente entre estos valores de longitud, sino más bien el MFA nos permite observar solo en éste intervalo de longitud dicho comportamiento.

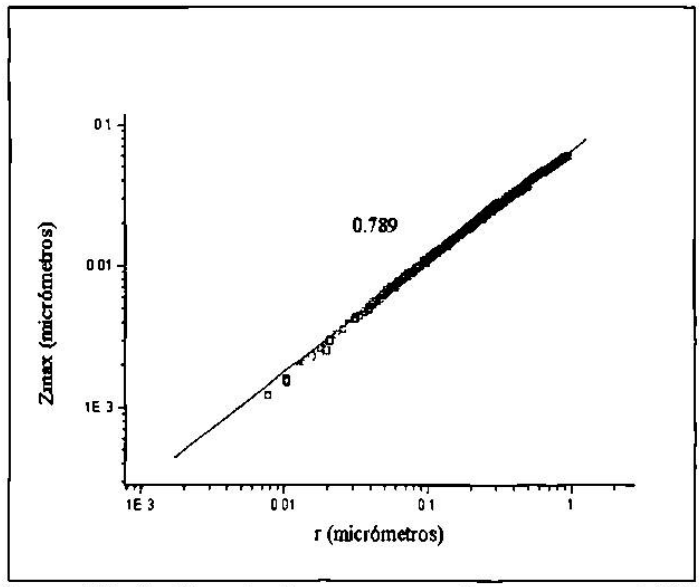

Figura *37*. Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras APP1.

La figura *38* muestra 6 perfiles de alturas correspondientes a la figura *23a* muestra APP2, los perfiles corresponden a las líneas que se encuentran en la figura *38b*. Al igual que en caso anterior los perfiles corresponden a una sola zona de un total de *5* zonas analizadas. También en cada zona se efectuaron barridos de menor tamaño, cuyos perfiles fueron analizados.

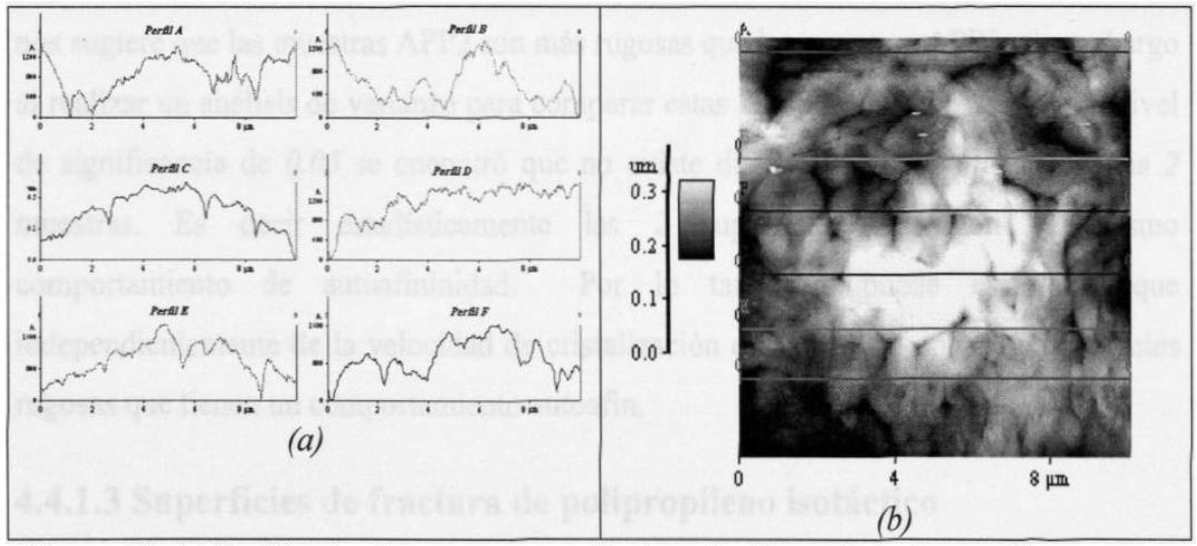

Figura *38*. *(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *38b*.
(b) Imagen *2D* correspondiente a la figura *23a* (APP2).

El mismo análisis efectuado ahora sobre esta muestra APP2 nos arroja como resultado un exponente de rugosidad de *0.817* con una desviación estándar de *0.013*. En la figura *39* se muestra el gráfico correspondiente al análisis de autoafinidad para este tipo de muestra y al igual que para la anterior el comportamiento autoafin encontrado se presenta en todo el rango de longitud que nos permite observar el microscopio, es decir desde $0.01\mu m$ hasta $1.0\mu m$.

