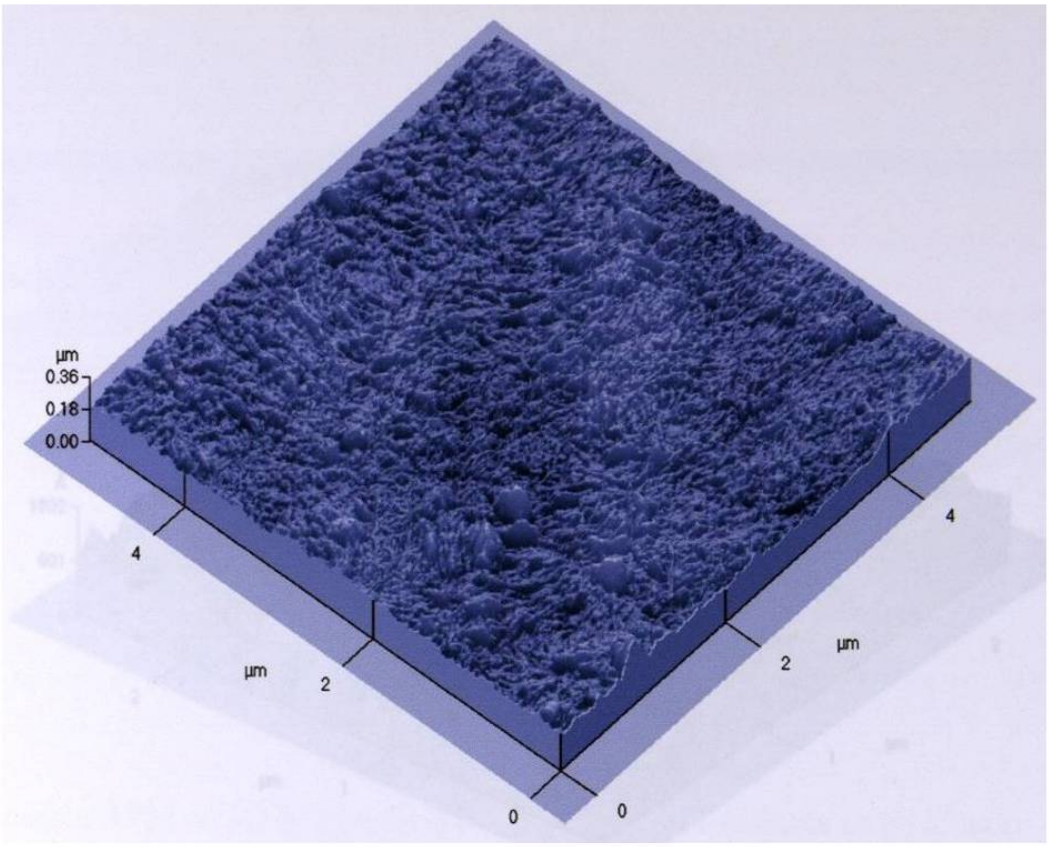

Fig. 52 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min.

Tamaño de barrido de 5 µm

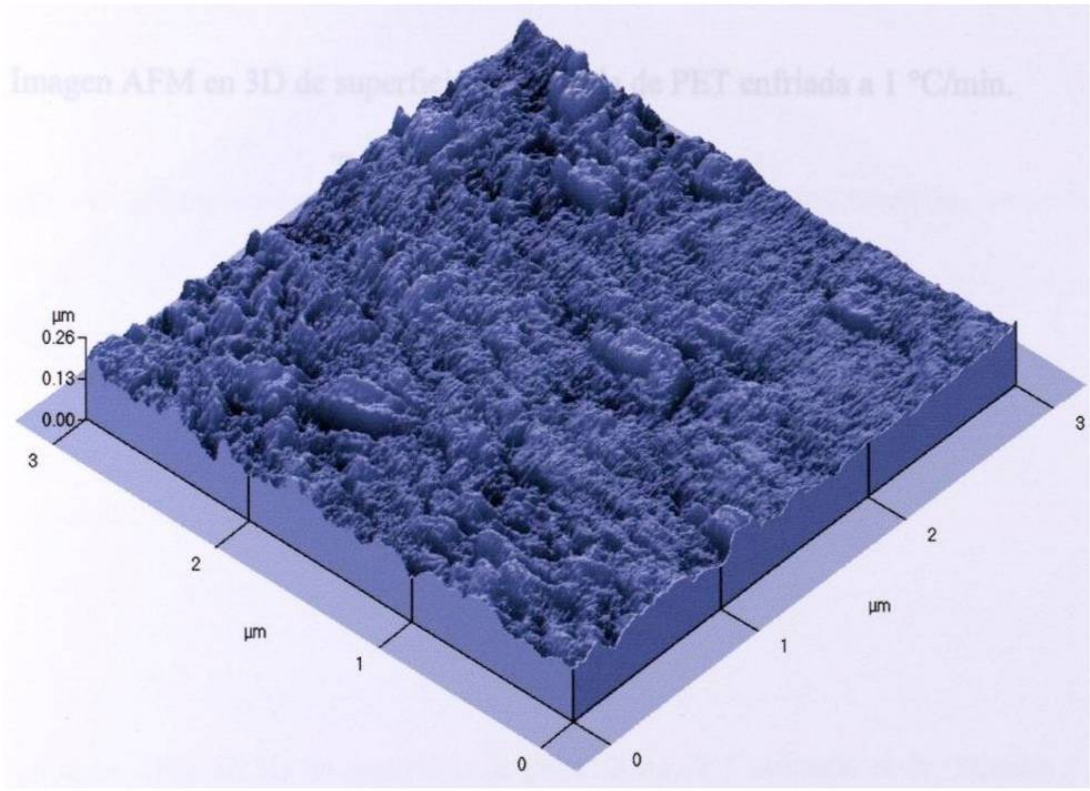

Fig. 53 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min.

Tamaño de barrido de 3 µm

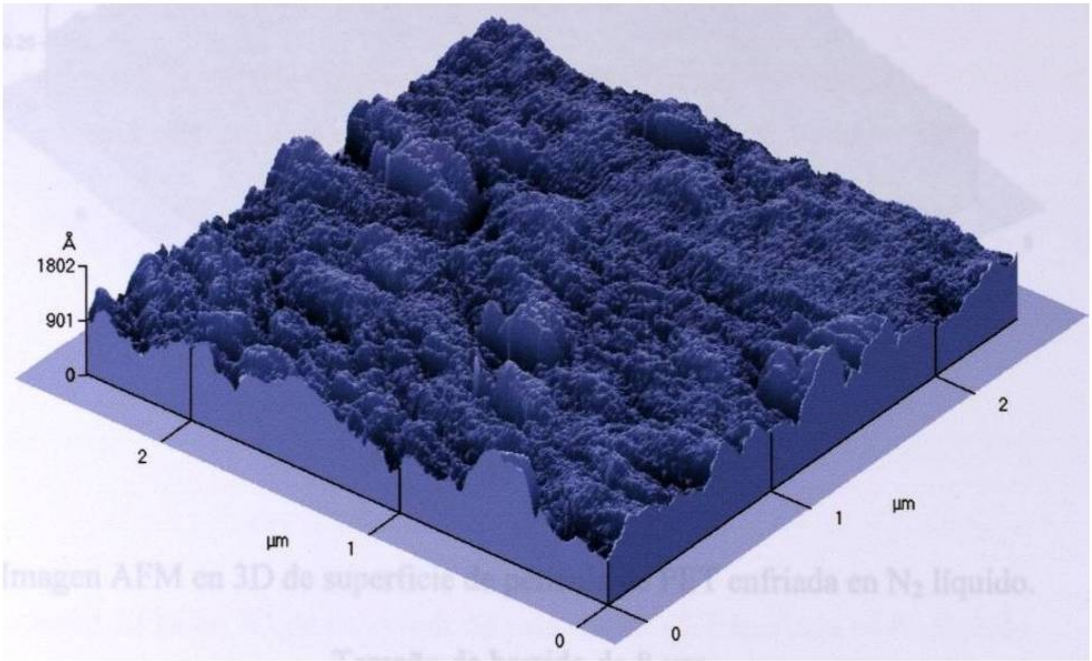

Fig. 54 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min.

Tamaño de barrido de 2.5 µm

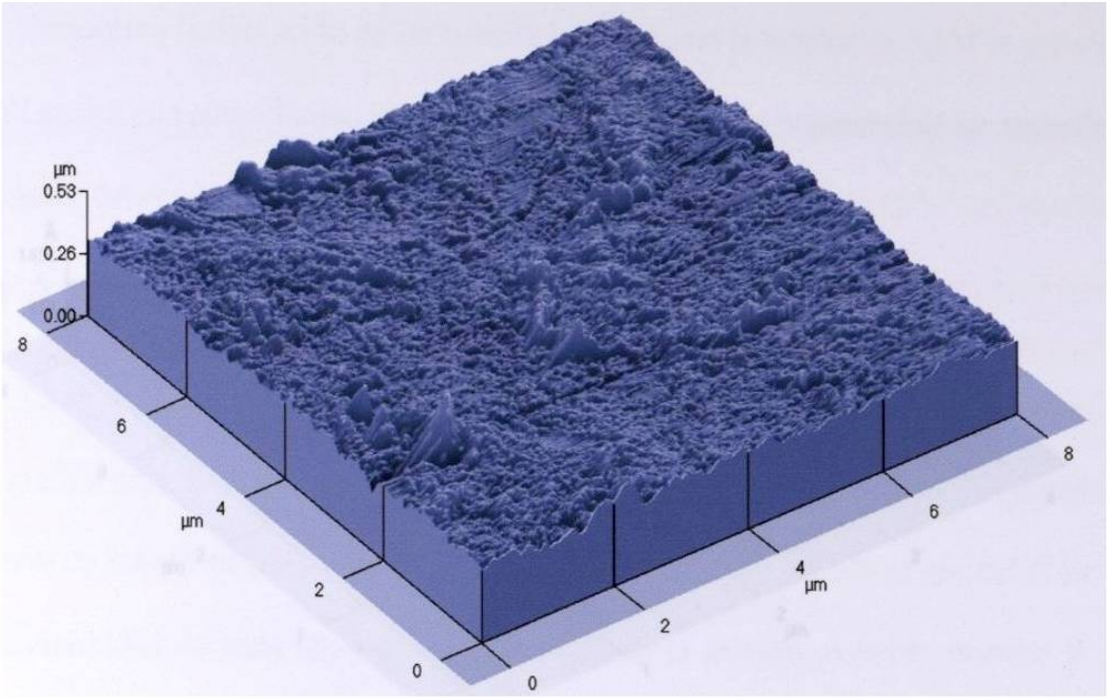

Fig. 55 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido.

