29

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

EFECTO DE LA CRISTALIZACION DINAMICA EN LA RUGOSIDAD DE PET

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:

ING. LAURA ORTIZ RIVERA

CD. UNIVERSITARIA NOVIEMBRE DEL 2002

L. O. R.

EFECTO DE LA CRISTALIZACION DINAMICA EN LA RUGOSIDAD DE PET

TM
TA455
.P5
O7
2002
c.1

2002

1080124320

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

EFECTO DE LA CRISTALIZACION DINAMICA EN LA RUGOSIDAD DE PET

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ING. LAURA ORTIZ RIVERA

CD. UNIVERSITARIA NOVIEMBRE 2002

FONDO TESIS MAESTRIA

TM
TA455
.5
7
2

B U Raúl Rangel Frías
UANL
FONDO
TESIS MAESTRIA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

EFECTO DE LA CRISTALIZACION DINAMICA EN LA RUGOSIDAD DE PET

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ING. LAURA ORTIZ RIVERA

CD. UNIVERSITARIA NOVIEMBRE 2002

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

EFECTO DE LA CRISTALIZACION DINAMICA EN LA RUGOSIDAD DE PET

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:
ING. LAURA ORTIZ RIVERA

CD. UNIVERSITARIA **NOVIEMBRE 2002**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

EFECTO DE LA CRISTALIZACION DINAMICA EN LA RUGOSIDAD DE PET

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:
ING. LAURA ORTIZ RIVERA

CD. UNIVERSITARIA **NOVIEMBRE 2002**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis: "Efecto de la cristalización dinámica en la rugosidad de PET" realizada por la Ing. Laura Ortiz Rivera sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El comité de Tesis

Asesor
Dr. Virgilio Angel González González

Revisor
Dr. Carlos Alberto Guerrero Salazar

Revisor
Dr. Javier Macossay Salazar

Vo.Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Subdirector de Postgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Noviembre del 2002

Agradecimientos

Gracias Dios por toda la felicidad con la cual me has colmado, gracias por tu reconfortante compañía.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y al Programa Doctoral por darme la oportunidad de superarme y encontrar nuevos retos.

Al Dr. Virgilio Angel González González por su paciencia, dedicación y por todos los conocimientos adquiridos a lo largo de mis estudios de postgrado. Gracias por dirigir este trabajo.

Al Dr. Carlos Alberto Guerrero Salazar gracias por sus sabios y atinados consejos, gracias por todo el apoyo y la confianza que me brindó al creer en este trabajo.

Al Dr. Javier Macossay Salazar por su gran disposición y dedicación para la revisión de la presente Tesis.

A todos los maestros del Programa Doctoral, Dr. Juan Aguilar Garib, Dra. Martha Guerrero, Dr. Virgilio González González, Dr. Moisés Hinojosa Rivera, Dr. Rafael Colás Ortíz, Dra. Patricia Rodríguez, Dr. Ubaldo Ortiz, Dr. Carlos A. Guerrero Salazar, Dr. Alan Castillo Rodríguez, Dr. Alberto Pérez, y Dr. Tushar Kanti Das Roy. Gracias por la formación académica y por compartir sus conocimientos.

A mis compañeros y amigos del programa doctoral: Chuy, Ivonne, Yezmin, Román, Erwing, Abraham, Lalo, Edén, Federico, Paco, Zarel, Jorge, Aarón, Claudia, Lourdes,

Fabiola, Paloma, Adela, Octavio, José Luis, Leonardo, Manuel. Gracias por su incondicional amistad.

A mis amigos de toda la vida: Gaby, Gerardo, Mayra, Venecia, Maru, Yola, Karina, Iliana, Nora. Gracias por que a lo largo de todo éste tiempo he contado con su presencia y sus palabras de apoyo.

A mi familia: Maru, Lety, Tere, Bety, Francisco, Miguel, José Luis, Arturo, Mamá y Papá. Gracias por ser mi sustento y consuelo, gracias por levantarme de todas mis caídas y sobretodo por confiar en mi.

A mis sobrinos: Marcel, Jazmín, Abraham, David, José Luis, Yahir, Eduardo, Mauricio, Arturo, Daniel y Juanito. Gracias por su alegría y cariño.

A la Familia Rodríguez Valdes por su cariño y todas sus atenciones.

A todas y cada una de las personas que hicieron posible este trabajo.

Ricardo

Para ti con amor

Índice

Resumen 1
Capítulo 1 Introducción 2
Objetivo e Hipótesis 4
Capítulo 2 Antecedentes y Fundamentos 5
2.1 Cristalización de Polímeros 5
2.1.1 Generalidades 5
2.1.2 Cristales Poliméricos 6
2.1.2.1 Monocristales 7
2.1.2.2 Esferulitas 7
2.1.3 Modelos de cristalización 8
2.1.3.1 Teoría de Superficie Rugosa 8
2.1.3.2 Teoría de Nucleación Secundaria (TNS) 9
2.1.3.3 Cristalización Isotérmica 11
2.1.3.4 Cristalización No-isotérmica 12
2.1.4 Cristalización del PET 13
2.1.4.1 Cristalización Molecular 13
2.1.4.2 Cristalización de la Masa 13
2.2 Geometría de Fractales 14
2.2.1 Geometría Euclidiana 14
2.2.2 Geometría Fractal y sus aplicaciones 14
2.2.3 Fractales 15
2.2.4 Dimensión Fractal 16
2.2.5 Fractales Autosimilares 18
2.2.6 Fractales Autoafines 20
2.2.7 Método para determinar el exponente de rugosidad 23
2.3 Microscopía de Fuerza Atómica 24
2.3.1 Microscopía de Fuerza Atómica en el modo de contacto 25
2.4 Generalidades del material plástico estudiado 26
2.5 Caracterización del material plástico 28
2.5.1 Espectroscopía de Infrarrojo (IR) 28
2.5.2 Cromatografía de Permeación en Gel (GPC) 29
2.5.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) 29
2.6 Estado del Arte 31
Capítulo 3 Desarrollo Experimental 32
3.1 Introducción 33
3.2 Caracterización del material plástico 32
3.2.1 Análisis de Espectroscopía de Infrarrojo 32
3.2.2 Cromatografía de Permeación en Gel 32
3.3 Preparación de las muestras 33
3.4 Análisis Térmico 33
3.5 Microscopía de Fuerza Atómica 34
3.6 Rugosidad 35
Capítulo 4 Resultados y Discusión 36
4.1 Caracterización del PET 36

4.1.1 Análisis de Espectroscopía de Infrarrojo **36**
4.1.2 Cromatografía de Permeación en Gel (GPC) **38**
4.2 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) **39**
4.2.1 Cristalización dinámica de PET durante el enfriamiento a diferentes velocidades desde el fundido **39**
4.2.2 Fusión del PET posterior a la cristalización dinámica **42**
4.3 Microscopía de Fuerza Atómica **46**
4.3.1 Condiciones óptimas de operación **46**
4.3.2 Análisis de la superficie de películas de PET **46**
4.4 Análisis de Autoafinidad **66**
Capítulo 5 Conclusiones **81**
Referencias Bibliográficas **83**
Índice de Tablas **88**
Índice de Figuras **89**
APÉNDICE A **I-IX**