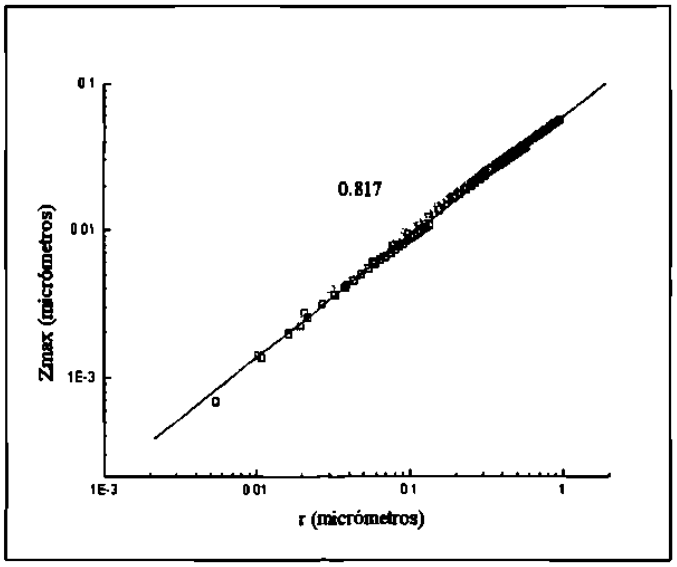

Figura *39*. Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras APP2.

A medida que el exponente de rugosidad disminuye la rugosidad de las superficies es mucho mayor y por el contrario cuando el exponente tiende a *1* la rugosidad de las superficies disminuye es decir las superficies son planas. Lo anterior nos sugiere que las muestras APP2 son más rugosas que las muestras APP1, sin embargo al realizar un análisis de varianza para comparar estas *2* poblaciones de datos a un nivel de significancia de *0.05* se encontró que no existe diferencia significativa entre las *2* muestras. Es decir estadísticamente las *2* superficies presentan el mismo comportamiento de autoafininidad. Por lo tanto se puede establecer que independientemente de la velocidad de cristalización empleada, se obtienen superficies rugosas que tienen un comportamiento autoafin.

4.4.1.3 Superficies de fractura de polipropileno isotáctico

La figura *40* muestra 6 perfiles de alturas correspondientes a la figura *34a* los perfiles corresponden a las líneas que se encuentran en la figura *40b*. Estos perfiles

corresponden a una sola zona de un total de *5* zonas analizadas. En cada zona se efectuaron barridos de menor tamaño, cuyos perfiles también fueron analizados.

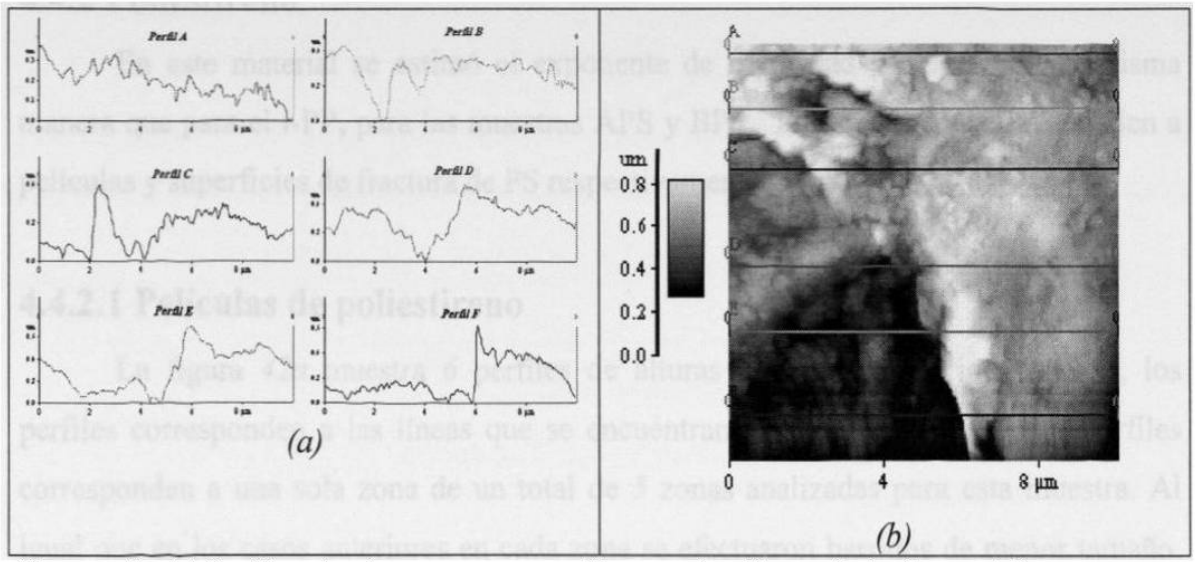

Figura *40*. *(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *40b*.
(b) Imagen 2D correspondiente a la figura *34b*.

El exponente de rugosidad calculado para estas muestras fue de *0.788* con una desviación estándar de *0.008*, a lo largo de una longitud que va desde $0.01\mu m$ hasta $1.0\mu m$,. En la figura *41* se muestra el gráfico de de Z_{max} vs r en escala logarítmica correspondiente a esta muestra.

