

01190 2g.

REDUCCIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR
RODAMIENTO EN LLANTAS
MEDIANTE NUEVAS
COMBINACIONES DE MATERIALES
PARA LA CINTA DE RODAMIENTO

SARA RÍOS DORDELLY

DIRIGIDA POR EL
Dr. RICARDO CHICUREL UZIEL

División de Estudios de Posgrado de la Facultad de
Ingeniería, UNAM.

SEPTIEMBRE, 1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

274564



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

estudiados y al Ing José Luis Sánchez de la empresa Tornel por sus acertados comentarios.

Agradezco profundamente al Dr. Pedro Herrera del Centro de Investigación Científica de Yucatán por sus observaciones y su ayuda en la realización de las pruebas de DMA en el analizador Dupont y por la prueba de adhesión de una sola fibra.

Agradezco al Ing. Antonio Sierra y a sus colaboradores de la empresa CONDUMEX por permitirme utilizar sus instalaciones y equipo de mezclado para la fabricación de las probetas.

Quiero agradecer al Dr. Jorge Montemayor del Instituto de Física por la información proporcionada.

En la Facultad de Ingeniería quisiera agradecer al M en I Armando Ortíz por permitirme usar el microscopio electrónico y a la M. en I. Patricia Aguilar por la orientación brindada en los aspectos estadísticos del trabajo.

Quiero expresar un agradecimiento muy especial para los miembros del Instituto de Ingeniería, en especial a todos los integrantes de la USI, al Ing. Armando Rangel, Dr. Efraín Ovando y al M en I Gerardo Silva por el incondicional apoyo que siempre me brindaron.

Un reconocimiento para los alumnos que con el pago de su servicio social colaboraron de manera ardua en las diversas tareas que hicieron posible la culminación de este trabajo: AgnÍ Chávez, Daniel Chehata, Joel Ortíz, Fernando Ramírez, Angel Zacarías, Florentino García, Brenda Monrroy, Eduardo Alva, y Ricardo Moreno.

Finalmente, quisiera expresar mi agradecimiento a CONACyT, DGAPA y al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo económico brindado para llevar a cabo mi investigación doctoral.

AGRADECIMIENTOS

Todo mi respeto, admiración y gratitud para mi director de tesis el Dr. Ricardo Chicurel Uziel, quien supo guiarme y ayudarme a desarrollar mis habilidades en el campo de la investigación. Fue todo un privilegio haber tenido la oportunidad de trabajar con él.

También todo mi respeto, admiración y gratitud además de un reconocimiento muy especial para el Dr. Enrique Chicurel Uziel por caminar conmigo página a página por toda mi tesis y por sus comentarios siempre llenos de sabiduría.

No existen palabras suficientes para agradecer a la Dra. Florencia Serranía por el incondicional apoyo que me brindó a lo largo de este trabajo de investigación. Pocas personas son capaces de dar tan desinteresadamente tanta ayuda a los estudiantes. Asimismo, estoy en deuda con cada uno de los restantes miembros de mi comité Doctoral quienes con sugerencias facilitaron el desarrollo de este trabajo: Dr. Arón Jazcilevich Diamant, Dr. Luis Ferrer Argote y Dr. Angel Rojas

Una mención muy especial y todo mi agradecimiento para el Dr. Luis Felipe del Castillo por la invaluable orientación brindada para la realización de la discusión final de mi tesis.

Agradezco las facilidades recibidas por parte de las autoridades e investigadores del Instituto en Materiales de la UNAM por permitirme utilizar algunos de sus equipos, así como la ayuda y asesoría que oportunamente me brindaron especialmente el Dr. Baltazar Mena, el Ing. Alfredo Maciel, el Dr. Takeshi Owagua, el Dr. Gabriel Torres, la Dra. María Elena Villafuerte, la Dra. Lioudmila Fomina, el Dr. José Chávez, la M. en C. Leticia Baños Quím. Miguel Angel Canseco, Fís. José Guzmán, Quím. Carmen Vázquez y la Lic. Sara Jiménez.

Un agradecimiento especial para el Ing. Gustavo Arango de las industrias Quimir por proporcionarme la asesoría necesaria en la realización de los adhesivos

Contenido	Página
Agradecimientos	i
Contenido general	iii
Contenido de tablas	viii
Contenido de figuras	xii
Glosario de términos	xx
Nomenclatura	xxii
Abstract	xxiv
Resumen	xxv
Capítulo 1 Introducción	1
Capítulo 2 Antecedentes y Revisión Bibliográfica	8
2.1 Aspectos de la tecnología de las llantas	8
2.1.1 Diseño básico de una llanta	9
2.1.2 Construcción de la llanta	9
2.2 Materiales de la llanta	10
2.2.1 Tipos de elastómeros	11
2.2.2 Preparación de los compuestos de hule	13
2.2.2.1 Sistema de cargas de refuerzo	13
2.2.2.2 Sistema de estabilización	15
2.2.3 Vulcanización	15
2.2.4 Refuerzos de las llantas (cuerdas)	17
2.2.4.1 Materiales utilizados como refuerzos	17
2.2.5 Adhesión de las cuerdas	19

2.2.5.1	Función del adhesivo	21
2.2.5.2	Sistema RFL	22
2.3	Mezclado de los compuestos de hule	23
2.4	Proceso de vulcanizado	24
2.5	Preparación de especímenes	24
2.5.1	Temperaturas estándar	24
2.6	Pérdidas por rodamiento	25
2.6.1	Causas de las pérdidas por rodamiento	25
2.6.2	Pérdidas por rodamiento y la construcción de la llanta	27
2.6.2.1	Efecto del tamaño de la llanta	27
2.6.2.2	Efecto de la geometría de la cinta de rodamiento y hombro	27
2.6.2.3	Efecto de la composición del material de la cinta de rodamiento	28
2.6.2.4	Efecto de la velocidad del vehículo	32
2.6.2.5	Efecto de la presión de inflado	33
2.6.3	Desgaste de la cinta de rodamiento	34
2.6.4	Relación entre la temperatura y las pérdidas por rodamiento	36
2.6.5	Modelos matemáticos de la pérdida por rodamiento	37
2.7	Capacidad tractiva	38
2.8	Elastómeros reforzados	43
2.8.1	Materiales compuestos reforzados con partículas	50
2.9	Teoría de transferencia de esfuerzos en compuestos reforzados con fibras cortas	51
Capítulo 3	Materiales Propuestos y Métodos de Evaluación	52
3.1	Consideraciones en la selección de las materias primas	52
3.2	Determinación de los nuevos materiales	58
3.3	Formulación del compuesto de hule	58

3.4	Preparación de las materias primas	61
3.4.1	Preparación de los ingredientes de la formulación	61
3.4.2	Preparación de las fibras	62
3.4.3	Preparación de la arena	62
3.5	Proceso de mezclado convencional	62
3.6	Proceso de vulcanizado	65
3.6.1	Elaboración de moldes para las probetas	66
3.7	Proceso de mezclado y vulcanizado con poliuretano	67
3.8	Limpieza de fibras	67
3.9	Preparación del adhesivo RFL	68
3.9.1	Latizado de refuerzos con una solución RFL	68
3.10	Proceso para reducir la ruptura de la fibra	69
3.11	Métodos de caracterización del material	
	Compuesto	69
3.11.1	Análisis dinámico mecánico	69
3.11.2	Análisis termomecánico	70
3.11.3	Análisis dieléctrico	70
3.11.4	Análisis termogravimétrico	71
3.11.5	Prueba de tensión	72
3.11.6	Prueba de resiliencia	73
3.11.7	Prueba de compresión	75
3.11.8	Prueba de dureza	76
3.11.9	Prueba de fricción	76
3.11.10	Prueba de desgaste	79
3.11.11	Prueba utilizando el microscopio electrónico	79
3.11.12	Examen con el microscopio óptico	80
3.11.13	Prueba de adhesión de una sola fibra	80
Capítulo 4	Resultados	82
4.1	Análisis dinámico mecánico	82

4.2	Análisis termomecánico	90
4.3	Análisis dieléctrico	95
4.4	Análisis termogravimétrico	103
4.5	Prueba de tensión	103
4.6	Prueba de resiliencia	108
4.7	Prueba de compresión	113
4.8	Prueba de dureza	118
4.9	Prueba de fricción	123
4.10	Prueba de desgaste	134
4.11	Prueba utilizando el microscopio electrónico	138
4.12	Examen con el microscopio óptico	142
4.13	Prueba de adhesión de una sola fibra	143
4.14	Relación entre la histéresis y el módulo de pérdida	143
4.15	Efecto de la concentración y tipo de refuerzo en el comportamiento mecánico del hule natural y sintético	144
4.16	Relación de la prueba de dureza con las otras pruebas	145

Capítulo 5	Interpretación de resultados	147
5.1	Análisis dinámico mecánico	147
5.2	Análisis termomecánico	153
5.3	Análisis dieléctrico	156
5.4	Análisis termogravimétrico	159
5.5	Prueba de tensión	159
5.6	Prueba de resiliencia	161
5.7	Prueba de compresión	163
5.8	Prueba de dureza	164
5.9	Prueba de fricción	167
5.10	Prueba de desgaste	168
5.11	Prueba utilizando el microscopio electrónico	170
5.12	Examen con el microscopio óptico	171
5.13	Prueba de adhesión de una sola fibra	171
Capítulo 6	Discusión	172
Capítulo 7	Conclusión	181
Referencias		184
Apéndice		193

Indice de Tablas

Número	Título	Página
1-1	Requerimiento energético para la producción de algunos materiales	4
2-1	Capacidad de almacenamiento de energía de materiales estructurales	11
2-2	Los sistemas de vulcanizado influyen en la histéresis	16
2-3	Tendencias en los refuerzos	19
2-4	Coefficientes típicos de pérdida por rodamiento de cuerpos que giran libremente	25
2-5	Resistencia al rodamiento de algunas superficies	25
2-6	Valores típicos del coeficiente de fricción para distintos tipos de camino	41
2-7	Valores medios del coeficiente de resistencia al rodamiento del automóvil en función del tipo de camino y su estado	42
2-8	Efecto de la adhesión en los refuerzos	46
2-9	Efecto de los adhesivos en las propiedades de compuestos de hule natural reforzado con fibras cortas	48
3-1	Propiedades de las fibras de vidrio tipo S	54
3-2	Propiedades mecánicas de algunas fibras de carbono	55
3-3	Nombres designados a los diferentes materiales fabricados	59