Tamaño de barrido de 8 µm

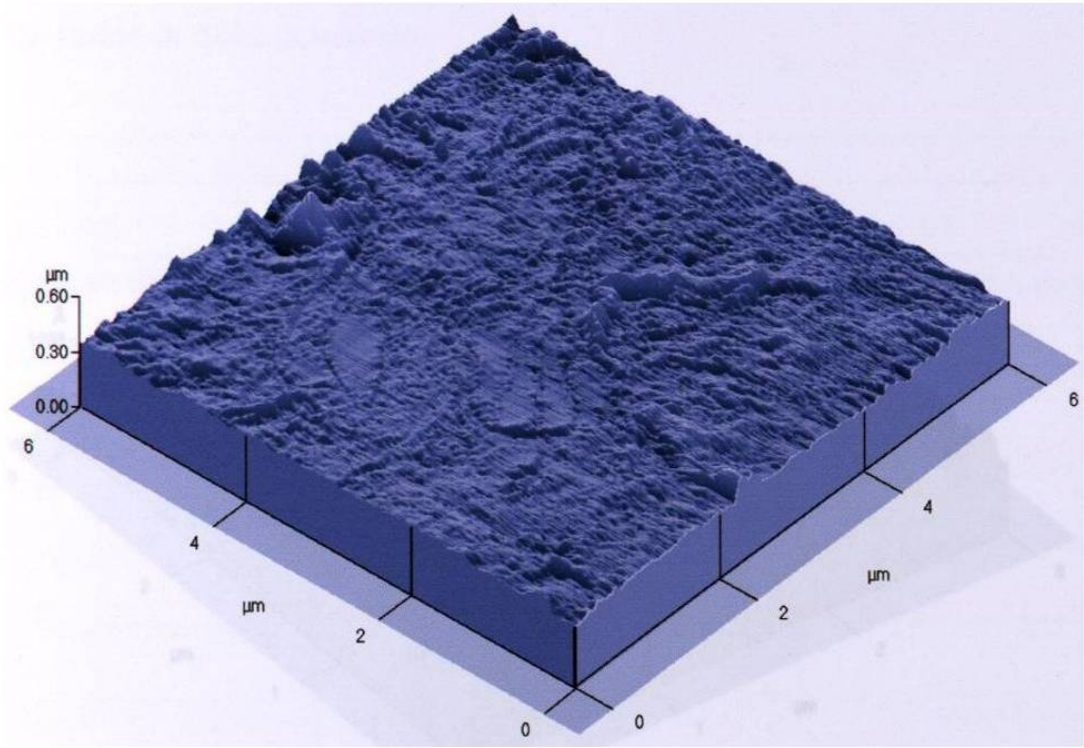

Fig. 56 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido.

Tamaño de barrido de 6 µm

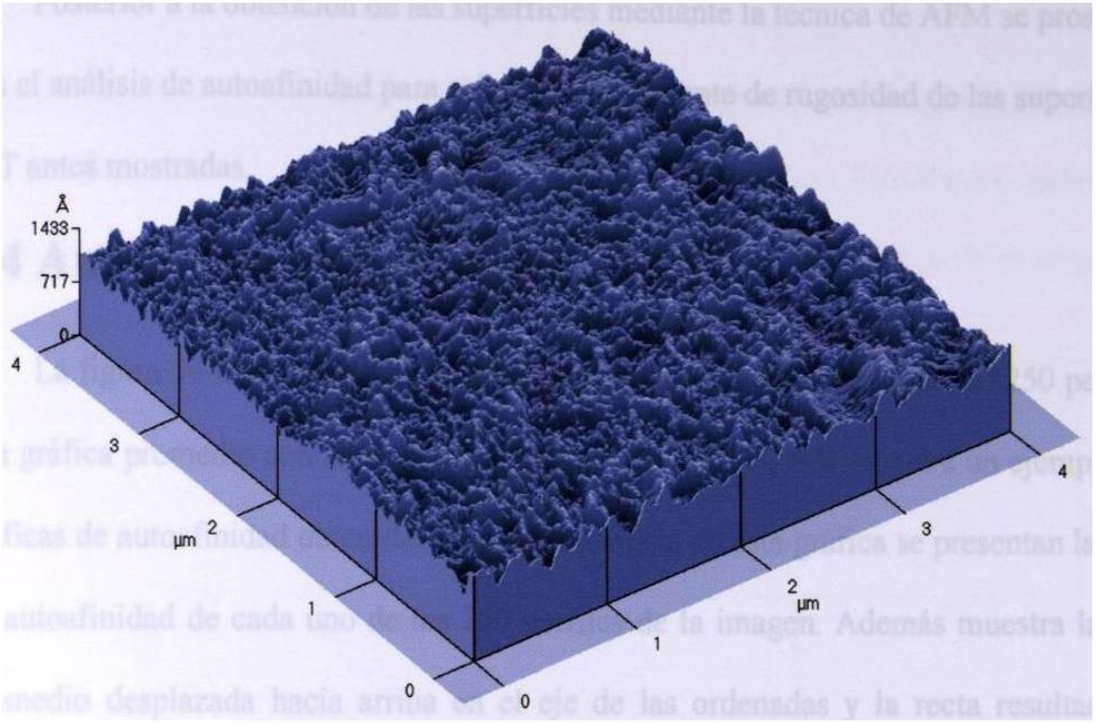

Fig. 57 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido.

Tamaño de barrido de 4 µm

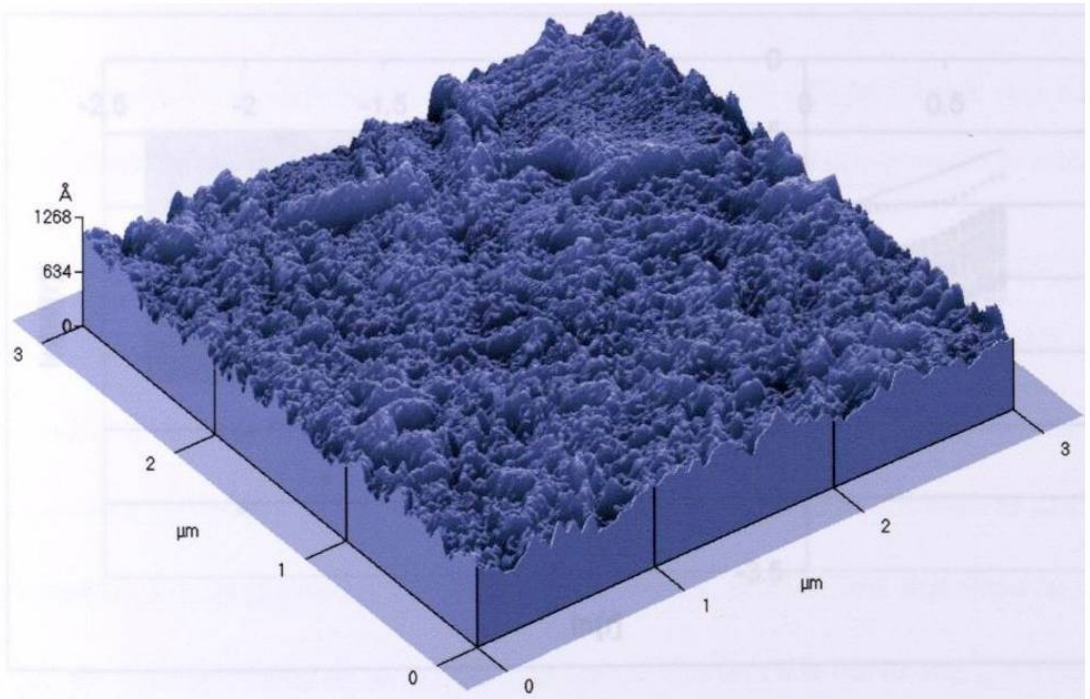

Fig. 58 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido.

Tamaño de barrido de 3 µm

Posterior a la obtención de las superficies mediante la técnica de AFM se prosiguió con el análisis de autoafinidad para calcular el exponente de rugosidad de las superficies de PET antes mostradas.

4.4 Análisis de Autoafinidad

La figura 59 muestra la imagen (a), las gráficas de autoafinidad de los 250 perfiles(b) y la gráfica promedio con su respectiva regresión lineal (c), esta muestra un ejemplo de las gráficas de autoafinidad obtenidas para cada imagen, en esta gráfica se presentan las curvas de autoafinidad de cada uno de los 250 perfiles de la imagen. Además muestra la gráfica promedio desplazada hacia arriba en el eje de las ordenadas y la recta resultado de la regresión lineal. En este caso se puede apreciar que hay una buena linearidad en casi todo el intervalo de escalas y sólo se desvía a escalas grandes, donde se tienen pocas ventanas, causa probable de dicha desviación.

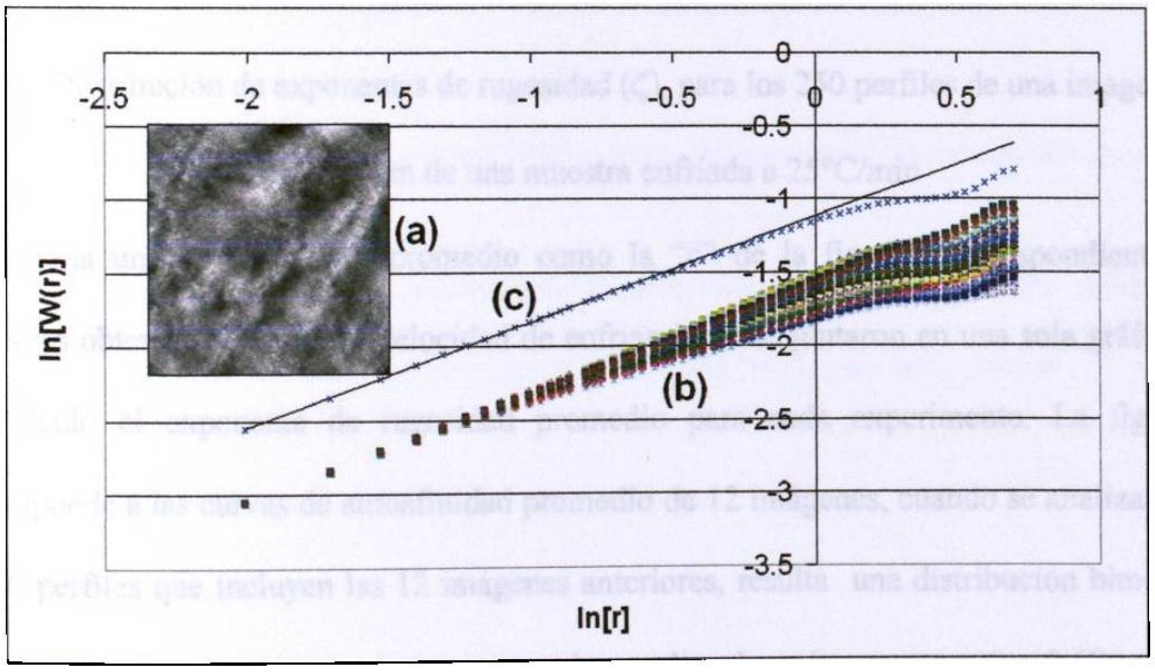

Fig. 59 Análisis de autoafinidad de una imagen de 5 μm de barrido de una muestra enfriada a 25 °C/min

La fig. 60 muestra la gráfica de distribución de exponentes de rugosidad para los 250 perfiles de la Fig. 59, así como el ajuste por regresión a una distribución gaussiana, la media de estas distribuciones son las que se tomaron como característica de la imagen.