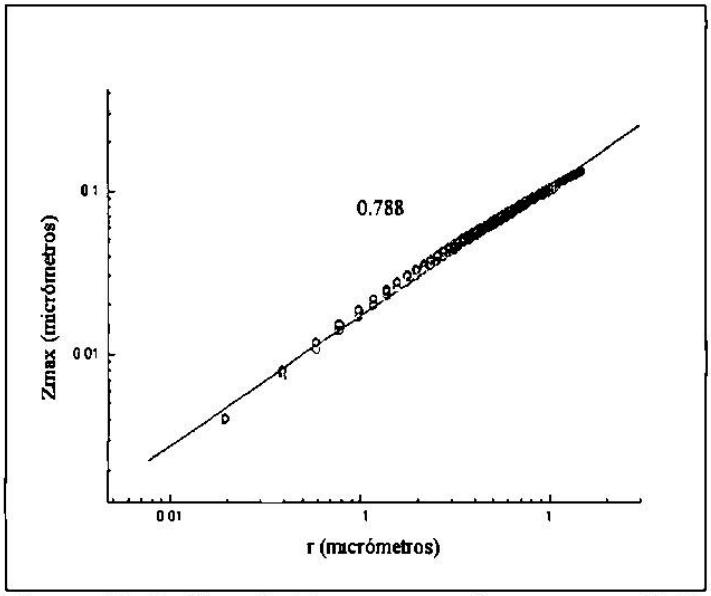

Figura *41*. Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras BPP.

En todos los perfiles analizados, no se encontró dependencia del exponente de rugosidad con respecto a alguna dirección en particular de dichos perfiles sobre la superficie de fractura.

4.4.2 Poliestireno

En este material se estimó el exponente de rugosidad promedio de la misma manera que para el i-PP, para las muestras APS y BPS. Estas muestras corresponden a películas y superficies de fractura de PS respectivamente.

4.4.2.1 Películas de poliestireno

La figura *42a* muestra *6* perfiles de alturas extraídos de la imagen *25d*, los perfiles corresponden a las líneas que se encuentran en la figura *42b*. Estos perfiles corresponden a una sola zona de un total de *5* zonas analizadas para esta muestra. Al igual que en los casos anteriores en cada zona se efectuaron barridos de menor tamaño, cuyos perfiles también fueron analizados.

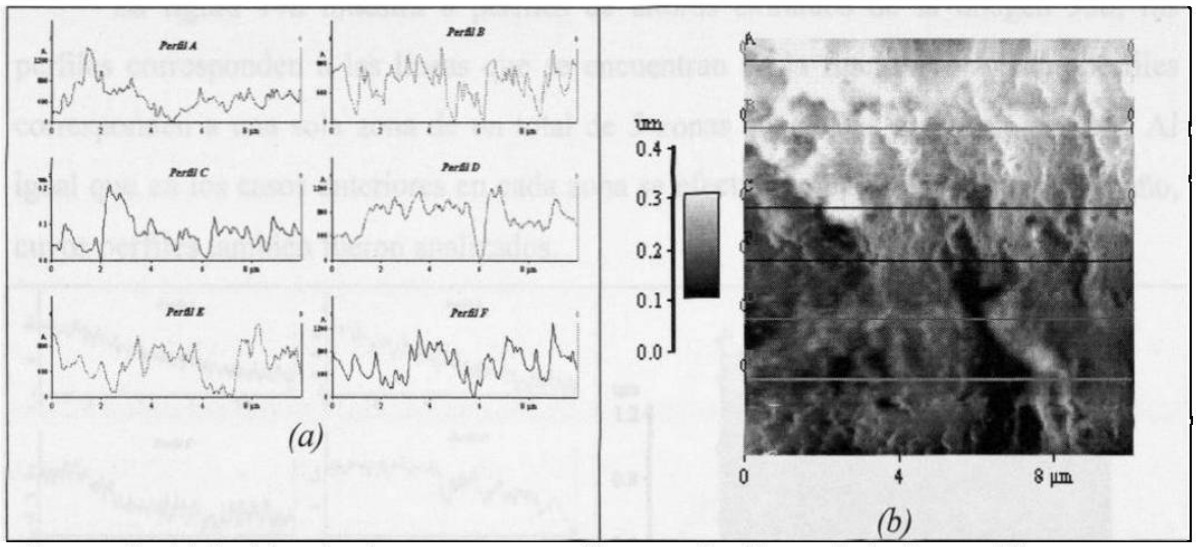

Figura *42*. *(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *42b*.
(b) Imagen 2D correspondiente a la figura *25d*.

En la figura *43* se muestra el gráfico de Z_{max} vs r en escala log-log para la muestra APS. La regresión lineal efectuada sobre el gráfico nos refleja que el valor del exponente de rugosidad promedio para esta muestra fue de *0.808* con una desviación estándar de *0.013*, este comportamiento se mantiene desde $0.02\mu m$ hasta $1.0\mu m$. Este comportamiento muy probablemente está asociado a la historia de proceso en la manufactura de las películas y al enfriamiento a la que fue sometida.