3-4	Fórmula básica del sistema RFL	68
4-1	Datos obtenidos en la prueba de tensión con materiales con matriz de látex	108
4-2	Prueba de resiliencia en materiales con matriz de hule natural	108
4-3	Prueba de resiliencia en materiales con matriz de hule natural con sílica	109
4-4	Prueba de resiliencia en materiales cuya matriz es hule sintético	109
4-5	Prueba de resiliencia en materiales con matriz de hule sintético con sílica	110
4-6	Prueba de resiliencia con materiales cuya matriz es látex	110
4-7	Prueba de resiliencia con materiales cuya matriz es látex con sílica	110
4-8	Prueba de resiliencia auxiliada con una cámara de alta velocidad	111
4-9	Prueba de resiliencia auxiliada con una cámara de alta velocidad	111
4-10	Prueba de resiliencia auxiliada con una cámara de alta velocidad	112
4-11	Prueba de resiliencia auxiliada con una cámara de alta velocidad	112
4-12	Prueba de resiliencia auxiliada con una cámara de alta velocidad	112
4-13	Prueba de resiliencia auxiliada con una cámara de alta velocidad	113
4-14	Prueba de compresión en materiales cuya matriz es látex	117
4-15	Prueba de compresión en materiales cuya matriz es látex con sílica	118

4-16	Resultados de la prueba de dureza realizada en materiales a base de látex	123
4-17	Resultados de la prueba de dureza realizada en materiales a base de látex	123
4-18	Prueba de fricción a temperatura ambiente con materiales cuya matriz es látex	134
4-19	Prueba de fricción a temperaturas bajas con materiales cuya matriz es látex	134
4-20	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural	135
4-21	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural	135
4-22	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural con sílica	136
4-23	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural con sílica	136
4-24	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético	136
4-25	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético	137
4-26	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético con sílica	137
4-27	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético con sílica	138
4-28	Resultados de la prueba de desgaste en probetas de látex con y sin sílica	138
4-29	Adhesión de una sola fibra	143
5-1	Datos generados en el DMA 2980 TA Instruments correspondientes a las figuras 4-1 a 4-5	147
5-2	Datos generados en el DMA Dupont correspondientes a las figuras 4-6 a 4-9	149

Índice de Figuras

Número	Título	Página
2-1	Sección transversal de una llanta	10
2-2	Relación esfuerzo deformación para algunas fibras	20
2-3	Estructura del sistema RFL	22
2-4	Transición en polímeros amorfos	29
2-5	Curva típica de un perfil histerético de un material elastomérico	30
2-6	$\tan\delta$, módulo de almacenamiento (E') y de pérdida (E'') como función de la frecuencia	30
2-7	Módulo de almacenamiento y tangente de pérdida como función de la frecuencia y la temperatura	31
2-8	Efecto de un cambio súbito de frecuencia en la tangente de pérdida del SBR	32
2-9	La influencia de la temperatura de transición del polímero en el desgaste de la cinta de rodamiento	34
2-10	Efecto de la velocidad en la resistencia al rodamiento de llantas nuevas y de las mismas después de que la cinta de rodamiento ya se gastó	35
2-11	Pérdida por rodamiento de llantas de automóviles como función de la temperatura ambiente	36
2-12	Perfil histerético de una cinta de rodamiento de una llanta hecha con un hule SBR1500 (1Hz) y su relación con las propiedades de la cinta de rodamiento	39
2-13	El perfil de histéresis (1Hz) de un polímero ideal de una cinta de rodamiento	40

2-14	Efecto del adhesivo HRH en fibra de vidrio en una matriz de hule natural o de estireno butadieno	45
2-15	Efecto del contenido de fibras en la resistencia a la tensión para el hule natural reforzado con fibras cortas usando un sistema de adhesión RH. La dirección de las fibras es longitudinal	49
2-16	Efecto del contenido de fibra en la fuerza de tensión en hule natural reforzado con fibras cortas usando un sistema de adhesión RH. La dirección de las fibras es transversal	49
2-17	Efecto del contenido de fibra en el módulo de Young del hule natural reforzado con fibras cortas, utilizando un agente de unión RH en dirección longitudinal	50
3-1	Identificación de fases cristalinas para la arena de playa	56
3-2	Identificación de fases cristalinas para la arena de playa amplificadas en el eje Y	56
3-3	Granulometría por mallas vía seca	57
3-4	Granulometría por mallas vía húmeda	57
3-5	Cuchillas "single curve"	63
3-6	Cámara de mezclado	64
3-7	Gráfica obtenida durante el proceso de mezclado	65
3-8	Moldes para dar forma a las probetas	66
3-9	Efecto de la temperatura en la prueba de rebote para varios tipos de hule	74
3-10	Aparato medidor de resiliencia	74
3-11	Gráfica obtenida durante la prueba de compresión	75
3-12	Carro deslizador	77
3-13	Rampa de fricción	78

3-14	Dibujo representativo de la máquina Minimat	81
4-1	Prueba de DMA realizada a un HN	83
4-2	Prueba de DMA realizada a un HNA6	83
4-3	Prueba de DMA realizada a un HNFV6	84
4-4	Prueba de DMA realizada a un HNSFVA6	84
4-5	Módulos de almacenamiento para el HN, HNA6, HNSFVA6, HNFV6	85
4-6	Curvas de $\tan\delta$ para HN, HNS, HNFV15 "X", HNSFC6	86
4-7	Módulos de almacenamiento los mismos materiales de la figura anterior	86
4-8	Curvas de $\tan\delta$ para HS, HSS, HSSFC15 "X", HSFC15 "X", HSFC6	87
4-9	Módulos de almacenamiento para los materiales de la figura anterior	87
4-10	Curvas de $\tan\delta$ para HN, HSS, HS, HSSA15"W", HSA15"C", HSSA6"C", HNA15"W"	88
4-11	Módulos de almacenamiento para los materiales de la figura anterior	89
4-12	Curvas de $\tan\delta$ para HNSA6"C", HSA15"C", HNA6"C", HNA6"W", HNA8, HNA20, HNA6	89
4-13	Módulos de almacenamiento para los mismos materiales de la figura anterior	90
4-14	Prueba de cambio de dimensión para el HN	91
4-15	Prueba de cambio de dimensión para el HNA6	91
4-16	Prueba de cambio de dimensión para el HNFVA6	92
4-17	Prueba de cambio de dimensión para el HNFCA6	92
4-18	Prueba de cambio de dimensión para el HS	93

4-19	Prueba de cambio de dimensión para el HSA6	93
4-20	Prueba de cambio de dimensión para el HSFVA6	94
4-21	Prueba de cambio de dimensión para el HSFCA6	94
4-22	Curvas de $\tan\delta_d$ a las frecuencias desde 1Hz hasta 10 Hz para el HN	95
4-23	Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el HN en el rango de -100°C a 0°C	96
4-24	Curvas de $\tan\delta_d$ para el HNFVA6 a las frecuencias desde 1Hz hasta 10Hz	96
4-25	Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el HNFVA6 en el rango de -100°C a 0°C	97
4-26	Curvas de $\tan\delta_d$ para el HN a las frecuencias de 60 Hz, 200 Hz y 1000 Hz	97
4-27	Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el HN entre -100°C y 0°C	98
4-28	Curvas de $\tan\delta_d$ obtenidas para el HNAFV6 a 60Hz, 200Hz y 1000Hz	98
4-29	Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el HNAFV6 en el rango de -100°C a 0°C	99
4-30	Curvas de $\tan\delta_d$ para el HS en las frecuencias de 1Hz hasta 10Hz	99
4-31	Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el HS en el rango de -100°C a 0°C	100
4-32	Curvas de $\tan\delta_d$ para el HSAFV6 en las frecuencias de 1Hz hasta 10Hz	100
4-33	Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el HSAFV6 en el rango de -100°C a 50°C	101
4-34	Curvas de $\tan\delta_d$ para el HS obtenidas a 60Hz, 200Hz y 1000Hz	101

4-50	Prueba de compresión en materiales con matriz de HS y reforzados con fibras de vidrio y carbono	115
4-51	Prueba de compresión en materiales con matriz de HS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	116
4-52	Prueba de compresión en materiales con matriz de HSS y reforzados con fibras de vidrio y carbono	116
4-53	Prueba de compresión en materiales con matriz de HSS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	117
4-54	Prueba de dureza en materiales con matriz de HN y reforzados con fibras de vidrio y carbono	118
4-55	Prueba de dureza en materiales con matriz de HN y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	119
4-56	Prueba de dureza en materiales con matriz de HNS y reforzados con fibras de vidrio y carbono	119
4-57	Prueba de dureza en materiales con matriz de HNS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	120
4-58	Prueba de dureza en materiales con matriz de HS y reforzados con fibras de vidrio y carbono	120
4-59	Prueba de dureza en materiales con matriz de HS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	121
4-60	Prueba de dureza en materiales con matriz de HSS y reforzados con fibras de vidrio y carbono	121
4-61	Prueba de dureza en materiales con matriz de HSS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	122
4-62	Prueba de fricción en materiales con matriz de HN y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	124
4-63	Prueba de fricción en materiales con matriz de HNS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	125
4-64	Prueba de fricción en materiales con matriz de HS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	126

4-65	Prueba de fricción en materiales con matriz de HSS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	127
4-66	Prueba de fricción en materiales con matriz de HN y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena a bajas temperatura	128
4-67	Prueba de fricción en materiales con matriz de HNS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena a bajas temperaturas	129
4-68	Prueba de fricción en materiales con matriz de HS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena a bajas temperaturas	130
4-69	Prueba de fricción en materiales con matriz de HSS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena a bajas temperaturas	131
4-70	Prueba de fricción en materiales con matriz de HN y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena a altas temperaturas	132
4-71	Prueba de fricción en materiales con matriz de HNS y reforzados con fibras de vidrio y carbono y arena	134
4-72	Fotografía del HNFVA15 "W" obtenida con el microscopio electrónico	139
4-73	Fotografía del HNFV60 "X" obtenida con el microscopio electrónico	140
4-74	Fotografía del HNA15 "W" obtenida con el microscopio electrónico	141
4-75	Fotografía de una muestra de látex reforzado con fibra de carbono obtenida con el microscopio óptico	142
4-76	Relación entre la histéresis y el módulo de pérdida para diez materiales compuestos	143
4-77	Comparación entre relaciones de módulos elásticos teóricos y los obtenidos experimentalmente para materiales con fibra de vidrio	144

4-78	Comparación entre relaciones de módulos elásticos teóricos y los obtenidos experimentalmente para materiales con fibra de carbono	145
4-79	Relación dureza contra módulo de Young a partir de las pruebas realizadas en esta investigación y datos de Powell	146
4-80	Relación entre los valores de la prueba de resiliencia y dureza	146

Glosario de términos

Autonomía.	Distancia máxima en plano que puede recorrer un vehículo utilizando la energía almacenada a bordo.
Calandreo.	Proceso mecánico de integración utilizando rodillos para integrar fibras a los elastómeros.
Capacidad tractiva.	Fuerza de fricción que puede desarrollar una llanta motriz.
Cargas de refuerzo.	Son los ingredientes reforzantes (pigmentos) de una formulación para la fabricación de un hule.
Ciclo de mezclado.	Proceso completo de incorporación de todos los ingredientes que intervienen en la formulación para la fabricación del nuevo material compuesto.
Cinturones de refuerzo.	Pieza rectangular de hule reforzado con fibras que se localizan por debajo de la cinta de rodamiento que sirve para aumentar la rigidez del la cinta de rodamiento.
Compuesto de hule.	Elastómero que ha sido mezclado con todos los ingredientes de una formulación con el fin de mejorar sus propiedades.
Curado.	Vulcanizado.
DEA.	Análisis dieléctrico a la que se sometieron los materiales compuestos y elastoméricos.
DMA.	Análisis dinámico mecánico a la que se sometieron los materiales compuestos y elastoméricos.
Elastómero.	Polímero cuya principal característica es la capacidad de pasar grandes deformaciones y al retirar el esfuerzo que las provoca recuperar su estado original.
Formulación de un compuesto.	Ingredientes especialmente determinados para mejorar ciertas propiedades de un elastómeros.