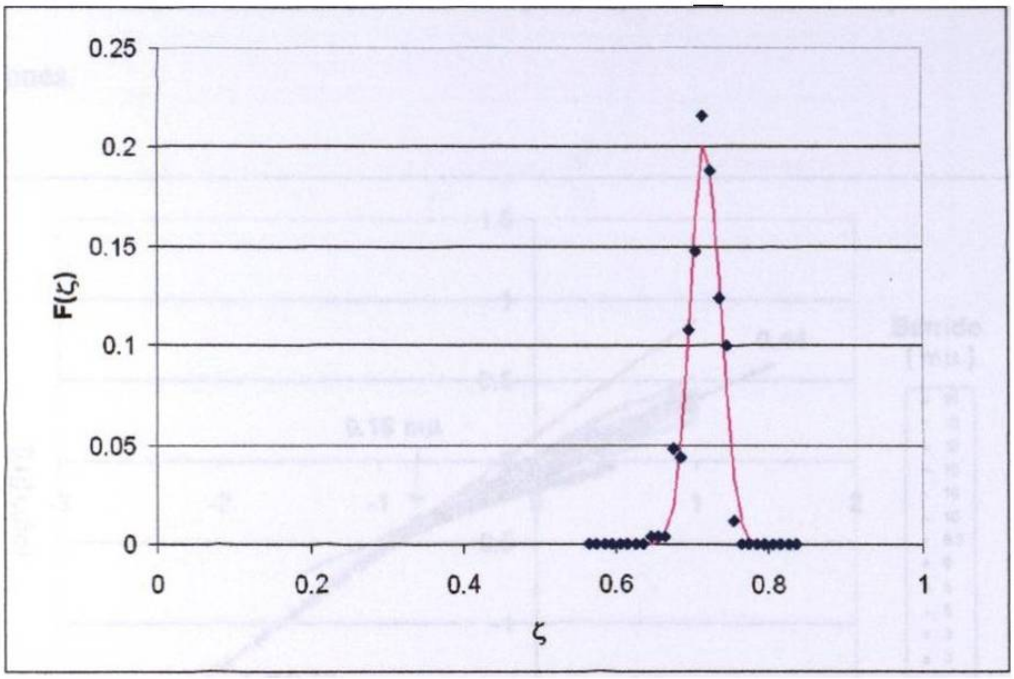

Fig. 60 Distribución de exponentes de rugosidad (ζ), para los 250 perfiles de una imagen de barrido 5 μm de una muestra enfriada a 25°C/min

Cada una de las curvas promedio como la "c" de la fig. 59, correspondientes a muestras obtenidas a una sola velocidad de enfriamiento se juntaron en una sola gráfica y se calculó el exponente de rugosidad promedio para cada experimento. La fig. 61 corresponde a las curvas de autoafinidad promedio de 12 imágenes, cuando se analizan los 3,000 perfiles que incluyen las 12 imágenes anteriores, resulta una distribución bimodal, (fig. 62) de cuya regresión se encuentra que las medias de cada curva son $\zeta = 0.68$ para el hombro y 0.72 para la curva principal. Como ya se ha reportado en superficies de fractura[46], estos hombros representan generalmente fallas en la preparación de las muestras o defectos

en la superficie causados por basuras o ruido instrumental. Por lo anterior, se puede considerar que el exponente de autoafinidad es 0.72, en la fig. 60 se muestra el buen ajuste que tiene la línea de autoafinidad con $\zeta = 0.72$ en relación a los puntos experimentales.

Las figs. 63 a 67 se muestran las distribuciones de los exponentes de rugosidad para las muestras enfriadas a 10, 25, 30, 50 °C/min. y N_2 líquido, mostrándose para cada caso las distribuciones.

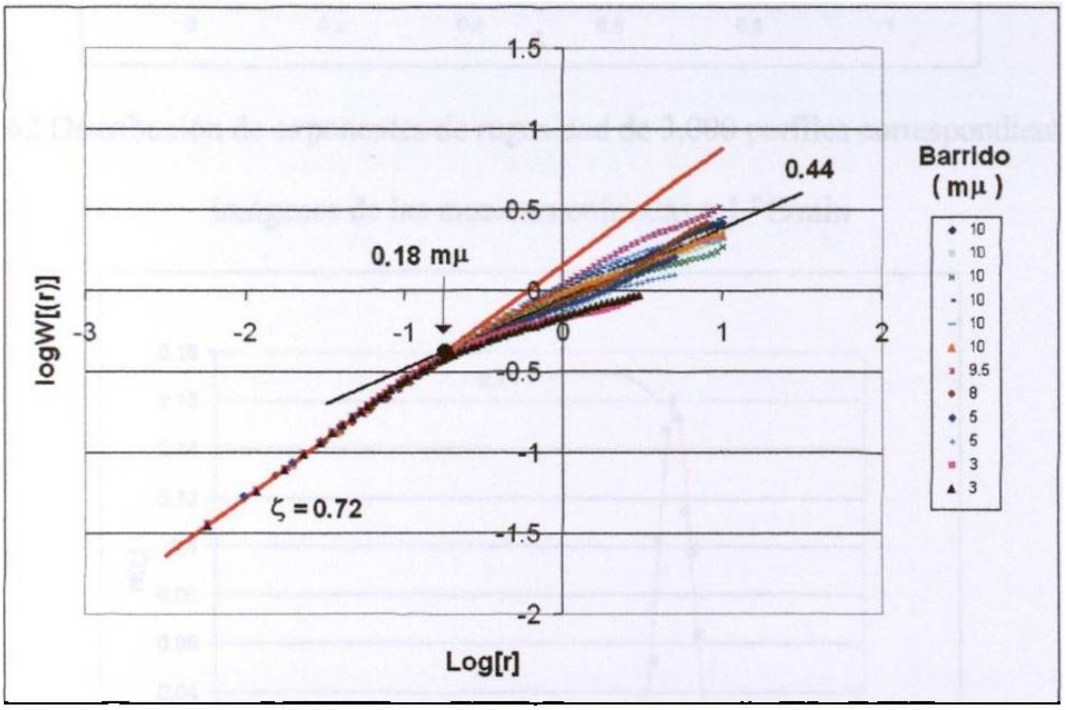

Fig. 61 Gráficas de autoafinidad promedio de 12 imágenes de superficies de PET enfriadas a 1°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen

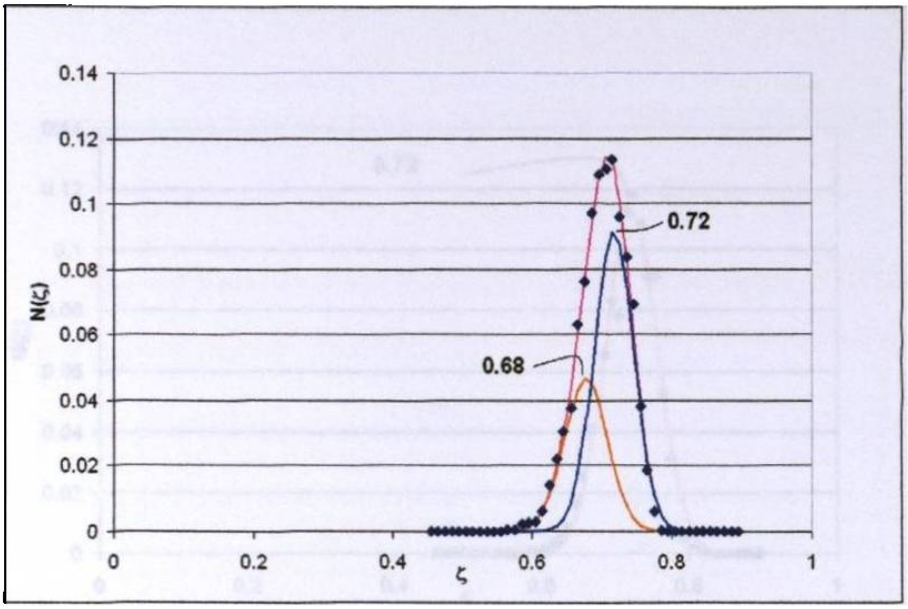

Fig. 62 Distribución de exponentes de rugosidad de 3,000 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 1 °C/min

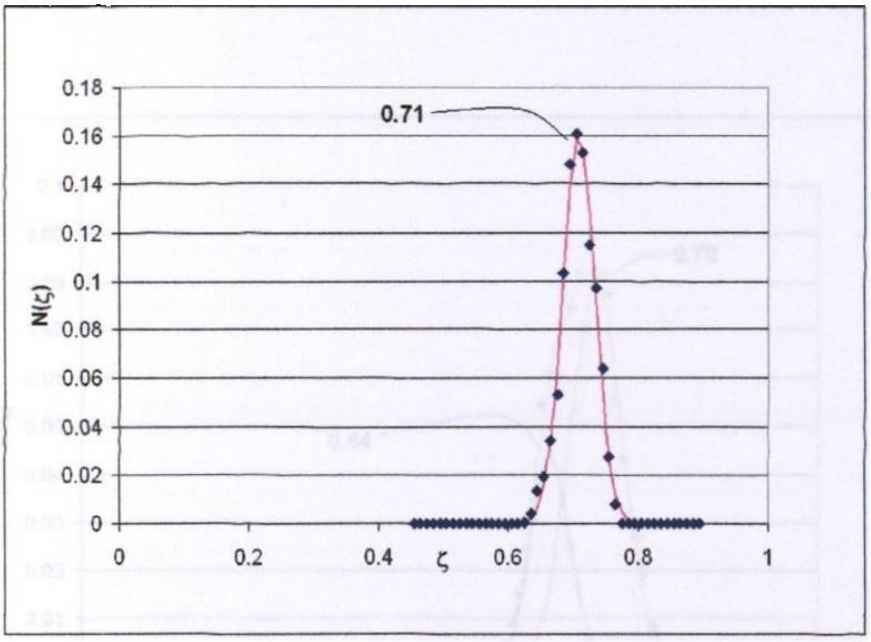

Fig. 63 Distribución de exponentes de rugosidad de 3,750 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 10 °C/min