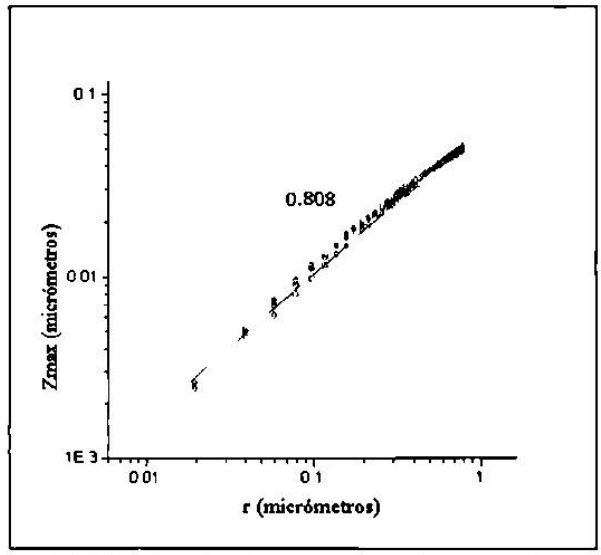

Figura *43*. Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras APS.

4.4.2.2 Superficies de fractura de poliestireno

La figura *44a* muestra *6* perfiles de alturas extraídos de la imagen *35a*, los perfiles corresponden a las líneas que se encuentran en la figura *44b*. Estos perfiles corresponden a una sola zona de un total de *5* zonas analizadas para esta muestra. Al igual que en los casos anteriores en cada zona se efectuaron barridos de menor tamaño, cuyos perfiles también fueron analizados.

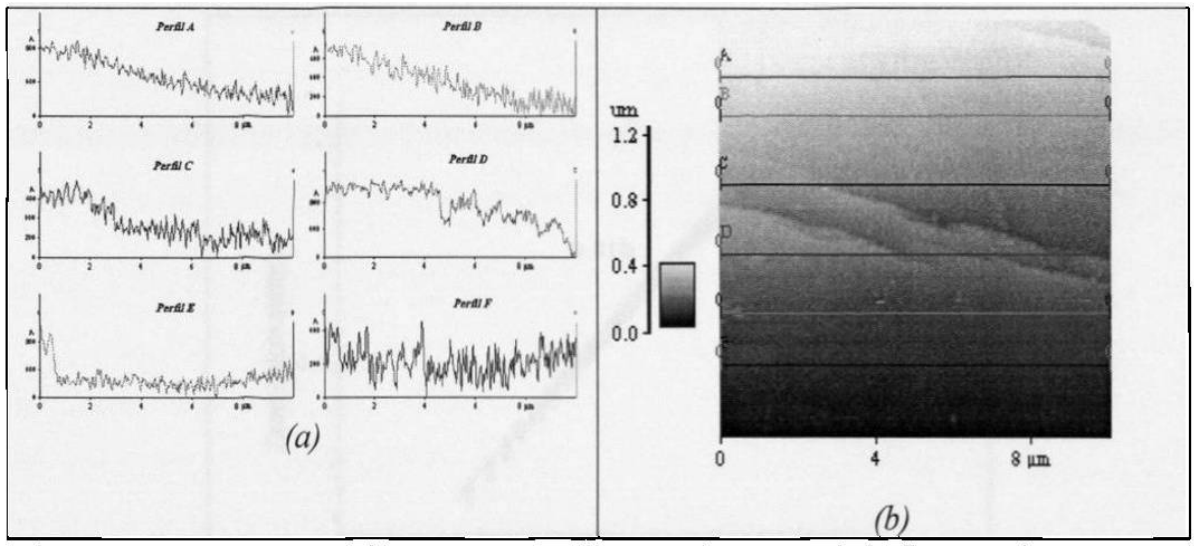

Figura *44*. *(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *44b*.
(b) Imagen 2D correspondiente a la figura *35a*.

Para esta muestra también se calculó el exponente de rugosidad promedio obteniéndose un valor de *0.805* con una desviación estándar de *0.023*, a lo largo de una longitud que va desde $0.002\mu m$ hasta $0.1\mu m$, para las zonas menos irregulares sobre la

superficie de fractura. En la figura *45* se muestra el gráfico de Z_{max} vs r en escala log-log correspondiente para esta zona de la muestra.

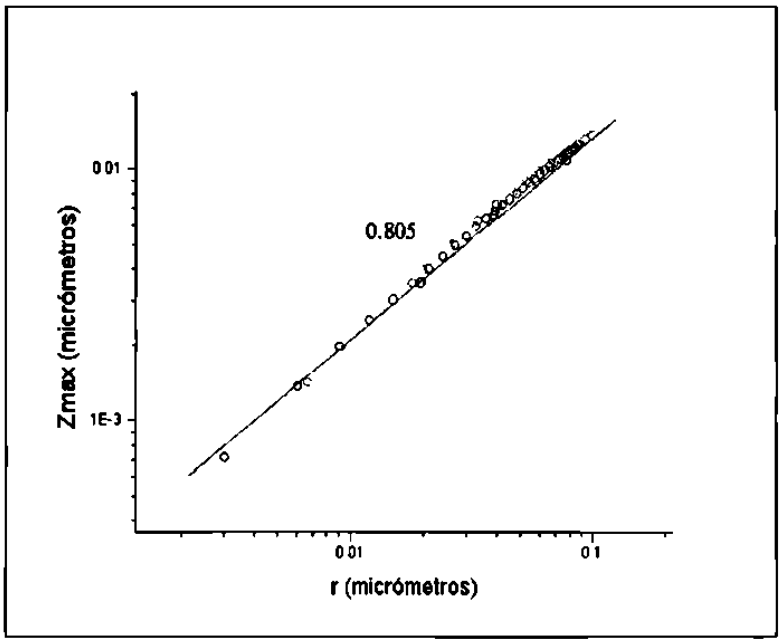

Figura *45*. Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras BPS, correspondiente a las zonas menos irregulares.