Formulación típica.	Formulación determinada para la fabricación de un elastómero para un fin particular.
Histéresis.	Energía pérdida por ciclo de deformación.
Homopolímero.	Polímero formado con un solo monómero.
Hule natural.	Hule natural que ya ha sido mezclado con todos los ingredientes de su formulación.
Hule sintético.	Elastómero que en su formulación incluye 70% del copolímero estireno butadieno y 30% de polibutadieno.
HRH	Sistema de adhesión que consiste de hexametimetramina, resorcinol y sílica hidratada
Ingredientes de la formulación.	Componentes de una formulación para la fabricación de un elastómero. Entre ellos no están los materiales de refuerzo como las fibras o la arena.
Matriz elastomérica.	Compuesto de hule que será reforzado con fibras o con arena.
Material compuesto.	Material formado con uno de los elastómeros de la investigación y reforzado con fibras de vidrio o carbono o arena.
Material de refuerzo.	Fibras de vidrio, fibras de carbono, arena, fibra de vidrio combinada con arena y fibra de carbono combinada con arena.
Mezclado.	Proceso de incorporación de ingredientes de la formulación para la fabricación un material elastomérico.
Módulo de almacenamiento.	Medida de la rigidez de un material, en las pruebas del DMA se denomina con E' .
Módulo de pérdida.	Medida de la disipación o pérdida de energía, en la prueba del DMA se denomina con E'' .
Nuevo material compuesto.	Material formado con una matriz de hule natural o sintético y reforzado con fibras de vidrio, carbono o arena.

Pérdida por rodamiento.	Es la energía que se pierde por unidad de distancia recorrida.
Polímero amorfo.	Polímero cuya cadena molecular muestra una estructura desordenada con la característica de ser transparente.
Resistencia a la tensión.	Es la resistencia última del material
RH.	Sistema de adhesión que consiste de hexametimetramina y resorcinol.
Silano.	Agente de acoplamiento que mejora las propiedades reforzantes de la sílica en los hules.
SBR.	Copolímero estireno butadieno.
Solución RFL.	Adhesivo fabricado con una mezcla de resorsinol formaldrhído y látex.
Tangente de pérdida o factor de pérdida.	Es la relación entre el módulo de pérdida y el de almacenamiento, E''/E' .
TMA.	Análisis termomecánico a la que se sometieron los materiales compuestos y elastoméricos.
Vulcanizado.	Proceso que involucra aplicar presión y temperatura al que se someten algunos elastómeros.

Nomenclatura

δ	Ángulo de fase entre el esfuerzo y la deformación unitaria en el análisis mecánico dinámico
δ_d	Ángulo de fase utilizada en el análisis dieléctrico
E'	Módulo de almacenamiento
E''	Módulo de pérdida
e'	Permitividad

Pérdida por rodamiento.	Es la energía que se pierde por unidad de distancia recorrida.
Polímero amorfo.	Polímero cuya cadena molecular muestra una estructura desordenada con la característica de ser transparente.
Resistencia a la tensión.	Es la resistencia última del material
RH.	Sistema de adhesión que consiste de hexametimetramina y resorcinol.
Silano.	Agente de acoplamiento que mejora las propiedades reforzantes de la sílica en los hules.
SBR.	Copolímero estireno butadieno.
Solución RFL.	Adhesivo fabricado con una mezcla de resorsinol formaldrhído y látex.
Tangente de pérdida o factor de pérdida.	Es la relación entre el módulo de pérdida y el de almacenamiento, E''/E' .
TMA.	Análisis termomecánico a la que se sometieron los materiales compuestos y elastoméricos.
Vulcanizado.	Proceso que involucra aplicar presión y temperatura al que se someten algunos elastómeros.

Nomenclatura

δ	Ángulo de fase entre el esfuerzo y la deformación unitaria en el análisis mecánico dinámico
δ_d	Ángulo de fase utilizada en el análisis dieléctrico
E'	Módulo de almacenamiento
E''	Módulo de pérdida
ϵ'	Permitividad

e''	Factor de pérdida
R	Cociente entre la altura de rebote y la altura de la caída en la prueba de rebote
S	Tipo de fibra de vidrio cuyas características son la fuerza y la rigidez
T_g	Temperatura de transición vítrea

Abstract

Several battery powered electrical vehicles have been developed in the Engineering Institute of UNAM since 1993. A major consideration in the design of these vehicles is the efficient use of energy. As these vehicles are to be used in the city, their speed should be low; therefore the tyre rolling loss is considered much more significant than the aerodynamic friction loss. This motivated the undertaking of research leading to reducing the tyre rolling loss without diminishing the tractive capacity or wear resistance while maintaining a reasonable cost. One of the major advantages in reducing the tyre rolling losses in this type of vehicles is to increase the range obtainable with a battery charge.

To this end, the incorporation of a reinforcing material of a very low hysteresis in the tyre tread was considered. This property would then be reflected in the resulting composite. The reinforcing materials used in this research are: glass and carbon fibres, and beach sand. The matrix materials employed are natural and synthetic rubber

The most important result obtained is that the beach sand improves some properties of natural rubber namely, it reduces the hysteresis and the loss modulus. In the case of fibre reinforcements, the resulting composites exhibited increased hardness, elastic modulus and wear resistance.

Resumen

Desde 1993 se desarrollan en el Instituto de Ingeniería varios vehículos eléctricos de baterías en cuyo diseño se enfatiza el uso eficiente de la energía. Siendo éstos vehículos de uso urbano, la velocidad es generalmente baja y la pérdida de energía asociada con el rodamiento de las llantas es considerablemente mayor que la pérdida por fricción aerodinámica. Ello estimuló el interés por llevar a cabo una investigación conducente a reducir dicha pérdida por rodamiento en las llantas respetando siempre limitaciones tales como la capacidad tractiva, la resistencia al desgaste y el costo. Uno de los mayores atractivos para buscar reducir las pérdidas por rodamiento para los vehículos eléctricos es lograr una autonomía mayor al hacer un uso más eficiente de la energía almacenada en las baterías.

Como una alternativa a la construcción convencional de las llantas, se consideró la incorporación en la cinta de rodamiento de la llanta de un refuerzo de un material de muy baja histéresis, de tal manera que esta propiedad se viera reflejada en el material compuesto resultante. Los materiales de refuerzo que se utilizaron en la investigación son: las fibras de vidrio y de carbono y la arena de playa. Para las matrices se utilizó el hule natural y el sintético.

El resultado más importante de esta investigación, es sin duda, el descubrimiento de que la arena de playa, al ser utilizada como material de refuerzo, disminuye la histéresis y el módulo de pérdida del hule natural. Las fibras como material de refuerzo, mejoraron algunas propiedades: dureza, modulo y desgaste.

CAPÍTULO 1

Introducción

Esta tesis puede considerarse prácticamente como el preludio de una investigación en materiales compuestos cuya matriz no rígida es reforzada tanto con elementos fibrosos altamente frágiles como con gránulos muy rígidos. En este trabajo se generó una gran cantidad de información inédita, que para los investigadores de materiales compuestos, resultará interesante. Si acaso esta información existe, seguramente es guardada celosamente por la industria llantera y por supuesto no se tendrá acceso libre a ella. Con esta investigación jamás se pensó competir con la industria llantera pero sí acceder a un campo que hasta ahora ha sido esencialmente monopolizado por ella, como es el mundo de los hules.

1.1 Antecedentes de la investigación

Desde 1993 se desarrollan en el Instituto de Ingeniería varios vehículos eléctricos de baterías en cuyo diseño se enfatiza el uso eficiente de la energía. Siendo éstos vehículos de uso urbano, la velocidad es generalmente baja y la pérdida de energía asociada con el rodamiento de las llantas es considerablemente mayor que la pérdida por fricción aerodinámica. Ello estimuló el interés por llevar a cabo una investigación conducente a reducir dicha pérdida por rodamiento en las llantas respetando siempre limitaciones tales como la capacidad tractiva, la resistencia al desgaste y el costo. Uno de los mayores atractivos para buscar reducir las

pérdidas por rodamiento para los vehículos eléctricos es lograr una autonomía mayor al hacer un uso más eficiente de la energía almacenada en las baterías.

Del total de energía disponible en un vehículo convencional de combustión interna se pierde casi el 30% por efecto del rodamiento de las llantas. En un vehículo eléctrico, la pérdida de energía provocada por estas mismas llantas bajo las mismas cargas y presión de inflado podría llegar a ser de hasta un 50 o 60% (Curtiss, 1969).

Hasta ahora, los trabajos de investigación detectados en la literatura que están enfocados a buscar soluciones a la problemática de las pérdidas por rodamiento como los de Hess y Klamp en 1982 y Gelling en 1993 se refieren únicamente a materiales elastoméricos y no a materiales compuestos como es el caso de esta tesis.

Las pérdidas por rodamiento provienen esencialmente del comportamiento histerético de los elementos estructurales de las llantas ante ciclos de aplicación de esfuerzo. En las llantas radiales se ha logrado reducir significativamente la parte de la pérdida correspondiente a la interacción entre las cuerdas y la matriz elastomérica, quedando como fuente principal de esa pérdida la cinta de rodamiento (Curtiss, 1969 y Hirakawa y Ahagon, 1982). Se ha visto, que a menor histéresis del material de la cinta, es también menor la fuerza tractiva que puede desarrollar la llanta (Gelling, 1994). Esto se debe a que a menor histéresis, menor es la generación de calor. Dicho efecto impide que el elastómero se vuelva "pegajoso", condición que favorece la adhesión de la llanta al suelo logrando una buena tracción.

Como una alternativa a la construcción convencional, se consideró la incorporación en la cinta de rodamiento de la llanta de un refuerzo de un material de muy baja histéresis, de tal manera que esta propiedad se viera reflejada en el material compuesto resultante. Aunque la idea de reforzar un elastómero con fibras no es nueva (Curtis, Bader y Bailey, 1978), no parece haber antecedentes

de investigaciones enfocando su aplicación en cintas de rodamiento para reducir su pérdida histerética, con excepción de una referencia en la que se reporta el uso de poliamida ("nylon") (Kikuchi, 1996). Existen dos razones por las que se creyó se podían reducir las pérdidas histeréticas al introducir algún tipo de refuerzo dentro de una matriz elastomérica, como sería en una cinta de rodamiento. La primera es que las fibras, tanto la de vidrio como la de carbono, intrínsecamente tienen poca disipación y la segunda es la rigidez que éstas pueden proporcionar a la matriz elastomérica (ver fundamento teórico en el apéndice 1). Además de refuerzos de fibras se consideró la posibilidad de usar gránulos, concretamente de arena, con lo que se esperaba obtener buenas propiedades tractivas al mismo tiempo que proporcionarían rigidez a la matriz. Lo anterior constituye la hipótesis sobre la que se basa este trabajo.