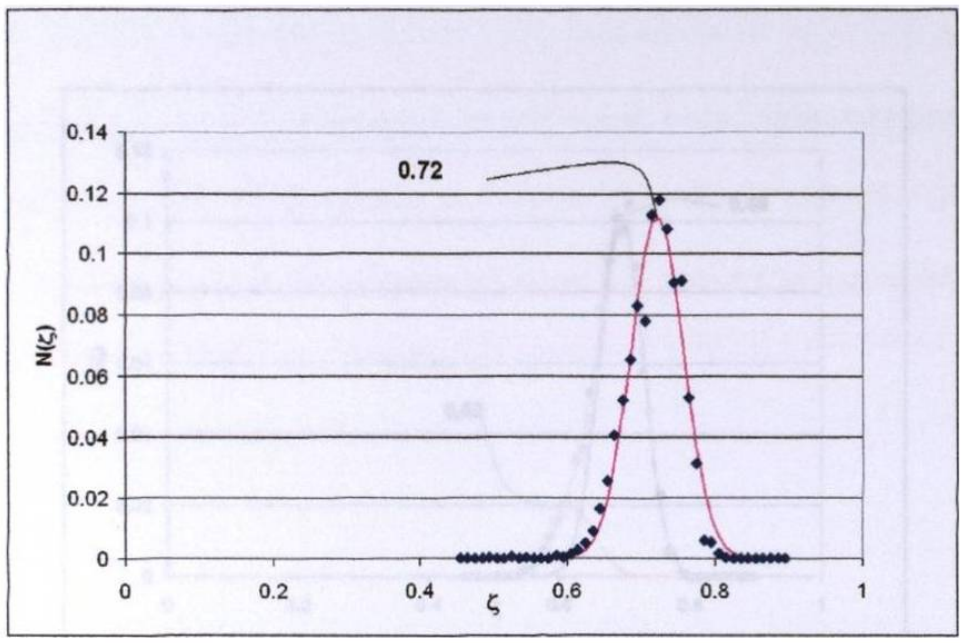

Fig. 64 Distribución de exponentes de rugosidad de 3,500 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 25 °C/min

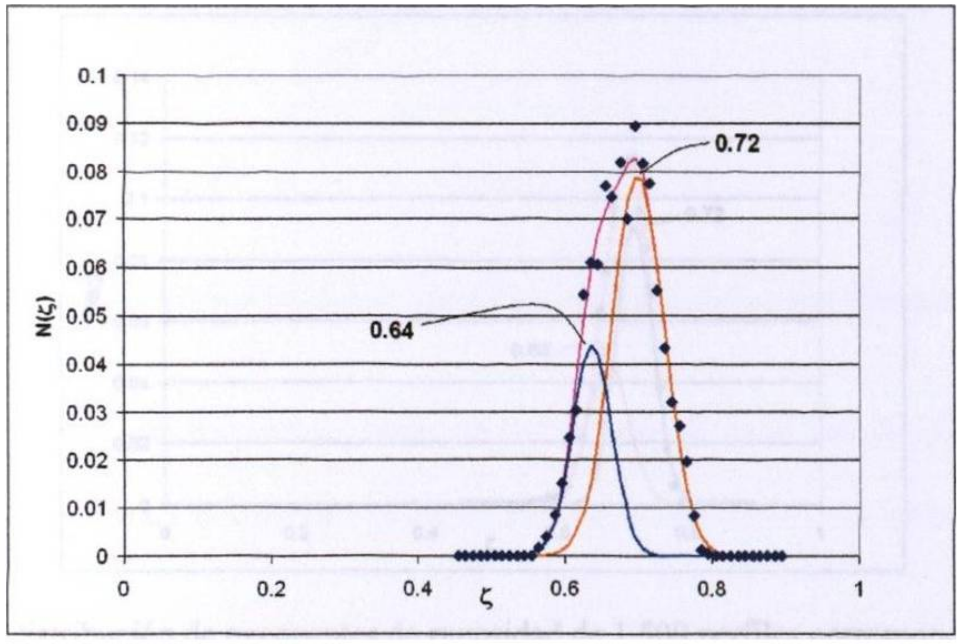

Fig. 65 Distribución de exponentes de rugosidad de 3,000 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 30 °C/min

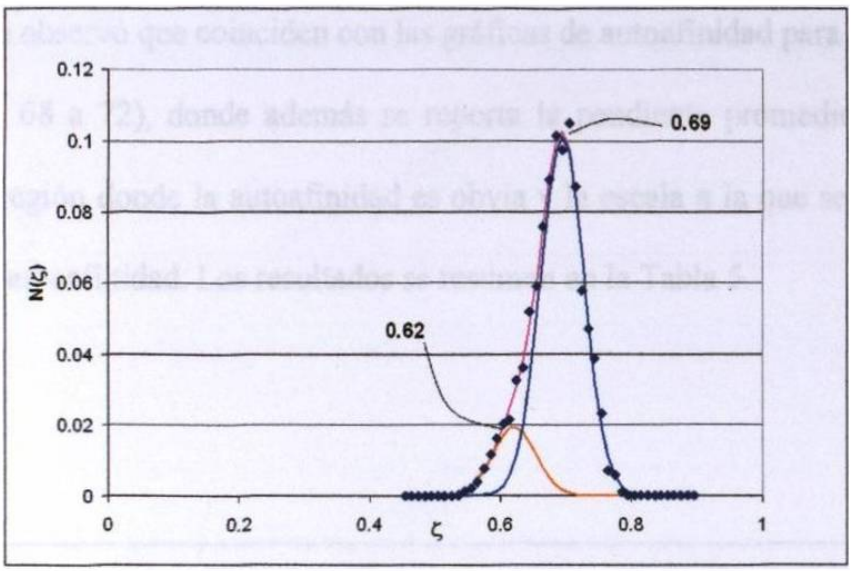

Fig. 66 Distribución de exponentes de rugosidad de 3,000 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 50 °C/min

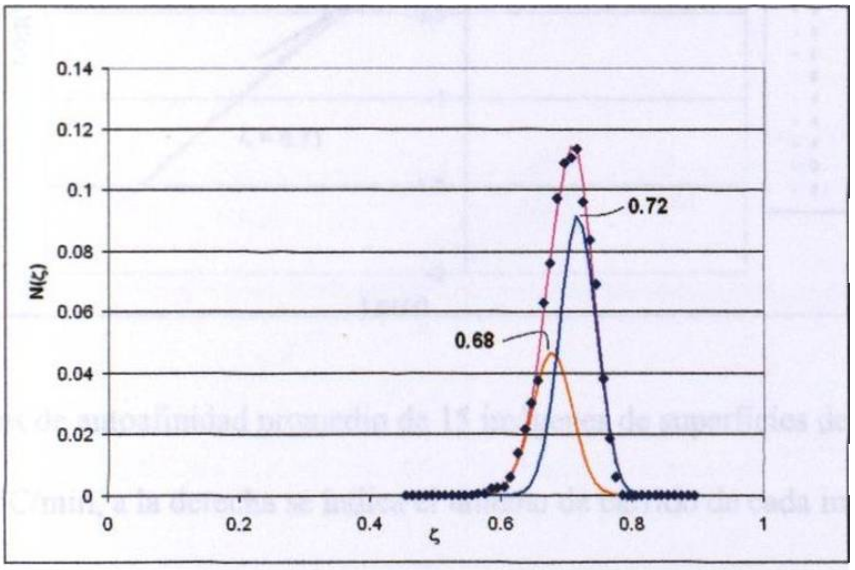

Fig. 67 Distribución de exponentes de rugosidad de 1,500 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas en N_2 líquido

De las gráficas anteriores se tomaron los exponentes de rugosidad de los picos principales y se observó que coinciden con las gráficas de autoafinidad para cada una de las muestras (figs. 68 a 72), donde además se reporta la pendiente promedio de las curvas después de la región donde la autoafinidad es obvia y la escala a la que se intercepta esta recta con la de autoafinidad. Los resultados se resumen en la Tabla 5.

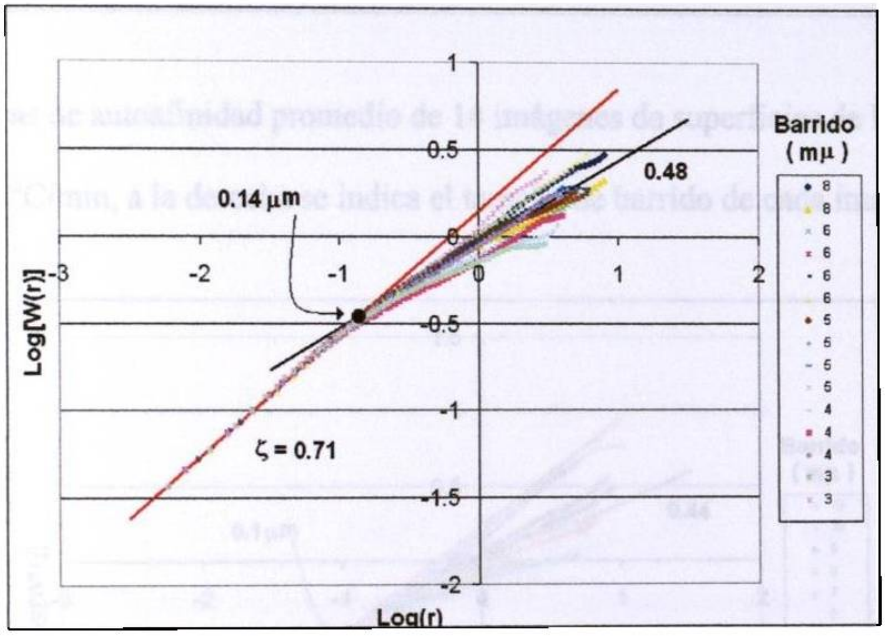

Fig. 68 Gráficas de autoafinidad promedio de 15 imágenes de superficies de PET enfriadas a 10°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen

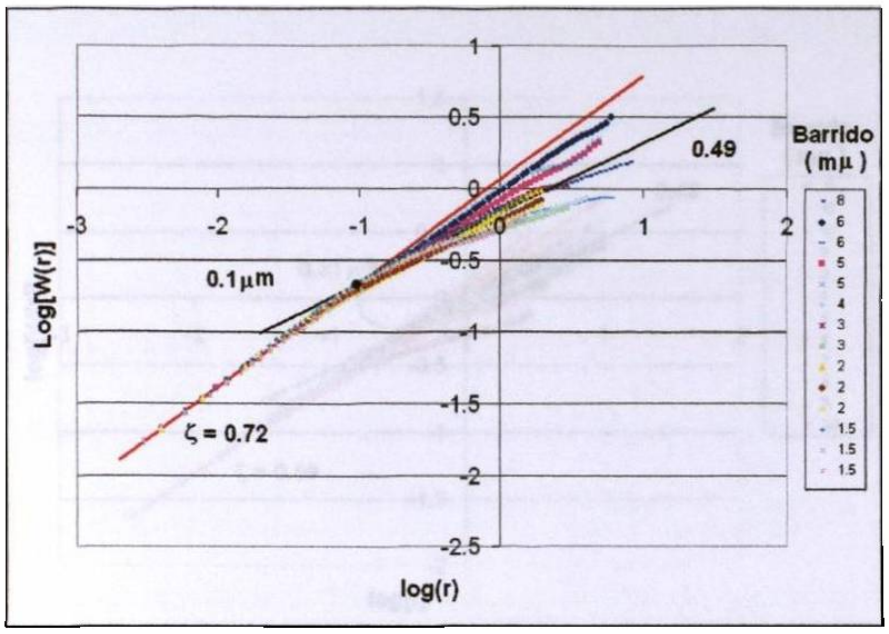

Fig. 69 Gráficas de autoafinidad promedio de 14 imágenes de superficies de PET enfriadas a 25°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen

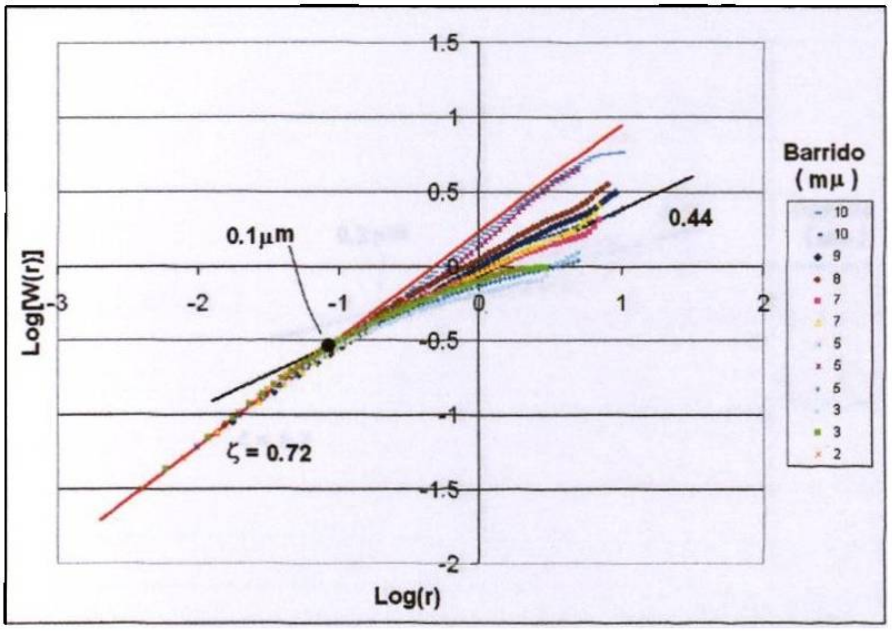

Fig. 70 Gráficas de autoafinidad promedio de 12 imágenes de superficies de PET enfriadas a 30°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen

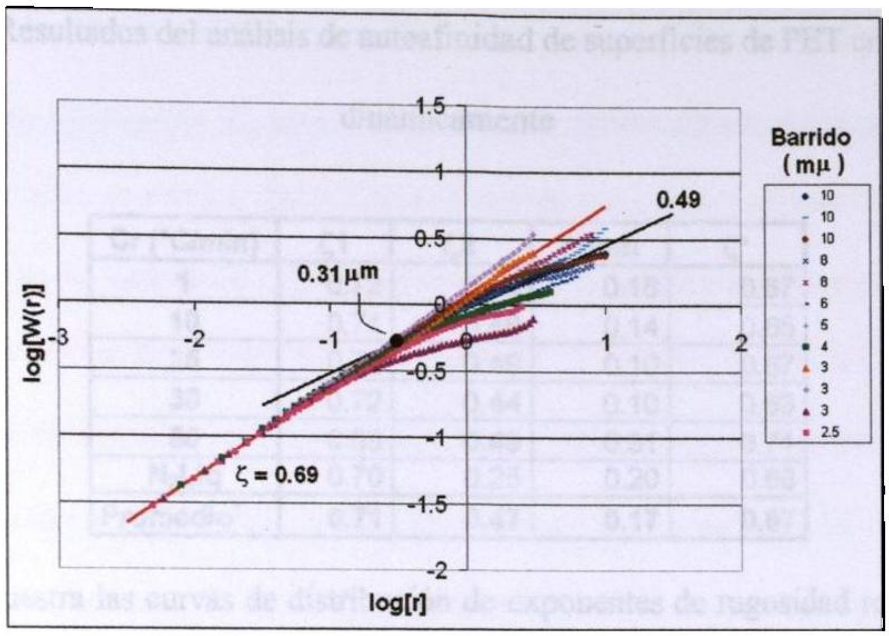

Fig. 71 Gráficas de autoafinidad promedio de 12 imágenes de superficies de PET enfriadas a 50°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen

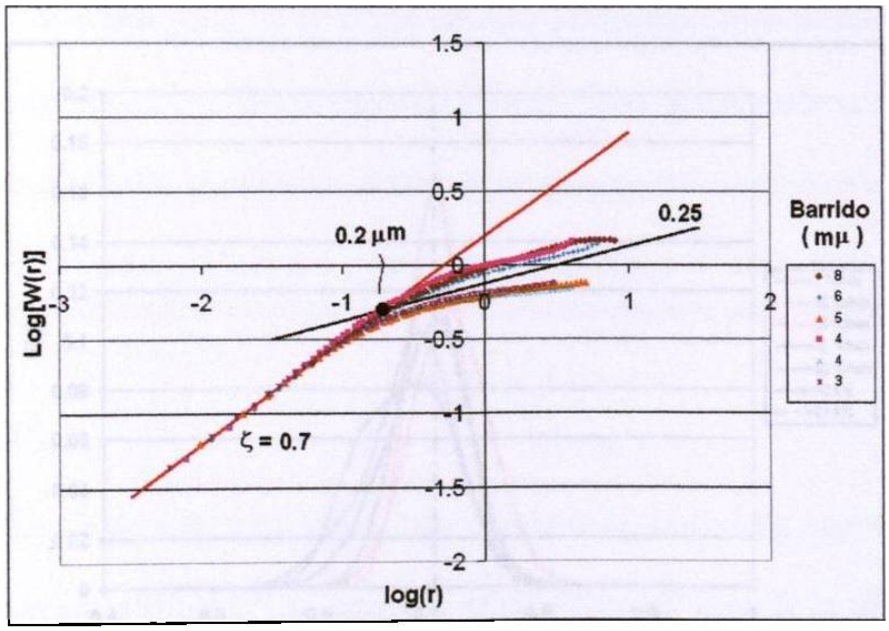

Fig. 72 Gráficas de autoafinidad promedio de 6 imágenes de superficies de PET enfriadas en N_2 líquido, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen

Tabla 5 Resultados del análisis de autoafinidad de superficies de PET cristalizado dinámicamente

Cr (°C/min)	ζ1	ζ2	ξ(μm)	ζ*
1	0.72	0.44	0.18	0.67
10	0.71	0.48	0.14	0.65
25	0.72	0.49	0.10	0.67
30	0.72	0.44	0.10	0.63
50	0.69	0.49	0.31	0.71
N_2Liq	0.70	0.25	0.20	0.68
Promedio*	**0.71**	**0.47**	**0.17**	**0.67**

La fig. 73 muestra las curvas de distribución de exponentes de rugosidad resultado de los ajustes a distribuciones gaussianas para muestras tratadas a diferentes rapideces de enfriamiento, sólo para confirmar que estas distribuciones están todas en una posición que puede considerarse como constante y alrededor de $\zeta = 0.71$

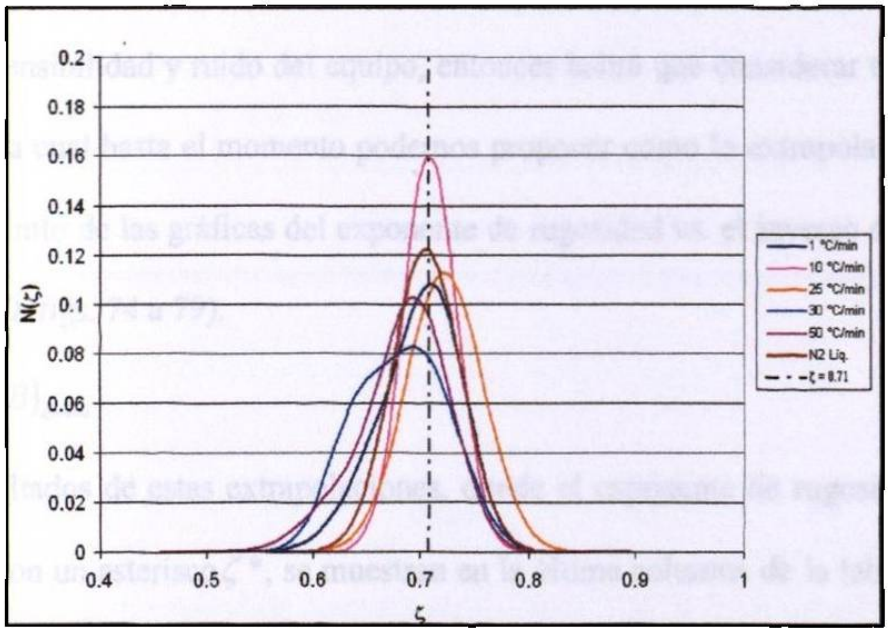

Fig. 73 Resumen de gráficas de distribución de exponentes de rugosidad para muestras de PET tratadas a diferentes rapideces de enfriamiento

Al hacer una observación meticulosa de los exponentes de autoafinidad de cada muestra, se encontró una aparente disminución conforme se incrementaba el tamaño de

barrido, dicha disminución es muy pequeña de tal suerte que considerando la precisión de la metodología (formación de película, rapidez de enfriamiento, AFM y co-varianza), podría despreciarse, se analizó dicho efecto mediante gráficas del exponente de rugosidad contra el inverso del tamaño de barrido, los resultados se muestran en las gráficas 74 a 79.