De la misma manera se efectúo un análisis en las zonas más irregulares (zona Hackel) de esta superficie de fractura. En la figura *46* se muestra el gráfico obtenido para el análisis de las zonas más irregulares sobre la superficie de fractura.

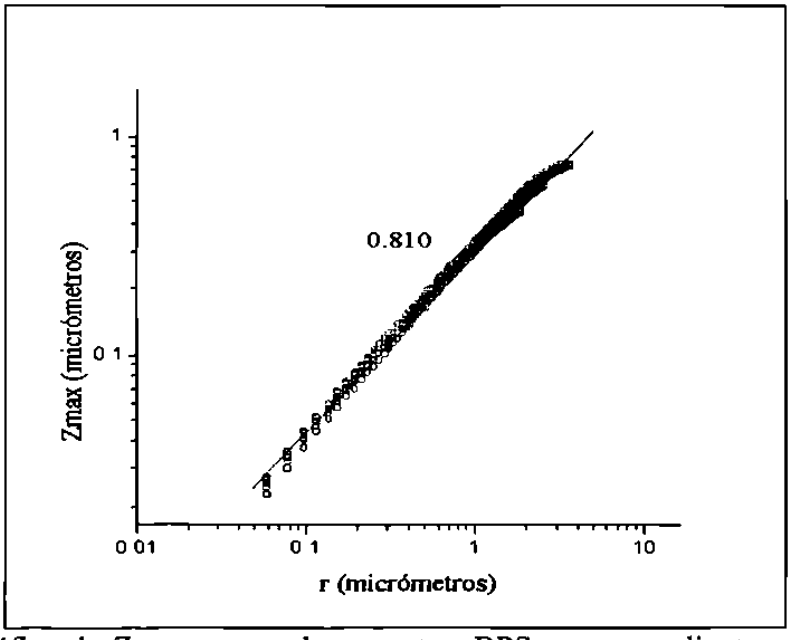

Figura *46*. Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras BPS, correspondiente a las zonas más irregulares.

Se obtuvo un exponente de rugosidad promedio de *0.810* con una desviación estándar de *0.015* a lo largo de una longitud en la escala desde *0.006μm* hasta *3.0μm*. Aunque no existe diferencia significativa entre los exponentes de rugosidad para estas *2* zonas, se obtienen *2* intervalos diferentes de longitud en la escala, en donde se logra apreciar el comportamiento autoafín. Para la zona más irregular el intervalo de longitud se ubica en la escala a valores más pequeños que el intervalo de las zonas más irregulares, esto probablemente se debe a que estas zonas presentan longitud de correlación diferente.

En general, se puede establecer que para los dos materiales estudiados, en las condiciones descritas en el presente trabajo se obtienen superficies de fractura rugosas que presentan comportamiento autoafin con el mismo valor del exponente de rugosidad $\zeta \sim 0.8$. Se tiene el mismo comportamiento independientemente de la microestructura , es decir, no importa si el material es amorfo o presenta un cierto grado de cristalinidad.

Para el caso de las películas se obtiene el mismo comportamiento de autoafinidad, para el caso del i-PP no influye el tamaño de las esferulitas sobre el exponente de rugosidad, es decir aparentemente este comportamiento es independiente de la velocidad de enfriamiento de las películas.

Estos resultados permiten corroborar que las superficies de fractura de estos materiales poliméricos son efectivamente autoafines y para las condiciones estructurales, térmicas y cinéticas descritas presentan el valor universal del exponente de rugosidad $\zeta \sim 0.8$.

CAPITULO 5
CONCLUSIONES

La caracterización de los materiales utilizados en el presente trabajo, permitió asegurar que se trabajó con los materiales originalmente propuestos. Esto es fundamental para el establecimiento de las condiciones óptimas de operación del MFA en su modalidad de contacto, puesto que se buscó visualizar la topografía superficial que caracteriza al i-PP y al PS.

La optimización de las condiciones de operación del MFA en su modalidad de contacto, para con los materiales plásticos bajo estudio, permitió concluir que es posible analizar sus superficies mediante esta técnica. Para el caso especifico de i-PP y PS se encontró que con fuerzas alrededor de $10^{-9}N$ y frecuencias de barrido por parte del escáner de 1 a $1.5Hz$ se obtienen imágenes tridimensionales muy nítidas y claras. Es posible llevar a cabo mediciones cuantitativas de las superficies analizadas. Específicamente se comprobó que en las películas de i-PP cuando la cristalización viene del estado fundido a medida que la temperatura de enfriamiento es menor el tamaño de las esferulitas sobre la superficie también es menor. Para el caso de películas de PS este análisis muestra la ausencia del algún indicador sobre la superficie que sugiera algún indicio de cristalización, corroborándose con esto que el PS es un material amorfo.