Una reducción de la resistencia al rodamiento del 4% dará lugar a una reducción del 1% en el consumo de combustible (Marks, 1973). Schuring (1982) indicó que, si las pérdidas por rodamiento se pudieran reducir a cero, el consumo de energía se podría reducir entre un 12 y un 19%. De estadísticas norteamericanas, se sabe que los vehículos automotores consumen casi el 25% de todo el petróleo que se utiliza en EUA. Así, el potencial de reducción en consumo por reducción de las pérdidas por rodamiento es de aproximadamente 4% en términos globales. El porcentaje sería considerablemente mayor tratándose de uso urbano.

Al considerar la reducción de pérdida por rodamiento para hacer un uso más eficiente de la energía, no pudo evitarse considerar también el uso eficiente de la energía en la fabricación de las llantas. La fabricación de un neumático de hule sintético requiere el equivalente a siete galones de petróleo crudo, cantidad total basada en las materias primas y energía utilizada, mientras que para renovar un neumático, se precisan tres galones de petróleo o sea menos de la mitad del necesario para uno nuevo (Caín, 1994).

Las reservas mundiales actuales probadas de hidrocarburos son de alrededor de 8×10^{11} barriles. Estos eran de 10^{12} en 1990 (Energy Statistics SIEE, 1996). Las

reservas actuales probadas de México son de alrededor de 5×10^{10} barriles, mientras que en 1983 eran de 7.8×10^{10} aproximadamente (García, 1989). El consumo diario de hidrocarburos para el país es de casi 2 millones de barriles y se exportan a Estados Unidos 1.4 millones de barriles diarios (Informe del servicio de energía, 1997). Si el consumo sigue así, las reservas de México se acabarán antes de 50 años.

Actualmente, son muy pocos los países abastecedores de hule natural que cubren la demanda mundial de este material. Como no es suficiente, la producción de hules sintéticos cada día es mayor.

El requerimiento energético para la fabricación del hule natural es solamente una décima del de un hule sintético. Para hacer una tonelada de hule sintético se necesita el contenido de tres toneladas de petróleo, comparado con sólo 0.3 toneladas de petróleo por tonelada de hule natural.

En el caso de productos de hule vulcanizado se requiere, en promedio, 50 GJ/tonelada para convertir el hule "crudo" en un producto industrial. En números redondos, cada tonelada de hule natural ahorra al mundo casi 150 GJ. Así, considerando una producción de 3.5 millones de toneladas/año, el ahorro total correspondiente es de 200 000 barriles de petróleo por día (Allen, 1979).

Tabla 1-1. Requerimiento energético para la producción de algunos materiales (Allen, 1979)

MATERIAL	GJ/TONELADA
Madera	6
Hule natural	15
Vidrio	22
Papel	27
Acero	38
Cobre	46
Poliestireno /PVC	95
Estireno butadieno/SBR	156
Aluminio	330

Por lo que se puede ver, existe una buena razón para sustituir el hule sintético por el hule natural que es algo de lo que se pretende resaltar en esta tesis.

Finalmente, es oportuno señalar que la reducción de pérdidas por rodamiento es uno de muchos factores que intervienen en el uso racional de la energía como son el uso excesivo e indiscriminado de los vehículos, el inflado incorrecto de las llantas y la forma de conducir.

1.2 Objetivo de la investigación

El objetivo general de la investigación es encontrar un material para la construcción de llantas de los vehículos eléctricos, que redunde en una reducción de las pérdidas por rodamiento sin alterar negativamente su resistencia al desgaste ni su capacidad tractiva, dando preferencia también en lo posible a la sustitución del hule sintético por hule natural en vista del menor costo energético requerido en su fabricación. Otro objetivo fue determinar la metodología para la fabricación de dicho material. Cabe enfatizar que el objetivo general del proyecto está orientado a los vehículos eléctricos autónomos.

1.3 Plan de trabajo

Para obtener valores de módulo de almacenamiento, de pérdida y de $\tan\delta$, se llevaron a cabo pruebas de análisis dinámico mecánico (DMA). Se realizaron pruebas de análisis dieléctrico debido a que es una prueba que se encuentra muy relacionada con el análisis dinámico mecánico. Para conocer los valores de temperatura de transición se realizaron pruebas de análisis termomecánico (TMA). El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó para determinar a que temperatura los materiales comienzan su degradación. Las pruebas de tensión, compresión, dureza, resiliencia, fricción y desgaste se llevaron a cabo para completar la caracterización de los materiales compuestos. Las observaciones en el microscopio electrónico y en el óptico se hicieron para determinar el estado final de las fibras y gránulos de arena así como su distribución. La última prueba que se

realizó fue la de adhesión de una sola fibra, la cual se efectuó para confirmar algunos resultados de adhesión entre las fibras y las matrices elastoméricas. Los valores de histéresis se obtuvieron a partir de los resultados de la prueba del DMA y de resiliencia.

Debe resaltarse que las pérdidas en la cinta de rodamiento dependerán no solamente de la histéresis del material sino también de la rigidez, ya que al aumentar ésta se reducen las deformaciones producida por una carga dada.

1.4 Actividades más relevantes de este trabajo

- a) La identificación de la fuente principal de la pérdida de energía en las llantas actuales.
- b) La recopilación de la información sobre el comportamiento de las cintas de rodamiento difícil de conseguir.
- c) El establecimiento de una metodología para la elaboración de estos nuevos materiales con la que se obtuvieron buenos resultados y en ocasiones superiores a los pocos reportados en la literatura.
- d) Diseño y adecuación de los experimentos de tal modo que se pudieran llevar a cabo en equipos diversos que no eran específicos para usarse con materiales de matriz elastoméricas.
- e) Generación de datos que no existen en la literatura disponible. Aunque en muchos casos los resultados son cualitativos más que cuantitativos, éstos presentan con claridad tendencias que se pueden seguir confiablemente. La elaboración de estos materiales es de por sí difícil y las limitaciones en la infraestructura disponible para realizar este trabajo la hicieron aún más.

- f) Obtención de resultados importantes como fue el disminuir la histéresis y el módulo de pérdida del hule natural, lo cual representa el objetivo principal de la tesis. Es de esperarse que una llanta fabricada con un material con las características antes mencionadas tenga pocas pérdidas por rodamiento. También se lograron módulos de Young de hasta 10 veces el de los elastómeros. Se encontró que la sílica ayuda a que los adhesivos aplicados a los materiales de refuerzo actúen eficientemente.

CAPITULO 2

Antecedentes y Revisión bibliográfica

2.1 Aspectos básicos de la tecnología de las llantas

La función más básica de las llantas es soportar el peso del vehículo, lo cual genera una *carga radial* en la llanta. Cuando éste entra en una curva, se desarrolla una carga lateral, que permite a las llantas cambiar de dirección. Si las llantas no pudiesen mantener dicha carga, el vehículo continuaría en dirección recta, aún cuando las ruedas hubiesen sido giradas un cierto ángulo.

Otra de las funciones de las llantas es la de transferir el par que es desarrollado en el motor así como el que se genera en las ruedas al frenar. Esta acción da lugar a la *carga tractiva* o de tracción. Si una llanta no puede desarrollar una carga tractiva igual o mayor que la requerida para la aceleración y/o frenado, entonces se patinará. Bull en 1939, Novopolsky en 1959, Seitz *et al*, 1986 y Bastow y Howard en 1993 tratan estos y otros aspectos de la mecánica de las llantas con más detalle.

2.1.1 Diseño básico de una llanta

Una llanta es una estructura de cuerdas y hules; tiene capas de cuerdas de refuerzo que se extienden transversalmente de ceja a ceja; por encima de éstas y por debajo de la cinta de rodamiento, se encuentran ubicados los cinturones de refuerzo que aumentan la rigidez de la llanta. Los requerimientos de la estructura de una llanta son básicamente los de una envoltura de tela ahulada que posee un alto grado de resistencia a la tensión y a la fatiga, bajo una constante flexión. Esta envoltura requiere de un colchón de hule adecuado y bien distribuido alrededor de las cuerdas de la envoltura de tela, el cual debe encontrarse bien anclado a una ceja rígida que a su vez, dé forma a la rueda de la llanta. La cinta de rodamiento proporciona la tracción necesaria sobre el suelo (Sarver, 1987).

2.1.2 Construcción de la llanta

Las llantas están formadas de muchas partes unidas para formar una estructura completa. Éstas incluyen las cejas, las cuerdas, las tiras, las costillas, la cinta de rodamiento, las paredes laterales, el hombro y el revestimiento (Fig. 2-1).

La *ceja* es un manojo de alambres que se encuentra alrededor de la circunferencia del "rim" la cual se cubre con la orilla interior de las tiras. Las *costillas* son las secciones de la llanta que están entre las paredes laterales y la cinta de rodamiento. El *hombro* se encuentra entre la cinta de rodamiento y la pared lateral.

La *cinta de rodamiento* es la parte de la llanta que hace contacto con el suelo. Ésta lleva ranuras que forman un dibujo diseñado para proporcionar la máxima fuerza friccionante con el mínimo de ruido. El *revestimiento* es una capa delgada de hule que contiene el aire comprimido y que cubre la superficie interior de la *carcaza* (Gillespie, 1992).

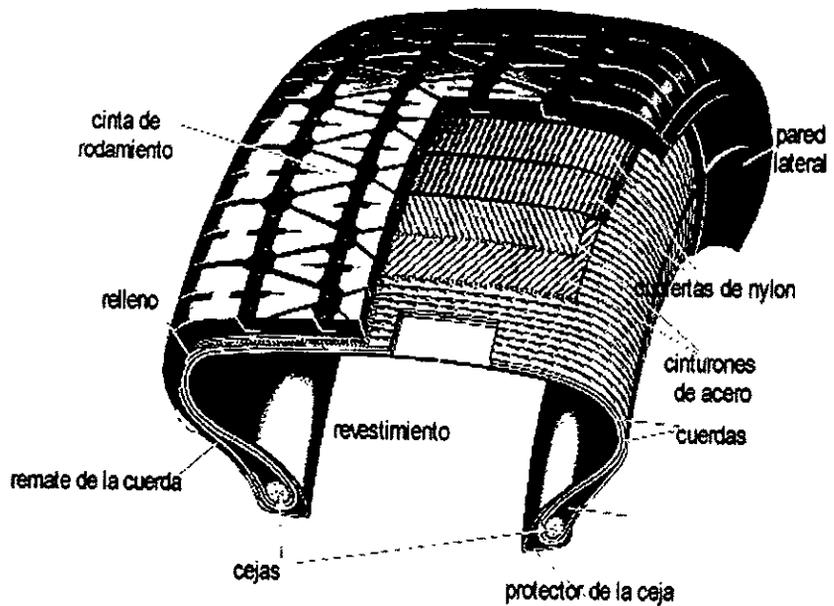


Fig. 2-1 Sección transversal de una llanta (Mark, Erman y Eirich, 1994)

2.2 Materiales de la llanta

Una llanta radial incluye hasta diez diferentes compuestos de hule así como cantidades apreciables de hule natural (Walter y Conant, 1974).