El fenómeno pudiera tener dos explicaciones, la primera es que las superficies no tienen un carácter autoafín tan bien determinado, aunque también podemos argüir que la resolución y ruido del AFM tiene mayor efecto a barridos pequeños. Ambas hipótesis son trascendentes, la primera, al indicar una pequeña pérdida de autoafinidad, obligaría a indicar la dependencia del exponente de rugosidad con la escala de observación, pero además, ya que los reportes de coeficientes de autoafinidad de la literatura no alcanzan el nivel de precisión que aquí se reporta, lo que obligaría también a revisar resultados de otros investigadores. Por otra parte, si la causa de este comportamiento se relaciona con las variables de sensibilidad y ruido del equipo, entonces habrá que considerar una corrección de los datos, la cual hasta el momento podemos proponer como la extrapolación a tamaño de barrido infinito de las gráficas del exponente de rugosidad vs. el inverso del tamaño del barrido (Ec. 20, figs. 74 a 79).

$$\zeta^{*} = A + B(1/B)_{B\to\infty} \qquad [20]$$

Los resultados de estas extrapolaciones, donde el exponente de rugosidad resultante se identifica con un asterisco ζ^{*}, se muestran en la última columna de la tabla 5, donde se aprecia que este también se puede considerar independiente de la rapidez de enfriamiento y aproximadamente igual a 0.67. (fig. 80)

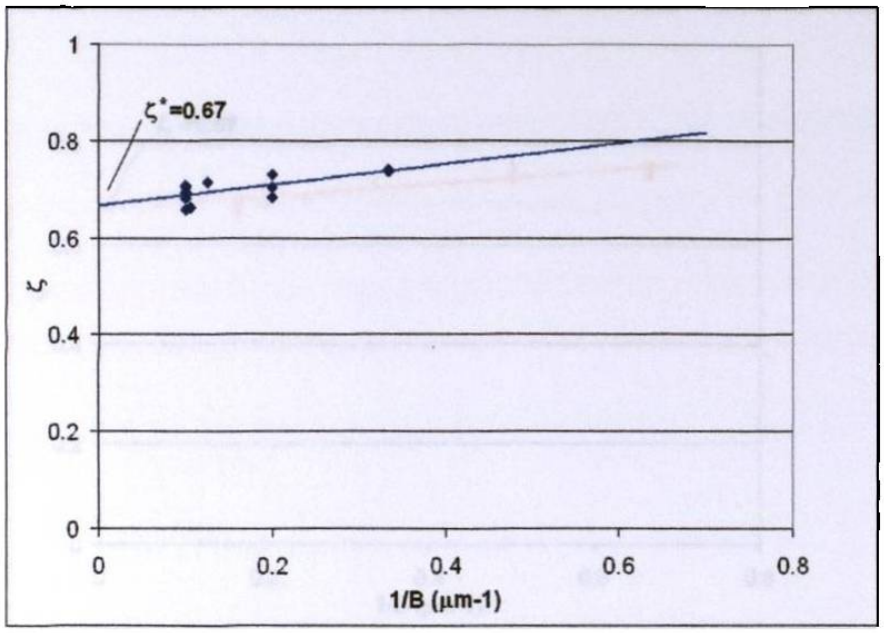

Fig. 74 Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 1 °C/min en función de el tamaño del barrido

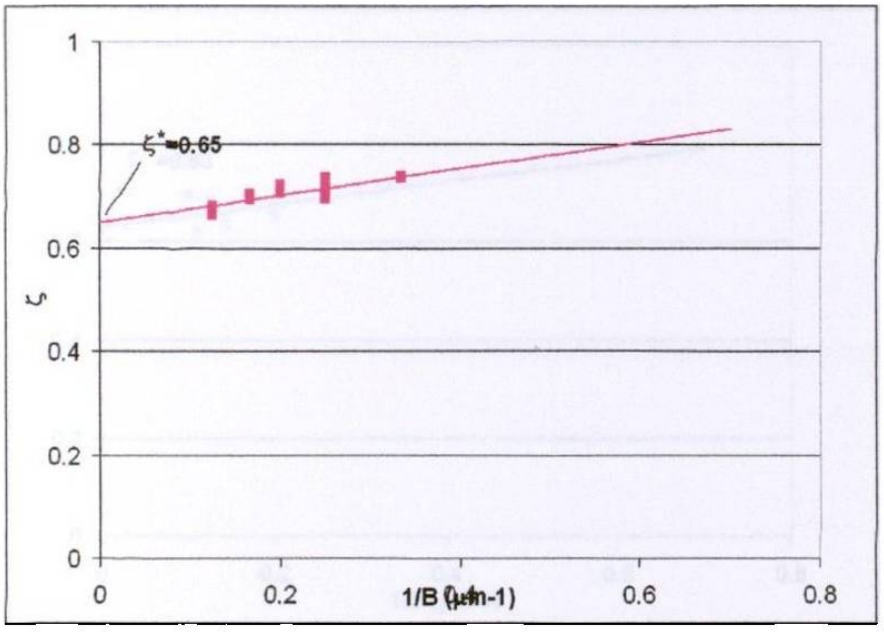

Fig. 75 Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 10 °C/min en función de el tamaño del barrido

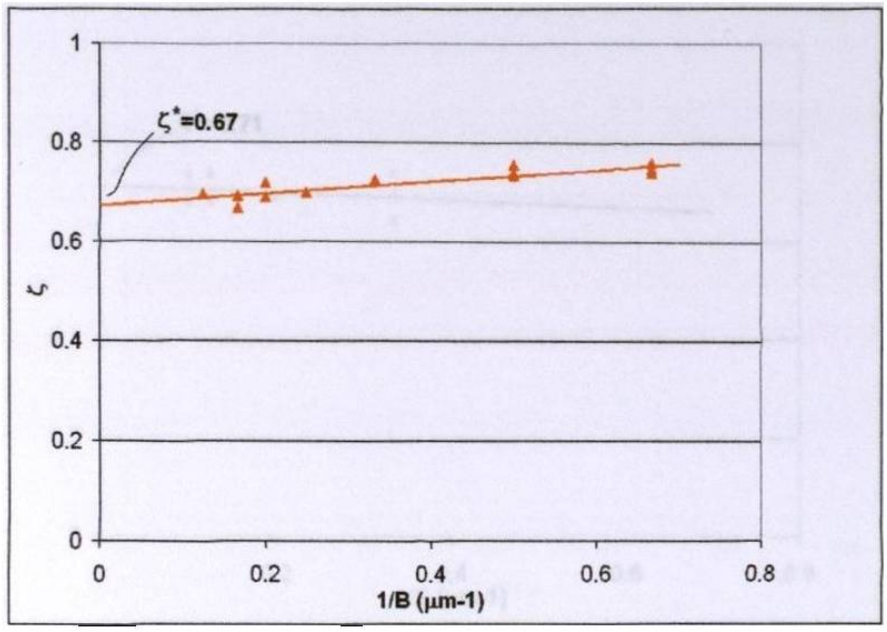

Fig. 76 Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 25 °C/min en función de el tamaño del barrido

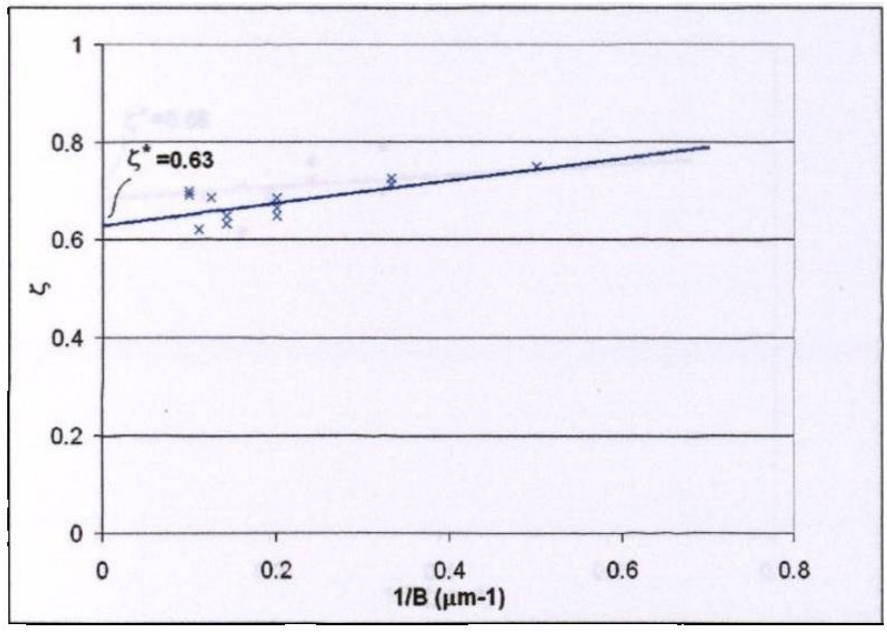

Fig. 77 Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 30 °C/min en función de el tamaño del barrido

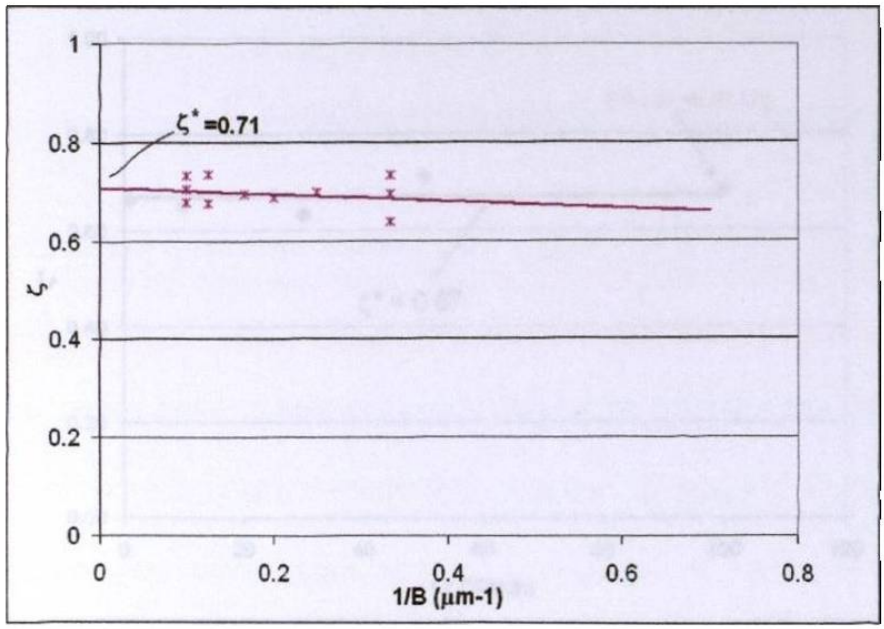

Fig. 78 Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 50 °C/min en función de el tamaño del barrido