En lo referente a las superficies de fractura, las imágenes tridimensionales tanto para el i-PP como para el PS, a diferentes tamaños de barrido, muestran las irregularidades que son características de las superficies de fractura. Para el caso especifico del i-PP fue posible observar sobre la superficie una topografía con orientación radial que presumiblemente se trata de una esferulita que fue atravesada por algún frente de grieta.

El análisis de autoafinidad realizado en las películas de i-PP y PS, revelan que dichas superficies presentan un comportamiento autoafín con un exponente de rugosidad muy aproximado a 0.8, en ambos casos el comportamiento se mantiene a lo largo de una longitud de escala que va desde 0.01 hasta $1.0\mu m$. Para el caso especifico de las muestras de i-PP analizadas, se concluye que existe un comportamiento autoafin independientemente de la temperatura de enfriamiento..

En lo referente a superficies de fractura se encontró para el i-PP un valor del exponente de rugosidad de *0.788* a lo largo de más de *2* décadas en la longitud de escala, este valor se encuentra dentro del intervalo del valor reportado como universal para superficies de fractura de materiales heterogéneos. Para el PS se obtuvo un valor de *0.8*, para las dos zonas encontradas en las superficies de fractura, sin embargo se diferencian en la localización del intervalo en el que se mantiene el comportamiento autoafín, para las zonas más irregulares el intervalo va desde $0.006\mu m$ hasta $3.0\mu m$ y un intervalo que va desde $0.002\mu m$ hasta $0.1\mu m$ para las zonas menos irregulares.

En general podemos concluir que las superficies de fractura de los materiales plásticos analizados bajo condiciones de fractura no controlada, presentan un comportamiento autoafín como el que se ha reportado para materiales metálicos y cerámicos bajo condiciones de propagación de grietas no controladas, reforzando con esto la conjetura de universalidad del exponente de rugosidad para superficies de fractura independientemente del tipo de material.

Las técnicas de análisis de superficies de fractura mediante MEB y MFA son complementarias, permitiéndonos con esto una mejor interpretación de las imágenes obtenidas mediante estas dos técnicas. El MEB revela mucha información cualitativa a pocas magnificaciones, mientras que con el MFA se logran observar características superficiales hasta un área de barrido del orden de los micrómetros para el caso de materiales plásticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pande, C.S.; Richards, L.R.; and Smith, S.; "Fractal characteristics of fractured surfaces". Journal of Materials Science Letters 6; pp. 295-297. 1987.
2. Mandelbrot, B.B., "The Fractal Geometry of Nature". W.H. Freeman and Co. New York, 1982.
3. Mandelbrot B.B., Passoja D.E., and Paullay A.J. 1984 Nature 308. 721.
4. Mandelbrot, B.B., "Fractals: Form, Chance, and Dimension". W.H. Freeman and Co. San Francisco, 1977.
5. Mandelbrot, B.B. "A multifractal walk down wall street".Scientific American. February 1999. pp. 50-53.
6. Peitgen, Heinz-Otto; Jürgens, Hartmut; and Saupe, Dietmar; "Chaos an Fractals-New Frontiers of Science". Springer-Verlag, New York, 1992.
7. Devaney, R.L. "Chaos, Fractals, and Dynamics". Addison Wesley Publishing Company. 1990.
8. Talanquer, V.; "Fractus, Fracta, Fractal, Fractales, de Laberintos y Espejos". Secretaría de Educación Pública, Fondo de Cultura Económica. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D.F. 1986.
9. Feder, J., "Fractals". Department of Physics.University of Oslo. Plenum Press. New York and London. Oslo, Norway.
10. Vicsek, T. "Fractal Growth Phenomena". Second Edition. World Scientific. London 1992.
11. Majumdar,A. and Bhushan,B., "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfacees". Journal of Tribology. Vol.112, No.2., April 1990.
12. Schimittbuhl, J., Vilotte, J.P., and Roux, S.; "Reliability of self-affine measurements". Physical Review. Vol. 51. Number 1. January 1995.

13.Russ, J.C., "Surface Characterization: Fractal Dimension, Hurst Coefficients, and Frequency Transforms". Journal of Computer Assisted Microscopy. Vol.2, No.3., 1990.

14.Zhang.X., Knacjstedt,M.A., Chan,D.Y.C. and Paterson,L.; "On the universality of fracture surface roughness". Europhysics Letters. 34(2). Pp. 121-126. 1996.

15.Pande,C.S., Richards,L.E., Louat,N., Dempsey,B.D. and Scowoeble,J.E.. "Fractal Characterization of fractured surfaces". Acta metall. Vol.35., No.7., pp.1633-1637. 1987.

16.Dauskardt,R.H., Haubensak,F. and Ritchie,R.O.; "On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces". Acta Metall. Mater. Vol.38., No-2, pp.143-159. 1990.

17.Bouchaud, E., "Fractal properties of fracture surfaces: roughness indices and relevant lengthsacales". Mat. Res. Soc. Porc. Vol.367. 1995 Materials Research Society.

18.Daguier, P., Henaux, S., Bouchaud, E., and Creuzet, F., "Quantitative analysis of a fracture surface by atomic force microscopy". Physical Review E., Volume 53. Number 6. June 1996.