Para entender la ingeniería de las llantas, es necesario conocer el comportamiento de los diferentes tipos de materiales que se usan en su construcción.

El cuerpo de la llanta tiene tres distintas componentes estructurales: una matriz elastomérica, fibras de refuerzo (cuerdas), las cuales sirven para transmitir las cargas dentro de las llantas, y cuerdas de acero que además dan forma a las cejas de la llanta. Las demandas principales de una llanta son las de resistencia a la fatiga, resistencia a la tensión, durabilidad, capacidad tractiva y resiliencia.

2.2.1 Tipos de elastómeros

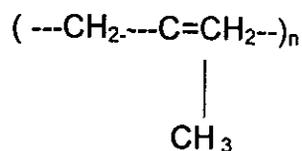
Los elastómeros comparados con cualquier otro material estructural (tabla 2-1), son únicos para satisfacer las demandas de las llantas por su alta deformación elástica, su ausencia de punto de cedencia y por su casi total recuperación de la deformación al ser liberados del esfuerzo. Los hules pueden ser deformados repetidas veces sin destruirse o sin sufrir una deformación permanente.

Tabla 2-1 Capacidad de almacenamiento de energía de materiales estructurales (Walter y Conant, 1974)

MATERIAL	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA (JOULES/KG.)
Hierro fundido	1
Aluminio	23
Acero	290
Madera	370
Hule vulcanizado	44000

El efecto de los materiales elastoméricos en la pérdida por rodamiento de una llanta es profundo y complejo. La pérdida por rodamiento depende no sólo de los polímeros básicos, las proporciones de las mezclas de los ingredientes del compuesto y del proceso de vulcanizado, sino también de la magnitud y frecuencia de los esfuerzos y deformaciones así como de las temperaturas en las diferentes partes de la estructura: cinta de rodamiento, hombro, pared lateral, área de la ceja, carcasa y otras (Schuring, 1983). Los *elastómeros* más importantes que se usan en llantas radiales son básicamente tres:

A. **Hule natural.** Se obtiene principalmente del látex del árbol *Hevea brasiliensis*. Su nombre químico es polisopreno. Su principal unidad de repetición es:



Actualmente se reconocen seis tipos básicos de hule natural, los cuales se procesan y compactan en bloques de 34 Kg. Cada tipo de hule presenta características diferentes (Davey y Loadman, 1984 y Winspear, 1958).

Clark en 1981, indicó que en las llantas radiales, se utiliza el hule natural en las siguientes proporciones: 82% en la cinta de rodamiento, 100% en la cubierta y 58% en las paredes laterales, aunque esto no parece ser universalmente cierto. En términos de pérdidas por rodamiento, el hule natural es el material que tiene menos (Sone, Ishida, Ishiguro, Hatta, Kasei y Fujimoto, 1994), además, es un mal conductor de calor por lo que sirve como aislante eléctrico y acústico, absorbe vibraciones y es insoluble en alcohol y agua pero sí es soluble en algunos ácidos grasos. A altas temperaturas el hule natural se vuelve pegajoso y a bajas temperaturas se vuelve rígido y frágil. Después de vulcanizado puede permanecer flexible a temperaturas de -55 °C sin tener que agregarle plastificantes. Sin embargo tiende a cristalizarse rápidamente si se almacena por largos períodos a bajas temperaturas.

B. Copolímero estireno-butadieno. El SBR, como se le conoce comúnmente, es un elastómero de bajo costo y su designación formal es Buna S. Es un copolímero de estireno y butadieno y es el polímero de mayor producción dentro de la industria hulera. Representa el 40% del total de dicha producción. Se utiliza principalmente en cintas de rodamiento de automóviles aunque tiene aproximadamente 10% más pérdida por rodamiento que el hule natural. Estos hules no desarrollan altas resistencias a la tensión sin la ayuda de cargas de refuerzo. La resiliencia y su comportamiento a baja temperatura son inferiores a los del hule natural aunque su resistencia al envejecimiento es mejor. Las temperaturas de operación están en el rango de -50 a +100 °C y no muestran ninguna tendencia a cristalizar a bajas temperaturas.

El SBR tiene muchas aplicaciones como sustituto del hule natural pero no en aplicaciones dinámicas severas que requieran una baja generación de calor al flexionarse (Davies et al, 1983).

C. **Polibutadieno**. Este elastómero es un homopolímero de butadieno. Es más difícil de procesar que el hule natural y que el estireno-butadieno, y por eso generalmente se usa en mezclas con otros hules. Frecuentemente se encuentra en las cintas de rodamiento, en las paredes y en alguno de los componentes de la carcaza de las llantas; ésto se debe a que ofrece buena resistencia a la abrasión además de mejorar la resistencia al desgaste, especialmente en la cinta de rodamiento. Se puede mezclar con hule natural y se ha reportado que tal composición mejora la resistencia a la fatiga y al rasgado (Gent, 1992). Con respecto a la pérdida por rodamiento, el polibutadieno tiene aproximadamente un 6% más que el hule natural y es generalmente muy resiliente a temperatura ambiente. Después de vulcanizado este hule muestra una muy alta resistencia a la abrasión. Su tracción en suelo mojado es pobre (Nagdi, 1993 y Harper, 1975).

2.2.2 Preparación de los compuestos de hule

Los hules naturales o sintéticos en su forma básica se deben mezclar con otros materiales para crear un compuesto fácil de procesar y con características mejoradas y hasta propiedades específicas deseadas ya que en su forma original resultan frágiles y poco elásticos.

El término “compuesto” muy utilizado en la industria llantera y del hule y se refiere al hule al que ya se le han incorporado todos los ingredientes requeridos para optimizar sus propiedades para una aplicación específica (Takeyama, *et al*, 1969, Barbin y Rodgers, 1994 y Fuentes, 1997).

2.2.2.1 Sistema de cargas de refuerzo

El *sistema de refuerzo* se compone de negro de humo, arcillas y sílicas. La formulación óptima, depende de la aplicación final del compuesto; por ejemplo, la cinta de rodamiento, la pared lateral, la carcaza y la cubrejeja.

El *negro de humo* N220 en partículas finas, es decir, de diámetro de 20-30 nm (10^{-9}) aumenta el módulo, la dureza, la resistencia a la abrasión y la resistencia al rasgado, pero también aumenta las pérdidas histeréticas del hule y su costo (Hess y Klamp, 1982).

En un experimento realizado en 1994 por Caín, se encontró que el negro de humo N220 presentaba una mayor pérdida de energía que aquellos que tienen partículas más grandes. Varias pruebas indicaron que los N330, N341 y N351 que poseen partículas de mayor tamaño, pueden dar una histéresis ligeramente inferior además de proporcionar una mayor resistencia al desgaste de la cinta de rodamiento

Las variaciones en histéresis están relacionadas con el área de la superficie de la interfaz entre el polímero y el negro de humo y el tamaño de las partículas (Hess y Klamp, 1982). Esto se atribuye a que las partículas pequeñas se pueden acomodar en los espacios que quedan entre las partículas de mayor tamaño reduciendo así el volumen efectivo del negro de humo. Mientras más pequeñas sean las partículas menores serán los espacios entre ellas por lo que tenderán a estar más en contacto.

Las *silicas* y *silicatos* son el segundo grupo más importante de cargas reforzantes que se usan en el hule, después del negro de humo debido a que no proporcionan el mismo nivel de refuerzo. Sin embargo, la mayor parte (88%) del total del consumo de cargas no negras, corresponde a cargas naturales, tales como arcilla y tierras silicas, que usualmente no tienen un potencial reforzante y son usadas principalmente para reducir el precio del compuesto.

La adición de la sílica en el compuesto de hule ofrece un gran número de ventajas, como es el mejoramiento de la resistencia al rasgado, la reducción en la generación de calor y el mejoramiento de la adhesión entre múltiples productos y la absorción de aceite. En 1976, Werner reportó que la adhesión de sílica en los compuestos de la cinta de rodamiento, ayuda a reducir la histéresis y el desgaste de la cinta.

La mayor parte de los productos de hule se curan con azufre, proceso que es inhibido por la presencia de la sílica. Un alto contenido de sílica en el compuesto con su gran área superficial da un efecto de desequilibrio, ya que afecta las uniones formadas entre los polímeros y los puentes de azufre (Peters, *et al* 1990). Esta situación puede ser atenuada mediante la adición de activadores.

Las propiedades fisico-químicas del hule dependen de la cantidad de enlaces entre el azufre y el polímero, así como del efecto reforzante impartido por la sílica.

2.2.2.2 Sistema de estabilización

El *sistema de estabilización* o sistema antioxidante protege los compuestos del envejecimiento y de la oxidación y, a largo plazo, mejora la duración de la llanta. Consta de ingredientes que retardan la degradación por efecto del oxígeno, ozono, calor, luz solar, catálisis por metales y la fatiga por flexión. Prácticamente los antioxidantes y antiozonantes más comunes se pueden dividir en tres clases:

- a) Aminas secundarias.- Monoaminas, diaminas y parafenilendiamina.
- b) Fenoles.- Alquilo fenol, alquilo difenol, sulfidos fenólicos y dihidroxi fenoles.
- c) Fosfitos.- Alquilo aril fosfito

2.2.2.3 Vulcanización

El *vulcanizado* es un proceso difícil de diseñar, especialmente cuando se trata de llantas, ya que se necesita tener conocimientos sobre la actividad de los aceleradores y de la naturaleza de los entrecruzamientos que ocurren en el compuesto.

El vulcanizado convierte un hule físicamente suave en un producto de ingeniería de alta calidad, mediante las reacciones químicas que crean una red tridimensional de enlaces entrecruzados entre sus cadenas poliméricas. A mayor número de enlaces aumenta el módulo, la resistencia a la abrasión, la resistencia a la tensión y se reducen las pérdidas histeréticas, aunque un entrecruzamiento

excesivo da como resultado una reducción en la resistencia a la tensión, al rasgado y a la fatiga por flexión.

Un sistema típico de vulcanización consta de tres componentes: a) activadores, b) agentes vulcanizantes (generalmente azufre) y c) aceleradores.

Los *activadores* son productos químicos que ayudan a los aceleradores a incrementar la rapidez de la vulcanización en los compuestos de hule.

Los *aceleradores* son ingredientes usados para reducir el tiempo de vulcanización. Aunque normalmente son una pequeña parte del compuesto, tienen una gran influencia sobre las propiedades físicas: como son resistencia, módulo, resiliencia y resistencia al envejecimiento.