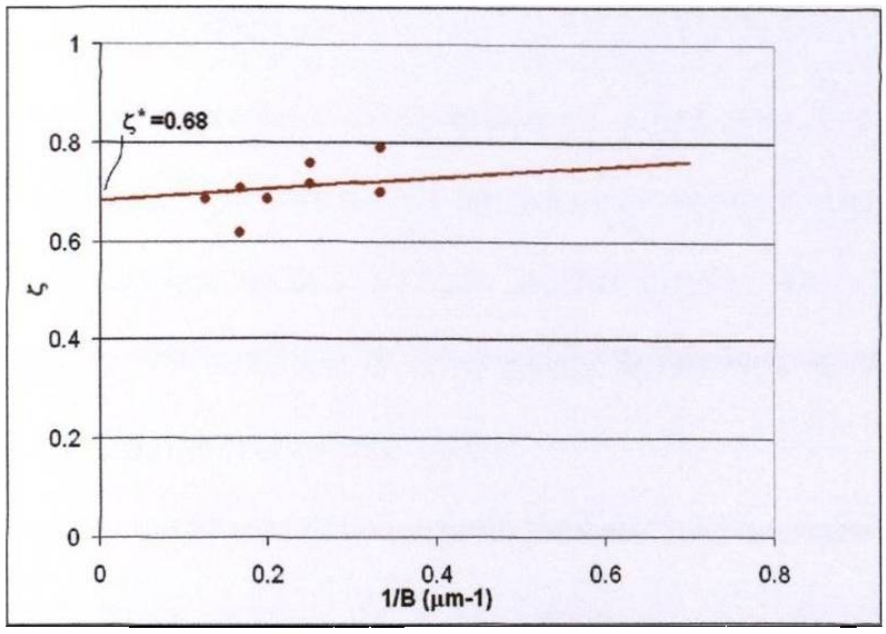

Fig. 79 Exponente de rugosidad de muestras enfriadas en N_2 líquido en función de el tamaño del barrido

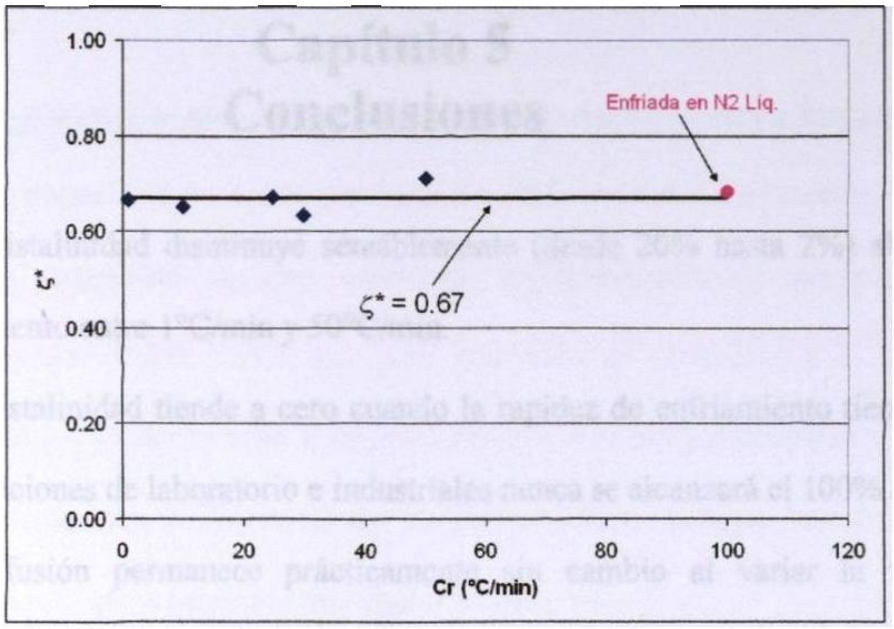

Fig. 80 Gráfica que muestra como el exponente de autoafinidad obtenido como extrapolación a tamaño de barrido infinito es independiente de la rapidez de enfriamiento

Capítulo 5
Conclusiones

- El grado de cristalinidad disminuye sensiblemente (desde 20% hasta 2%) al aumentar la rapidez de enfriamiento entre 1°C/min y 50°C/min.
- El grado de cristalinidad tiende a cero cuando la rapidez de enfriamiento tiende a infinito, por lo que en condiciones de laboratorio e industriales nunca se alcanzará el 100% amorfo.
- El punto de fusión permanece prácticamente sin cambio al variar la velocidad de enfriamiento.
- La cantidad de material cristalizable durante el calentamiento aumenta conforme se incrementa la rapidez de enfriamiento, pero solo es suficiente para ser detectado cuando el PET se enfría a rapideces mayores de 10°C/min.
- Las condiciones óptimas de operación del microscopio de fuerza atómica en su modalidad de contacto, para el estudio de superficies de PET son: a fuerza constante de entre 1.3 y 0.3 nN según el tamaño del barrido disminuye de 10 a 1.5 μm. Una frecuencia de entre 1.2 y 0.5 Hz.
- Independientemente de las condiciones de cristalización, la superficie de las películas de PET está compuesta esencialmente por material amorfo.
- Las superficies de PET cristalizado dinámicamente presentan un comportamiento autoafín, aunque es conveniente revisar el efecto de la sensibilidad del AFM en otras superficies analizadas en otros trabajos para elucidar las causas del efecto del tamaño de barrido en el exponente de rugosidad.
- La rugosidad de las superficies del PET medida como el exponente de autoafinidad es una constante independiente de la rapidez de enfriamiento y es de $\zeta = 0.71$ sin considerar el efecto del tamaño del barrido y $\zeta^* = 0.67$ si se considera la extrapolación a tamaño de barrido infinito.

La hipótesis planteada que indica una relación estrecha entre las condiciones de cristalización y la rugosidad de las superficies de PET debe ser rechazada, aceptando el hecho de que la rugosidad es una constante independiente de las condiciones de cristalización. Hay que hacer notar que este resultado es contrario a lo observado en experimentos de un proyecto de tesis anterior hechos sobre iso-polipropileno, ya que como se mencionó anteriormente, a diferencia del iso-polipropileno, la superficie de las películas de PET está compuesta esencialmente por material amorfo.

Referencias Bibliográficas

1. C. Guerrero, V. González, "Fractales: fundamentos y aplicaciones. Parte II. Aplicaciones en Ingeniería de Materiales",Ingenierías, Vol. IV, No 12, pp. 15-20 2001 .
2. Heping Xie and David J. Sanderson, "Fractal effects of crack propagation on dynamic stress intensity factors and crack velocities", International Journal of Fracture 74: 29-42, 1995.
3. J.K. West et al. "The application of fractal and quantum geometry to brittle fracture", Journal of Non-Crystalline Solids 260, 99-108, 1999.
4. Mheran Karadar and Joseph O. Indekeu, "Wetting of fractally Rough Surfaces", Physical Review Letters, Vol. 65, No. 5, 662, 1990.
5. Hartmut Jurgens, Heinz-Otto Peitgen y Dietmar Saupe "El lenguaje de los fractales" Ecología Terrestre Investigación y Ciencia, pp. 46-57.
6. Valdez Cepeda and Solano Herrera, "Self-Affinity of records of Financial Indexes", Fractals, Vol.7.No.4 ,427-432, 1999.
7. B.J. West et al, " Fractal fluctuations in cardiac time series", Physica A 270, 552-566,1999.
8. Valdez Cepeda y Olivares Sáenz, "Geometría Fractal en la ciencia del suelo", Terra, Vol. 16, No. 3,pp. 277-288,1998.
9. Francisco Javier Garza Méndez, Tesis M.C, Facultad de Ciencias Químicas, U.A.N.L. 2001.
10. E. Reyes, C. Guerrero, V. González and M. Hinojosa, "Self-Affine Measurements on the Fracture Surface of Plastic Materials by AFM", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 578,351-356, 1999.

11. Jorge Aldaco Castañeda, Tesis M.C., Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, U.A.N.L., 2000.

12. V. González, O. Chacón, M. Hinojosa, C. Guerrero, " Statistical assesment of self-affine methods applied to short profiles", Fractals, Vol.10, No.3, pp. 373-386, 2002.

13. J.G Fatou, "Crystallization Kinetics", Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Supplement Volume,2nd Edition, J. Wiley and Sons, Inc., New York, 1989

14. Jozef Bicerano "Crystallization of Polypropylene and Poly (Ethylene Terephthalate)", J.M.S.-Rev. Macromol. Chem. Phys., C38 (3), 391-479 ,1998.

15. Paul J. Phillips, "Polymer crystals", Rep. Prog, Phys. 53, 549-604, 1990.

16. Carlos Alberto Avila Orta, Tesis Doctoral, Centro de Investigación en Química Aplicada CIQA, 2001.

17. J.P.K. Doye, "Computer simulations of the mechanism of thickness selection in polymer crystals", Polymer 41, 8857-8867, 2000.

18. Paul J. Phillips " Spherulitic Crystallization in Macromolecules", Handbook of crystal growth. Vol. 2, 1168-1216, 1994.

19. V.A. González, C.A. Guerrero, J.A. Aguilar, "Nucleación y crecimiento unidimensional. Parte I: El modelo y su validación.", Ingenierías, Vol.5, No.15, 38-43, 2002.

20. M.L. Di Lorenzo, C. Silvestre, " Non-isothermal crystallization of polymers", Prog. Polym. Sci. 24, 917-950, 1999.

21. Douglas F. Riddle, "Calculus and Analytic Geometry", Wadsworth Publishing Company, pp. 1-17, 1970.

22. Valdez Cepeda, Blanco Macías, " La geometría fractal en las ciencias de la tierra", Universidad y Utopía, Año VII, No.18,pp. 69-74, 2000.