19.Daguier, P. Bouchaud, E., "Fracture surfaces of complex metallic materials: roughness indices, scaling and universality". La Revue de Métalurgie-*CIT*/Science et Génie des Matériaux. Mai 1997.

20.Doi, M. "Introduction to Polymer Physics". Department of Applied Physics, Nagoya University, Japan. Claredon Press Oxford. 1997.

21.Boyd R.H. and Philips, P.J., "The Science of Polymer Molecules". Cambridge University Press 1993.

22.Ward, I.M. and Hadley, D.W. "An Introduction to the Mechanical Propierties of Solid Polymers". John Wiley & Sons.England 1993.

23.Bouchand,E. "Scaling Properties of cracks". Journal Phys. Condens. Matter 9. 1997.

24.Krim.J. and Indekeu J.O.; "Roughness exponents: A paradox resolved". Physical Review. Vol.48., No.2., August 1993.

25.Balakin, A.S., "Mechanics of self-affine cracks". Revista Mexicana de Física 41. No.4- 1995.

26.Balakin, A.S., "Mechanics of self-affine cracks: the concept of equivalent traction, path integrals and energy release rate". Revista Mexicana de Física 42. No.2. 1996.

27.Schimittbuhl, J. and Måloy, K.J.; "Direct Observation of Self-Affine Crack Propagation". Physical Review Letters. Volume 78. Number 20. May 1997.

28.Xiao Wu Li, JiFering Tian, Yan Kang, and ZhongGuang Wang.; "Quantitative analysis of fracture surfaces by roughness and fractal method". Scripta Metallurgica et Materialia, Vol.33, No.5. pp.803-809. Elsevier Science Ltd. 1995.

29.Rohrer, H.; "Scanning tunneling microscopy: a surface science tool and beyond". Surface Science 299/300. 1994-Elsevier Science B.V.

30.Binning G., Quate C.F., and Gerber, Ch.; "Atomic Force Microscope". Physical Review Letters, Vol.56, Number 9, 930-933, March 1986.

31.Sarid D.; "Scanning Force Microscopy". Oxford University Press, Inc. 1994.

32."User's guide to autoprobe CP and LS". Park Scientific Instruments. 1992-1995.

33.Lei Xu, Xiao-Wei Yao, Lan-Ping Zhang, Min-Qian Li, and Fu-Jia Yang. "Interpretation of atomic-resolution images in atomic-force microscopy". Physical Review B. Volume 51. Number 15. April 1995-I.

34.Hertzberg R.W.; "Fracture Surface Micromorphology in Engineering Solids". Fractography of Moderns Engineering Materials: Composites and Metals. ASTM STP 948, J.E. Masters and J. J. Au, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987, pp 5-36.

35.Mecholsky, J.J., Freiman, S.W. and Rice, R.W., "Fractographic analysis of ceramics", Fractography in Failure Analysis. American Society for Testing and Materials, 1978. pp.363-379.

36.Scmittbuhl,J., Roux,S., Vilotte J.P. and Maloy K.J.; "Interfacial Crack Pinning: Effect of Nonlocal Interactions". Physical Review Letters. Vol.74., No..10. March 1995.

37.López,J.M. and Rodríguez,M.A.; "Interface Dynamics at the Depinning Transition". J.Phys. I France. Page 1191. October 1997.

38.Adamson, A.W., and Gast, A.P.; "Physical Chemistry of Surfaces". Sixth Edition. A Wiley-Interscience Publication. Jhon Wiley & Sons. Inc.1997.

39.Woodward, A.E.; "Understanding Polymer Morphology". Hanser Gardner Publicatios, Munich Vienna New York. 1995.

40.Garnassi, F., Morra, M., and Occhiello E.; "Polymer Surfaces From Physics to Technology". Jhon Wiley & Sons. 1997.

41.Angulo,J.L. "Caracterización Fisicoquímica de Polímeros". Editorial Limusa. 1994.

42. Norton, D.R. and Keller,A.. "The spherulitic and lamellar morphology of melt-crystalized isotactic polypropilene". Polymer. Vol. 26, May 1985.

43.Aboulfaraj, M., Ulrich,B., Dahound, A. and G'Sell,C.; "Spherulitic morphology of isotactic polypropilene investigated by scanning electron microscopy". Polymer, Vol.34. No.23. 1993.

44. Kaiserberger, E.., Mohler,H., DSC on Polymer Materials. Netzch Annual for science and industry, volume 1.1991

45.Aboulfaraj, M., G'Sell, C., Ulrich, B., and Dahaoun, A., "***In situ*** observation of the plastic deformation of polypropilene spherulites under uniaxial tension and simple shear in the scanning electron microscope". POLYMER. Volume 36. Number 4. 1995.

46.Castelein, G., Coulon, G., and G'Sell, C.; "Polymers Under Mechanical Stress: Deformation of the Nanostructure of Isotactic Polypropilene Revealed by Scanning Force Microscopy". Polymer engineering and science. Vol. 37. No. 10. October 1997.

INDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1	Las primeras cuatro generaciones de la curva de Von Koch.	10
2	Condiciones de la corrida del DSC	34
3	Dimensiones para el cantilever y la punta del fig.14	39
4	Valores obtenidos mediante GPC	44
5	Propiedades térmicas del i-PP	44

INDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Movimiento Browniano de una partícula en función del tiempo.	12
2	Esquema de unos cuantos perfiles de alturas de una superficie rugosa hipotética.	13
3	a) Ventanas de tamaño Δ a lo largo de un perfil de alturas hipotético de longitud L. b) Ventanas de tamaño 2Δ para el mismo perfil.	15
4	Imagen a $7X$. Marcas de Chevron sobre una superficie de fractura de PVC.	20
5	Fuerzas que interactuan entre la punta y la muestra en el MFA.	25
6	Microscopio de Fuerza Atómica en su modalidad de contacto.	26
7	Imagen de SEM de una punta tipo microlever. a) 5000X. b) 10000X.	27
8	Perfiles de rugosidad generados en MFA.	27
9	Tacticidad presente en Polipropileno	29
10	Sección de la estructura de la cadena del poliestireno	30
11	Proceso de preparación de las muestras A. *(a)* Proceso de calentamiento, fusión del granulo y formación de la película delgada. *(b)* Relajamiento a temperatura ambiente de la película obtenida. *(c)* Proceso de fusión de la película relajada sobre un cubreobjetos. *(d)* Proceso de enfriamiento para las muestras APP1 y APP2 a sus respectivas temperaturas.	36
12	Producción de filamentos o cilindros delgados de plástico.	37
13	Generación de superficies de fractura en iPP y PS.	37
14	Geometría del cantilever y la punta.	39

15	Espectro de infrarrojo de la muestra de i-PP	41
16	Espectro de infrarrojo de un estándar de polipropileno	42
17	Espectro de infrarrojo para la muestra de PS.	42
18	Espectro de Infrarrojo de un estándar de poliestireno.	43
19	Termograma de DSC para el i-PP.	44
20	Termograma de DSC obtenido para el PS.	45
21	Imágenes 3D de las películas de i-PP, muestra APP1. *a)*Barrido de *10x10μm b)*Barrido de *7x7μm c)*Barrido de *5x5μm d)*Barrido de *2.3x2.3μm.*	47
22	Esferulita de i-PP. *a)* Imágen 2D correspondiente a la imagen 3D de la figura *21a. b)*Perfiles de alturas a lo largo de las líneas que se observan en la figura *22a.*	48
23	Imágenes 3D de i-PP, muestra APP2. *a)*Barrido de *10x10μm. b)*Barrido de *7x7μm. c)*Barrido de *4x4μm. d)*Barrido de *3x3μm.*	49
24	*a)* Imagen 2D correspondiente a la figura *23c. b)* Perfiles de alturas correspondiente a las líneas trazadas sobre la figura *24a.*	50
25	Imágenes *3D* correspondientes a *4* zonas diferentes sobre una película de PS.	51
26	Imágenes *3D* de la superficie de filmes de PS mediante MFA. *a)*Barrido de *10x10μm. B)*Barrido de *6.2x6.2μm. c)*Barrido de *4.5x4.5μm.*	52
27	Imágenes de Superficies de Fractura de i-PP, mediante MEB. *a)*100X. *b)*250X. *c)*500X. *d)*500X	53
28	Imágenes de superficies de fractura de i-PP, mediante MEB. *a)*500X. *b)*2000X. *c)*5000X. *d)*15000X.	54
29	Imágenes de superficies de fractura de PS, mediante MEB. *a)*500X. *b)*1000X.	55
30	Imagen de superficie de Fractura de PS, mediante MEB a 100X.	56

31	Imágenes de superficies de fractura de PS, mediante MEB. *a)*250X. *b)*500X. *c)*2000X. *d)*5000X.	57
32	Imágenes de superficies de fractura de PS, mediante MEB. *a)*100X. *b)*250X. *c)*500X. *d)*2000X.	58
33	Imágenes de superficies de Fractura de PS, mediante MEB. *a)*10000X. *b)*20000X.	59
34	Imágenes 3D correspondientes a 4 zonas diferentes sobre la superficie de fractura de i-PP mediante MFA.	60
35	Imágenes 3D correspondientes a *2* zonas diferentes sobre la superficie de fractura de PS, mediante MFA.	61
36	*(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *36b*. *(b)* Imagen 2D correspondiente a la figura *21a*.	62
37	Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras APP1.	63
38	*(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *38b*. *(b)* Imagen 2D correspondiente a la figura *23a* (APP2).	63
39	Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras APP2.	64
40	*(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *40b*. *(b)* Imagen 2D correspondiente a la figura *34b*.	65
41	Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras BPP.	65
42	*(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *42b*. *(b)* Imagen 2D correspondiente a la figura *25d*.	66
43	Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras APS.	67
44	*(a)* Perfiles de alturas correspondientes a las líneas de la figura *44b*. *(b)* Imagen 2D correspondiente a la figura *35a*.	67
45	Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras BPS, correspondiente a las zonas menos irregulares.	68
46	Gráfico de Z_{max} vs r para las muestras BPS, correspondiente a las zonas más irregulares.	68

TIPO DE ADQUISICION
DONATIVO