Los sistemas de vulcanización también afectan la resistencia al rodamiento o histéresis de las mezclas de hule (tabla 2-2). Una vulcanización más firmemente desarrollada redundará en valores más altos de la prueba de rebote y mejor energía de absorción. Esto puede conseguirse utilizando sistemas de vulcanización más rápidos, con mayor aporte de calor durante la vulcanización o con puentes de disulfuro (Caín, 1994).

Tabla 2-2 Los sistemas de vulcanizado influyen en la histéresis (Caín, 1994)

HULES, COMPOSICIÓN, %		
	FÓRMULA 1	FORMULA 2
SBR/PBD	70/30	70/30
N339	73.8	73.8
Aceite	48.0	48.0
Azufre	2.00	0.80
DPG	0.30	0.30
Sulfenamida	1.25	2.00
Sufazan R ⁺	-----	3.50
DATOS DE HISTÉRESIS		
Dureza (Shore A)	60/58	64/63
Módulo 300%, psi	1400	1950
Resistencia a la tracción, psi	2630	2440
Elongación, %	500	450
Rebote por bola, %	37.0	37.8
Rebote por Péndulo, %	52.5	57.4
Generación de calor, °F	93	75
Temperatura de rodamiento, °F	230	208

2.2.3 Refuerzos de las llantas (cuerdas)

Las cuerdas constituyen los esqueletos de los productos que refuerzan, como son las llantas, las bandas y las mangueras. Proporcionan resistencia a los productos además de aumentar sus vidas y darles estabilidad dimensional. Las cuerdas están formadas por filamentos finos. Primeramente se usaron el algodón y el rayón, pero en la actualidad se prefieren el poliamide (nylon), el poliéster, el vidrio y el acero por poseer mejor resistencia bajo condiciones ambientales severas.

Mientras más flexible sea el material del que están hechas las cuerdas, más larga será la vida de la llanta. La flexibilidad evita distorsión en el área de contacto (Derringer, 1971). Una llanta flexible absorbe mejor las irregularidades del camino.

El material de las cuerdas que se usan en los cinturones de refuerzo de una llanta debe ser más rígido y fuerte que el de las cuerdas de la carcasa. Los cinturones proporcionan un sustrato rígido a la cinta de rodamiento reduciendo el área de contacto entre ésta y el piso. Además, protegen contra "ponchaduras" y permiten el uso de un compuesto de hule más suave en la cinta de rodamiento (Foldi, 1975 y Allen, 1979).

Las cuerdas contribuyen a la pérdida por rodamiento de la llanta debido al frotamiento entre éstas y el hule. Esta pérdida es considerablemente menor que la que ocurre debido a la histéresis del hule. (Lippmann, Oblizajek y Matters, 1978)

2.2.3.1 Materiales utilizados como refuerzos

Hasta ahora han sido siete los materiales utilizados en la elaboración de las cuerdas para las llantas: algodón, rayón, poliamide (nylon), poliéster, acero, fibra de vidrio y aramida. Los últimos tres se usan principalmente para los cinturones de la llanta (Mark, Erman y Eirich, 1994).

- A. **Cuerdas de acero.** Las fibras de acero que se utilizan en las cuerdas tienen una capa de bronce. Dichas cuerdas pueden tener diferentes configuraciones para proporcionar diferentes características, dependiendo de su aplicación. Mientras más gruesa sea una cuerda, más rígida será, aunque su resistencia a la fatiga se verá disminuida.
- B. **Cuerdas de Poliamida (Nylon).** Existe una gran variedad de este tipo de fibras sin embargo sólo dos han encontrado aplicación en llantas: Nylon 6.6 y nylon 6.
- C. **Cuerdas de poliéster.** Al igual que la poliamida, existen una gran variedad de fibras de poliéster disponibles para usarse en llantas, siendo la más importante el polietileno tereftalato (PET).
- D. **Cuerdas de vidrio.** La *fibra de vidrio* se elabora mezclando arena, arcilla, bórax y piedra de lima a una temperatura de 1200° C.

La fibra de vidrio es uno de los refuerzos más comunes en los materiales poliméricos; esto se debe a su bajo costo, alta resistencia a la tensión y alta resistencia química. En general, la fibra de vidrio se surte con un tratamiento de acabado que se basa en complejos de cromato y silanos. El roce entre las fibras durante su manejo puede provocar su rotura.

Las fibras de vidrio se han usado en los cinturones de refuerzo de las llantas aunque todavía con algunas desventajas con respecto a las otras fibras. A pesar de que se han hecho esfuerzos considerables para mejorar la adhesión entre éstas fibras y el hule aún no se ha logrado un resultado totalmente satisfactorio (Solomon, 1985 y Lubin, 1980).

- E. **Cuerdas de aramida.** Otra clase de fibras que tiene aplicación en las llantas es la aramida cuyo nombre comercial es Kevlar.

La tabla 2-3 Muestra la evolución de los materiales de refuerzo que se han usado en llantas.

Tabla 2-3 Tendencias en los refuerzos (Mark, Erman y Eirich, 1994)

ÉPOCA	TIPO DE CUERDA
1900-1956	Algodón
1939-1975	Rayón
1950 a la fecha	Poliamida (Nylon)
1965 a la fecha	Poliéster
1970 a la fecha	Cuerdas de acero
1975-1985	Fibra de vidrio
1980 a la fecha	Aramida

2.2.4 Adhesión de las cuerdas

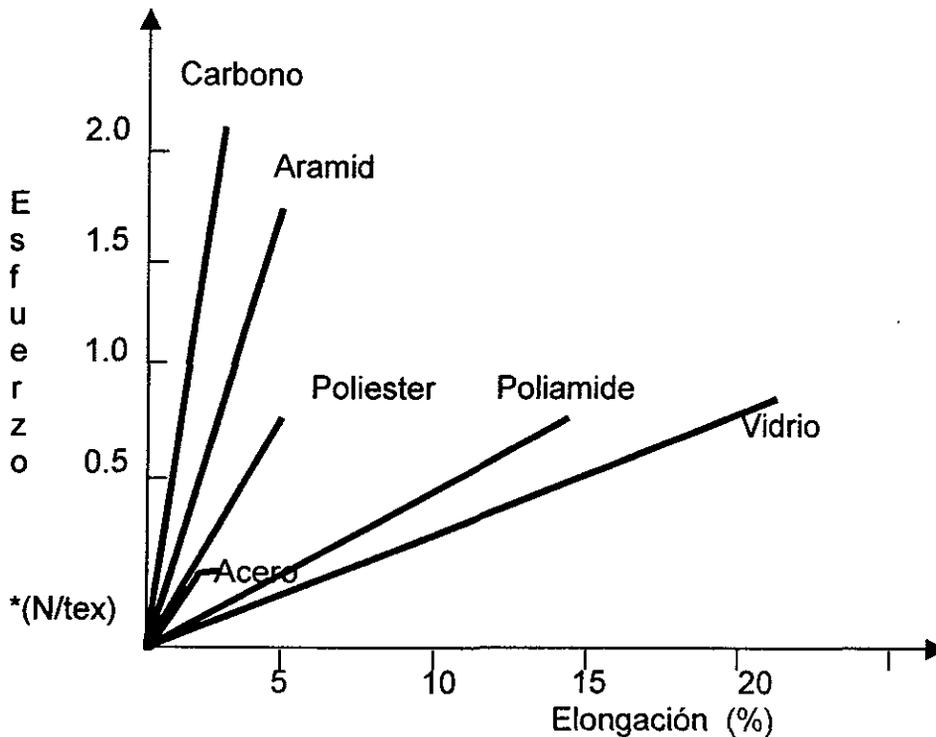
Muchos artículos elaborados con hule como las llantas, contienen refuerzos textiles para obtener alta resistencia y estabilidad dimensional. Estos compuestos pueden comportarse óptimamente, sólo, si la adhesión entre el refuerzo y el hule se logra. Cuando ocurre una separación parcial entre la fibra y el hule causado por una adhesión deficiente, hay concentración de esfuerzo en el punto de la separación y ahí, la temperatura se eleva propiciando la propagación de la falla.

La etapa más crítica al preparar las cuerdas que refuerzan una llanta, es el tratamiento que éstas deben llevar, el cual consiste en aplicar un adhesivo bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo. Este proceso proporciona las siguientes propiedades a las cuerdas:

- a) Adhesión con la matriz elastomérica.
- b) Optimización de las propiedades físicas de fuerza, durabilidad y elongación.
- c) Estabilización de las cuerdas.

Tanto las cuerdas de acero como las de carbono o las de vidrio que poseen un alto módulo (fig. 2-2), deben ser recubiertas con algún otro material (Mark, Erman

y Eirich, 1994) con el fin de mejorar la unión entre ellas y las matrices elastoméricas con que formarán un material compuesto. Por ejemplo, las madejas de fibras de vidrio deben ser tratadas mediante un adhesivo de inmersión.



*(Newtons/Tex = gr/denier X 0.0883)
denier=medida de peso para fibras muy finas

Fig. 2-2 Relación esfuerzo deformación para algunas fibras (Solomon, 1985)

Entre 1972 y 1983 se hicieron grandes esfuerzos para mejorar la adhesión entre el hule y las cuerdas hechas de fibra de vidrio. Se usaron Infinidad de productos con los que se bañaban las cuerdas o se agregaban al hule. Los principales ingredientes de estos productos eran: aminosilano, resina epóxica y látex de estireno butadieno con vinil piridina (Sasaki, 1972), 4-fenilfenol formaldehído junto con látex (Shirano, 1974), 5-metilol- 1 – azo- 3.7-dioxibicicloctano (Ryant, 1972), resina de resorcinol formaldehído, clorido vinileno, látex de hule natural y parafina microcristalina (Uffner, 1972), resorcinol-formaldehído (Marzocchi,

1974), una mezcla 50:50 de tetrametilol-3- α -metil glicol uril y resina de resorcinol formaldehído junto con el polímero 2-vinil piridina y estireno butadieno (Elmer, 1975), látex vinil piridina y resina de resorcinol formaldehído o-cresol (Elmer, 1976), terpolímero látex vinilpiridina, látex de polibutadieno (Lin, 1977). Se usó también un producto reactivo de lignina con formaldehído junto con el copolímero butadieno-ácido metacrílico (Neubert, 1977), látex de neopreno junto con látex de estireno butadieno con vinil piridina, resina de resorcinol formaldehído y cera (Girgis, 1979), fenol-aldehído (Girgis, 1983).

2.2.4.1 Función del adhesivo

Hay tres mecanismos en el sistema de adhesión de las cuerdas para llantas: molecular, químico y mecánico. La unión *molecular* se debe a la absorción de los químicos del adhesivo mientras las fibras están sumergidas en él. La unión *química* se logra mediante reacciones entre el adhesivo, las cuerdas y el hule. La adhesión *mecánica* es una función de la calidad de la cobertura de la cuerda por el compuesto del hule. Mientras mayor sea ésta mejor será la adhesión (Mark, Erman y Eirich, 1994). Para cada tipo de fibra se debe diseñar un sistema de adhesión (Kinlock, 1995) y debe de cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Formación rápida de la adhesión.
- b) Compatibilidad con los compuestos que están presentes.
- c) No debe causar efectos adversos en las propiedades de las cuerdas.
- d) Resistencia al calor.
- e) Resistencia al envejecimiento.
- f) Estabilidad mecánica.