23. A.H. Ramírez Guzmán, F. Angulo Brown y E. Yépez Mulia, "Geometría Fractal de la costa de Guerrero", Comunicación interna.

24. U. Ortiz y M. Hinojosa, "Geometría de fractales y autoafinidad en ciencia de materiales", Ingenierías, Vol. 1, No. 1, pp. 15, 1998.

25. B.B Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", New York, Freeman, 1982.

26. 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. 1996.

27. Paul Meakin "Fractals and Disoderly Growth", Journal of Materials Education 11, 105-167, 1989.

28. Jens Feder, "Fractals", Plenium Press N.Y 1988.

29. C. Vijayan, M. Ravicumar, "The Fractal Nature of Polymer Conformations", Journal of Chemical Education, Vol. 70, No. 10, 1993.

30. A. Majumdar, B. Bhushan, "Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces", Journal of Tribology Vol. 112, No. 2, 1999.

31. V.A. González, C.A. Guerrero, "Fractales: fundamentos y aplicaciones. Parte I: Concepción geométrica en la ciencia e ingeniería", Ingenierías, Vol. 4, No. 10, 2001.

32. Edgar Reyes Melo, Tesis M.C., Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, U.A.N.L., 1999.

33. Jean Schmittbuhl and Jean-Pierre Vilotte, Stéphane Roux, "Reliability of sel-affine measurements", Physical Review E, Vol. 51, No. 1,131-147, 1995.

34. "A Practical Guide To Scanning Probe Microscopy", Park Scientific Instruments. 1993-1997.

35. J.P. Jog, "Crystallization of Polyethyleneterephtalate" J.M.S.-Rev. Macromol. Chem. Phys., C35 (3), 531-553, 1955.

36. Susheng Tan, Aihua Su, Weihua Li, Enle Zhou, " New Insight into Melting and Crystallization Behavior in Semicrystalline Poly(ethylene terephthalate)", J. Polym. Sci. B: Polym Phys 38, 53-60, 2000.

37. F. J. Medellin Rodriguez, R. López Guillén, M.A. Waldo Mendoza, " Solid-State Polymerization and Bulk Crystallization Behavior of Poly(ethylene terephthalate) (PET)", J. Appl. Polym. Sci. 75, 78-86, 2000.

38. Tomás Lozano Ramírez , Tesis M.C., Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, U.A.N.L. 1998.

39. E. Ramírez, G. Martínez, B. Huerta, "Análisis y Evaluación de Plásticos", Centro de Investigación en Química Aplicada CIQA, 2000.

40. V.A. González, U. Ortiz, "Análisis de curvas DSC de polímeros. Desarrollo de un programa de cómputo", Ciencia UANL, Vol.1, No. 4,339-344, 1998.

41. M. Alanís, V.. González y C. Guerrero "Morfología de superficies en la cristalización de polímeros. I-*i-pp*",VII Simposium Latinoamericano de Polímeros, La Habana, Cuba (2000)

42. Mandelbrot B.B., "Fractal Carácter of Fracture Surfaces Metals", Passoja D.E. and Paullau A.J., Nature 308,pp. 721-722, 1984.

43. Bouchaud E., Lapasset G. and Planes J., Europhys. Lett., 13, pp. 73, 1990.

44. McAnulty P., Meisel L. V. and Cote P., Journal of Physics Rev. A 46, pp. 3523, 1992.

45. M. Hinojosa, E. Bouchaud and B. Nghiem, " Long Distance Roughness of Fracture Surfaces in Heterogeneos Materials", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.539, pp. 203-208, 1999.

46. C. Guerrero, E. Reyes and V. González, 'Fracture Surface of Plastic Materials The Roughness Exponent", Polymer V43(5),6683-6693, (2002)

47. Xavier Guerrero Dib, Tesis M.C. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, U.A.N.L. 2001.

48. Polymer Handbook, R.C. Robert, Polymer, 10, 113, 1969.

49. Leonardo Chávez Guerrero, Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, U.A.N.L. 2001.

Índice de Tablas

Tabla	Descripción	Página
1	Valores de K y n para diferentes morfologías y tipos de nucleación	12
2	Valores obtenidos mediante GPC para PET comercial	38
3	Efecto de la velocidad de cristalización en el exoterma de cristalización del PET	40
4	Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre las propiedades térmicas del PET	43
5	Resultados del análisis de autoafinidad de superficies de PET cristalizado dinámicamente	75

Índice de Figuras

Figura	Descripción	Página
1	Figura 1 La rapidez de cristalización en función de la temperatura	6
2	Figura 2 Modelo cristalino	7
3	Modelos de cristalización	8
4	Teoría de Superficie Rugosa	9
5	Modelo de la Teoría de Nucleación Secundaria (TNS)	10
6	Régimen I según la TNS	10
7	Régimen II según la TNS	10
8	Régimen III según la TNS	11
9	Proceso para formar la curva de von Koch	18
10	Copo de nieve	19
11	Movimiento browniano de una partícula en función del tiempo	21
12	Gráfica de autoafinidad ideal ilustrando ζ y ξ	24
13	Fuerzas interatómicas vs distancia de separación entre la punta y la muestra	25
14	Secuencia de operación en modalidad de contacto	26
15	Unidad repetitiva del PET	27
16	Métodos de síntesis del PET	28
17	Diagrama esquemático de un equipo DSC	30
18	Dimensiones de la punta y cantilever	35
19	Espectro de infrarrojo obtenido de la muestra de PET	36
20	Espectro de infrarrojo de un estándar de PET	37
21	Cromatograma de PET	38

22	Temperatura de cristalización del PET a diferentes velocidades de enfriamiento	40
23	Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre el grado de cristalización alcanzado por el PET	41
24	Efecto de la velocidad de enfriamiento en la temperatura de cristalización del PET	42
25	Termograma de muestras de PET durante el calentamiento a 10 °C/min. Después de haber sido enfriadas desde el fundido a diferentes velocidades	43
26	Efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la temperatura de fusión y cristalización	44
27	Temperatura de transición vítrea en función de la velocidad de enfriamiento	45
28	ΔCp durante la transición vítrea	45
29	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 50 °C/min. Tamaño de barrido de 10 μm	49
30	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 50 °C/min. Tamaño de barrido de 8 μm	50
31	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 50 °C/min. Tamaño de barrido de 6 μm	50
32	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 50 °C/min. Tamaño de barrido de 4 μm	51
33	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 50 °C/min. Tamaño de barrido de 3 μm	51
34	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 50 °C/min. Tamaño de barrido de 2.5 μm	52
35	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 30 °C/min. Tamaño de barrido de 10 μm	53
36	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 30 °C/min. Tamaño de barrido de 8 μm	53
37	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 30 °C/min. Tamaño de barrido de 7 μm	54

38 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 30 °C/min. Tamaño de barrido de 5 μm 54

39 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 30 °C/min. Tamaño de barrido de 3 μm 55

40 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 30 °C/min. Tamaño de barrido de 2 μm 55

41 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 25 °C/min. Tamaño de barrido de 6 μm 56

42 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 25 °C/min. Tamaño de barrido de 5 μm 56

43 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 25 °C/min. Tamaño de barrido de 3 μm 57

44 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 25 °C/min. Tamaño de barrido de 2 μm 57

45 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 25 °C/min. Tamaño de barrido de 1.5 μm 58

46 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 10 °C/min. Tamaño de barrido de 8 μm 58

47 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 10 °C/min. Tamaño de barrido de 6 μm 59

48 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 10 °C/min. Tamaño de barrido de 4 μm 59

49 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 10 °C/min. Tamaño de barrido de 3 μm 60

50 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min. Tamaño de barrido de 10 μm 61

51 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min. Tamaño de barrido de 8 μm 61

52 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min. Tamaño de barrido de 5 μm 62

53 Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min. Tamaño de barrido de 3 μm 62

54	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada a 1 °C/min. Tamaño de barrido de 2.5 μm	63
55	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido. Tamaño de barrido de 8 μm	64
56	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido. Tamaño de barrido de 6 μm	64
57	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido. Tamaño de barrido de 4 μm	65
58	Imagen AFM en 3D de superficie de película de PET enfriada en N_2 líquido. Tamaño de barrido de 3 μm	65
59	Análisis de autoafinidad de una imagen de 5 μm de barrido de una muestra enfriada a 25 °C/min	66
60	Distribución de exponentes de rugosidad (ζ), para los 250 perfiles de una imagen de barrido 5 μm de una muestra enfriada a 25°C/min	67
61	Gráficas de autoafinidad promedio de 12 imágenes de superficies de PET enfriadas a 1°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen	68
62	Distribución de exponentes de rugosidad de 3,000 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 1 °C/min	69
63	Distribución de exponentes de rugosidad de 3,750 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 10 °C/min	69
64	Distribución de exponentes de rugosidad de 3,500 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 25 °C/min	70
65	Distribución de exponentes de rugosidad de 3,000 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 30 °C/min	70
66	Distribución de exponentes de rugosidad de 3,000 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas a 50 °C/min	71
67	Distribución de exponentes de rugosidad de 1,500 perfiles correspondientes a imágenes de las muestras enfriadas en N_2 líquido	71
68	Gráficas de autoafinidad promedio de 15 imágenes de superficies de PET enfriadas a 10°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen	72
69	Gráficas de autoafinidad promedio de 14 imágenes de superficies de PET enfriadas a 25°C/min	73

70	Gráficas de autoafinidad promedio de 12 imágenes de superficies de PET enfriadas a 30°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen	73
71	Gráficas de autoafinidad promedio de 12 imágenes de superficies de PET enfriadas a 50°C/min, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen	74
72	Gráficas de autoafinidad promedio de 6 imágenes de superficies de PET enfriadas en N_2 líquido, a la derecha se indica el tamaño de barrido de cada imagen	74
73	Resumen de gráficas de distribución de exponentes de rugosidad para muestras de PET tratadas a diferentes rapideces de enfriamiento	75
74	Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 1 °C/min en función de el tamaño del barrido	77
75	Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 10 °C/min en función de el tamaño del barrido	77
76	Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 25 °C/min en función de el tamaño del barrido	78
77	Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 30 °C/min en función de el tamaño del barrido	78
78	Exponente de rugosidad de muestras enfriadas a 50 °C/min en función de el tamaño del barrido	79
79	Exponente de rugosidad de muestras enfriadas en N_2 líquido en función de el tamaño del barrido	79
80	Gráfica que muestra como el exponente de autoafinidad obtenido como extrapolación a tamaño de barrido infinito es independiente de la rapidez de enfriamiento	80