Durante el proceso de la vulcanización de la llanta, se logra la unión del adhesivo entre el hule y las cuerdas; cuando se llega al punto de liberación de la presión en el curado del hule, también debe haberse completado el curado del adhesivo.

Los sistemas químicos posteriormente se dividen en soluciones y en sistemas de adhesión acuosos. El segundo, que es el más relevante para esta investigación, consiste en compuestos hechos de resorcinol, resina de formaldehído y látex y recibe el nombre de sistema de adhesión RFL.

2.2.4.2 Sistema RFL

El sistema de adhesión RFL (látex resorcinol formaldehído) (Fig. 2-3) fue desarrollado a principios de los años 40 y a la fecha, se sigue usando todavía dentro de la industria huleira (Solomon, 1985). Hasta ahora, ninguna otra resina la ha podido remplazar. Este sistema es el más usado para adherir hules y miembros que están sometidos a tensión (Rijpkema, *et al*, 1994 y van der Pol, Papegaaji y de Vos, 1996).

Para obtener una buena adherencia con el hule, las cuerdas de aramida, las de carbono y las de fibra de vidrio requieren otros tratamientos además del RFL.

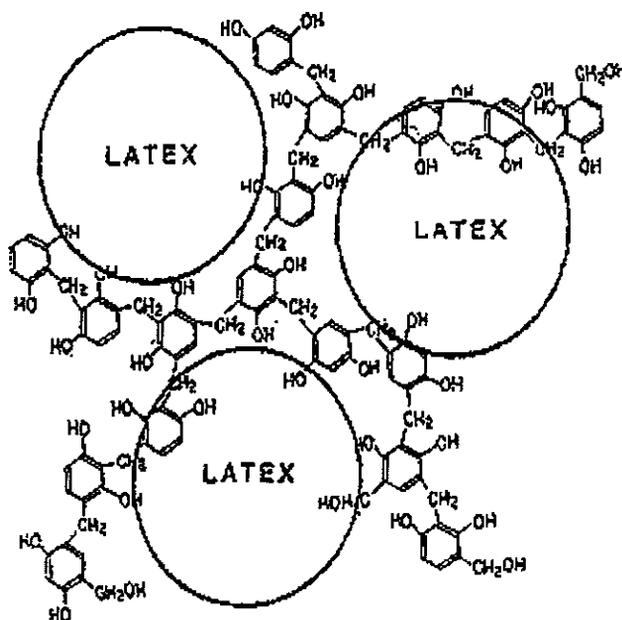


Fig. 2-3 Estructura del sistema RFL (Solomon, 1985)

La resina y el látex tienen una función específica en el sistema RFL. Sus proporciones son críticas. Si el nivel de resina es demasiado bajo, la fuerza de la solución será baja y no habrá suficiente entrecruzamiento (Porter, 1993). Por el contrario, si el nivel es demasiado alto, las cuerdas se harán muy rígidas. La resina se adhiere a la fibra y el látex al hule. Un nivel de látex bajo, se manifestará en una disminución en la adhesión del hule (Moult, 1977).

El formaldehído es otra variable importante en la solución RFL en relación con el resorcinol. La viscosidad de la solución varía directamente con el nivel del formaldehído. Arriba de una relación de 3:1 entre el formaldehído y el resorcinol, la viscosidad aumenta rápidamente así como su nivel de gelación.

La adhesión del hule con las cuerdas depende en gran medida del pH de la solución (Porter, 1993). La adhesión es alta si el nivel de pH es bajo.

El tiempo de impregnación de las fibras en la solución RFL tiene un efecto directo sobre la adhesión con el hule. Ésta aumenta con dicho tiempo, aunque si se alcanza el punto de saturación, ya no mejorará. Si las cuerdas se dejan demasiado tiempo dentro de la solución se hacen demasiado rígidas lo cual puede dar lugar a una disminución de flexibilidad y/o durabilidad.

El tipo de látex utilizado en una solución RFL también puede afectar la adhesión. El látex y el hule deben de ser químicamente compatibles para asegurar que se puedan mezclar y vulcanizar.

2.3. Mezclado de los compuestos de hule

El proceso de mezclado para materiales poliméricos como los elastómeros se lleva a cabo con una máquina mezcladora que tiene unas cuchillas rotatorias las cuales, al girar, forman una pasta del hule con que se alimenta. El mezclado del hule debe ser homogéneo. Los factores que requieren mayor atención en este proceso son:

- a) La preparación física de los materiales que serán mezclados
- b) El comportamiento del material durante el proceso
- c) El orden en que los ingredientes se introducen en la mezcladora

2.4 Proceso de vulcanizado

El hule sin vulcanizar, se endurece durante el invierno y se ablanda y despide un olor desagradable durante el verano. Con la adición de azufre, presión y calor al hule se mejora su resistencia y se limita su endurecimiento y ablandamiento con los cambios de temperatura (Alliger y Sjothun, 1964).

El vulcanizado se mide comúnmente usando un reómetro (Bikales, 1989) del cual se obtiene una gráfica de la variación del par como una función del tiempo.

2.5 Preparación de especímenes

Existen algunos métodos estandarizados para llevar a cabo el proceso de mezclado, vulcanizado y formado de especímenes como son las normas ASTM de la D3100 a la D3109. Muchas propiedades del hule importantes para realizar correctamente las pruebas físicas están implícitas en estas normas. En general, ninguna prueba se debe de consumir en muestras hasta después de 16 horas de haber sido vulcanizadas, ya que después de este proceso, ocurren cambios significativos en la estructura del material.

2.5.1 Temperaturas estándar

La norma ASTM D1349 proporciona una lista de temperaturas de pruebas estándar que coinciden con la lista dada por ISO. También se dan estándares de humedad, aunque no se cree que ésta tenga mucho efecto sobre las propiedades físicas del hule pero sí en los materiales compuestos de hule.

2.5 Pérdidas por rodamiento

En general se puede decir que cuando una llanta gira, independientemente de sus condiciones de operación, ésta disipará energía en forma de calor (Tabla 2-4). La resistencia al rodamiento o pérdida por rodamiento (tabla 2-5), es la medida de la energía perdida por una llanta cuando resiste las fuerzas que se oponen a su movimiento (Schuring, 1976, (Egeler, 1984) y Bandyopadhyay, Chandra y Mukhopadhyay, 1994). Aproximadamente el 30% de la energía mecánica disponible en un automóvil mediano que se desplaza a una velocidad constante de 80 km/h, se disipa por las llantas (Hill y Moore, 1978 y Gelling, 1994).

Tabla 2-4 Coeficientes típicos de pérdida por rodamiento de cuerpos que giran libremente (Schuring y Futamura, 1990)

CUERPOS	C_R , N/KN
Pequeña canica de acero rodando sobre un plato de acero	0.02
Disco de aluminio rodando sobre un plato de acero	0.07
Rueda de un tren girando sobre una vía	2.5
Neumático de un camión	7
Neumático de un automóvil	9
Neumático pinchado de una llanta de un automóvil	285

En la tabla 2-5 se presentan valores aproximados de resistencia al rodamiento en varias superficies.

Tabla 2-5 Resistencia al rodamiento de algunas superficies (Walter y Conant, 1974)

SUPERFICIE	RESISTENCIA AL RODAMIENTO LB/1000LB DE PESO DEL VEHÍCULO
Concreto	10-20
Asfalto	12-22
Lodo	25-37
Arena	60-150

2.6.1 Causas de las pérdidas por rodamiento

Una llanta consume energía de muchas maneras diferentes, en esta investigación sólo se mencionarán las más importantes (Novopolsky, 1959):

- a) **Histéresis.** Es la energía de deformación de un material que no es recuperable y representa el 90 ó 95% de la pérdida total (Bandyopadhyay, Chandra y Mukhopadhyay, 1994). En la cinta de rodamiento representa más del 60% de la pérdida (Hirakawa y Ahagon, 1982). Consecuentemente, ésta es la estructura de mayor interés en esta investigación.
- b) **Fricción entre la llanta y el piso.** La pérdida debido al patinaje de la cinta de rodamiento representa el 5 ó 10 % de la pérdida total. Este valor aumenta en superficies con un coeficiente de fricción alto, con mayor aspereza, con partículas sueltas y con la acción de fuerzas tractivas. Una explicación del aumento en las pérdidas por rodamiento con el aumento en la aspereza del camino es que ésta aumenta las deformaciones locales de la cinta de rodamiento y también estimula la propagación de vibraciones a través de toda la estructura de la llanta. (Williams, 1981 y Luchini y Simonelli, 1983 y Yamaguishi, *et al* 1987, Wischhusen, 1994).

La resistencia al rodamiento en carreteras de grava podría ser más de lo doble que la de una carretera dura (Billingley, Evans, Hulswit y Roberts, 1942 y Khromov y Konovalova, 1970). El consumo de potencia en caminos mojados es más grande que en los secos, en parte porque las llantas corren de alguna manera más frías y en parte porque se usa potencia para desplazar el agua. La pérdida de energía en el rodado libre es relativamente independiente del coeficiente de fricción entre la llanta y el piso (Seki, Sasaki y Tsunoda, 1969 y Egeler, 1984).

- c) **Fricción con el aire.** Representa entre 1.5 y 3% de la pérdida total causada por las llantas. Las cintas de rodamiento que se usan en la nieve tienen pérdidas mayores que las de las llantas ordinarias, y estas últimas más que las gastadas o sin dibujo. Esta pérdida aumenta con el diámetro de la llanta y con la velocidad del vehículo.

Algunos factores que reducen las pérdidas por rodamiento como son: mayor presión de inflado o reducción del espesor de la cinta de rodamiento pueden tener efectos desfavorables con respecto a la comodidad, capacidad tractiva y resistencia al desgaste. Igualmente el uso de polímeros de baja pérdida histerética pueden reducir la capacidad tractiva en piso mojado (Dijks, 1980, Thieme, Dijks y Bobo, 1981, Moore, 1981, Bschorr y Wolf, 1982 y Egeler, 1984 y Kikuchi, 1996)

2.6.2 Pérdida de rodamiento y la construcción de la llanta

Khromov en 1970 realizó un estudio sobre el papel que juegan las cuerdas y los compuestos del hule en la llanta con relación a las pérdidas de energía y demostró que en las llantas nuevas, dependiendo del tamaño, las cuerdas consumen entre el 30 y el 40%, mientras que el compuesto de hule del 60 al 70%.

2.6.2.1 Efecto del tamaño de la llanta

La pérdida por rodamiento es proporcional al ancho de la llanta (Bäumeier, 1987).

El coeficiente de resistencia al rodamiento de las llantas más grandes de camión, es más bajo que el de las llantas de los automóviles, debido a la mayor presión de inflado. Este coeficiente se encuentra en el rango de 0.005 hasta 0.012 para llantas de camión (Novopolsky, 1959, Ogorkiewwicz, 1959, Curtiss, 1969, Elliot, *et al*, 1969 y Seki, *et al*, 1969 y Thieme, *et al*, 1981).

2.6.2.2 Efecto de la geometría de la cinta de rodamiento y hombro

Una manera simple de minimizar la pérdida por rodamiento en cualquier llanta, es mediante la reducción del tamaño (ancho y alto) de la cinta de rodamiento, aunque también resulte esto en una disminución de la vida de la llanta (Billingsley, *et al* 1942, Novopolsky, 1959, Roberts, 1959, Curtiss, 1969, Elliot, 1969, Hunt *et al*, 1977, Jannarelli, 1981 y Treichel, 1982). Al reducir el espesor de la cinta de rodamiento de 13 a 2 mm en las llantas de un automóvil grande se encontró una

reducción de la pérdida de casi el 40%. El espesor del hombro (parte de la llanta que se encuentra entre las cinta de rodamiento y la pared lateral) también tiene una gran influencia en las pérdidas por rodamiento.

Se han realizado pruebas a llantas para medir el efecto sobre la pérdida por rodamiento, de tener o no tener algún tipo de dibujo. Algunos resultados muestran que no hay ningún efecto significativo (Williams, 1981), mientras que otros muestran que si lo hay (Gerresheim, 1983, Knight, 1983, Keefe, 1983).

2.6.2.3 Efecto de la composición del material de la cinta de rodamiento

Para reducir la histéresis del hule de la cinta de rodamiento, basta con variar la composición de hule, y la cantidad de negro de humo, aceite y agentes vulcanizantes. Con esto se puede lograr una reducción en la pérdida por rodamiento de hasta el 10%, aunque con una reducción del 5% de la tracción en suelo seco, o del 7% en suelo mojado (Sakhnovskii, *et al* 1974, Tarpian *et al*, 1979, Schuring, 1980, Martini, 1983, Yoshimura, *et al* 1983, Bond, *et al*, 1984, Brunot *et al*, 1984, Saito, 1986 y Yoshioka, *et al*, 1986, Askeland, 1990).

A una temperatura suficientemente baja las moléculas de los polímeros no tienen movilidad, cuando aumenta la temperatura, las moléculas reciben energía térmica que les permite moverse un poco, lo cual hace que el módulo del material disminuya ligeramente (fig. 2-4). Si se calientan lo suficiente, se llega hasta la temperatura de transición vítrea (T_g) donde el movimiento de las moléculas se hace más pronunciado y por lo tanto la rigidez del polímero se reduce aun más. También, a la temperatura de transición o mayor, si las moléculas se mantienen bajo esfuerzo, existe la oportunidad de que éstas se muevan y se acomoden un poco debido a un ligero desenrollamiento de sus cadenas, aunque, si la aplicación del esfuerzo es rápido no habrá tiempo para que esto ocurra. El proceso es elástico ya que el material se recupera al remover el esfuerzo.

De las propiedades dinámico mecánicas de un material, el módulo de un hule que se encuentra bajo cargas cíclicas (frecuencias más grandes a 0.1 Hz) es más

grande que bajo cargas estáticas, aun arriba de la temperatura de transición, porque bajo cargas cíclicas las moléculas del material no tienen tiempo para acomodarse (Collins, et al, 1964, Read y Dean, 1978 y Groves, et al, 1980). Este argumento sugiere que, a más alta frecuencia, el módulo será más alto para el mismo esfuerzo aplicado. Asociado con la rigidez está el factor de pérdida, $\tan \delta$, el cual es una manifestación de la histéresis. La $\tan \delta$ alcanza su máximo a la temperatura de transición donde grandes cantidades de energía mecánica se transforman en energía térmica. Si la energía no se disipa, entonces la temperatura se eleva. Esto sucede, generalmente en secciones gruesas de componentes que están sometidas a un esfuerzo alto a frecuencias altas. Si la temperatura se eleva demasiado la componente se degrada. En el rango normal de operación, es decir, muy arriba de la T_g , el valor de la $\tan \delta$ es mucho menor (fig. 2-5).

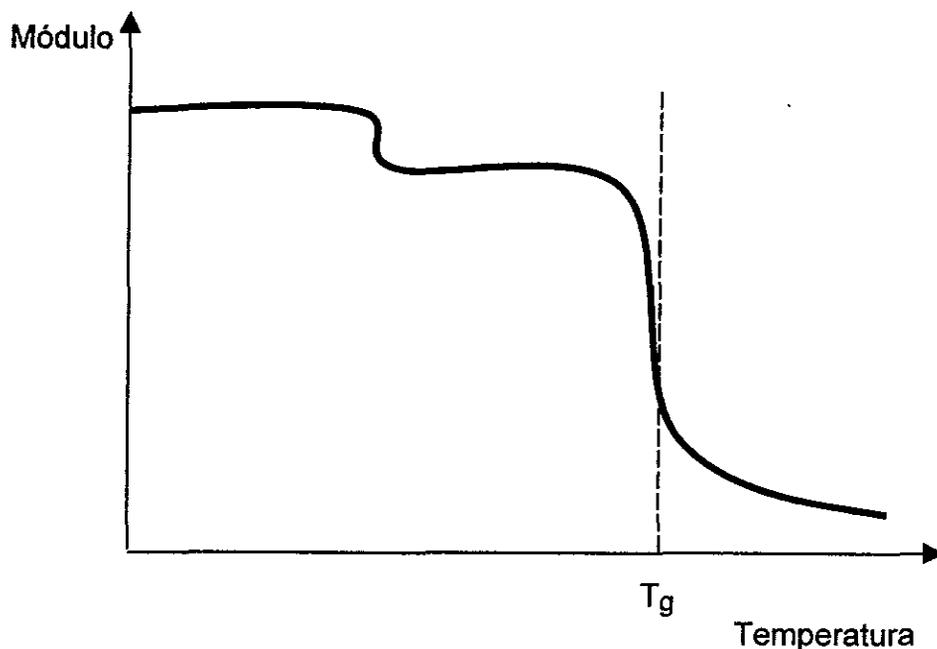


Fig. 2-4 Transición en polímeros amorfos (Powell, 1983).

Se sabe que para un material real, el módulo de pérdida E'' y la $\tan \delta$ tienen su máximo a cierta frecuencia como se muestra en la fig. 2-6. También en esta figura

se puede notar que el módulo de almacenamiento E' aumenta con la frecuencia (Kaufman, 1980, Young y Lovell, 1988 y Eisele, 1990).

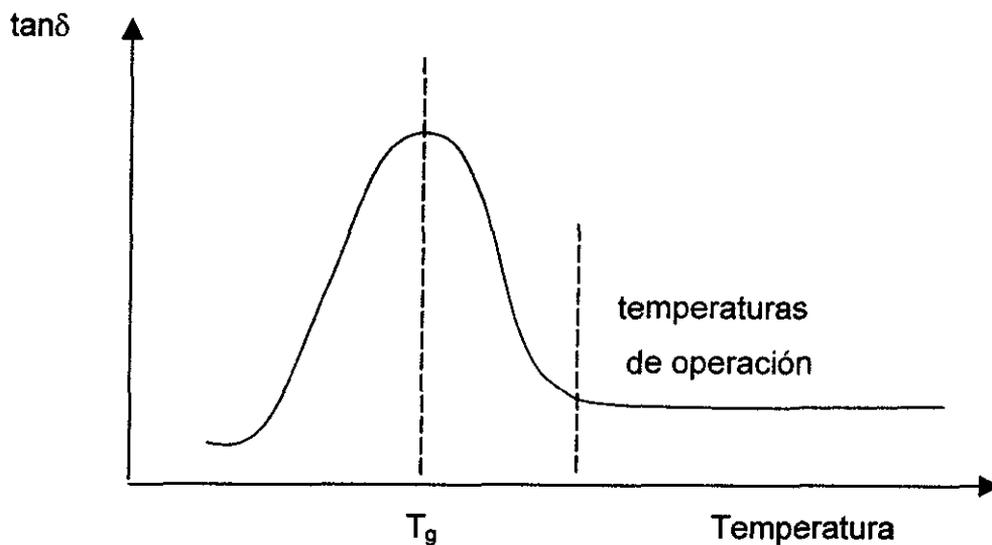


Fig. 2-5 Curva típica de un perfil histerético de un material elastomérico

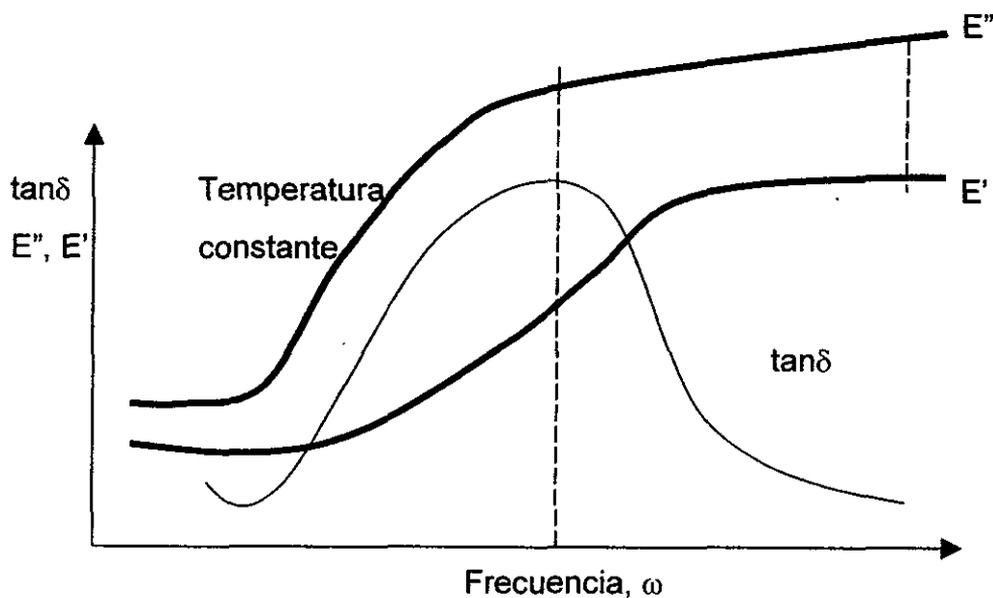


Fig. 2-6 $\tan \delta$, módulo de almacenamiento (E') y de pérdida (E'') como función de la frecuencia (Powell, 1983).

Las curvas características en la fig. 2-6 corresponden a una cierta temperatura y se han ido demostrando experimentalmente (Kummer, 1966 y Treloar, 1970) que un aumento en la temperatura mueve estas curvas hacia la derecha, así que los puntos máximos corresponderán entonces a frecuencias más altas. La fig. 2-7 muestra cómo la $\tan\delta$ y el módulo de almacenamiento varían tanto con la frecuencia como con la temperatura.

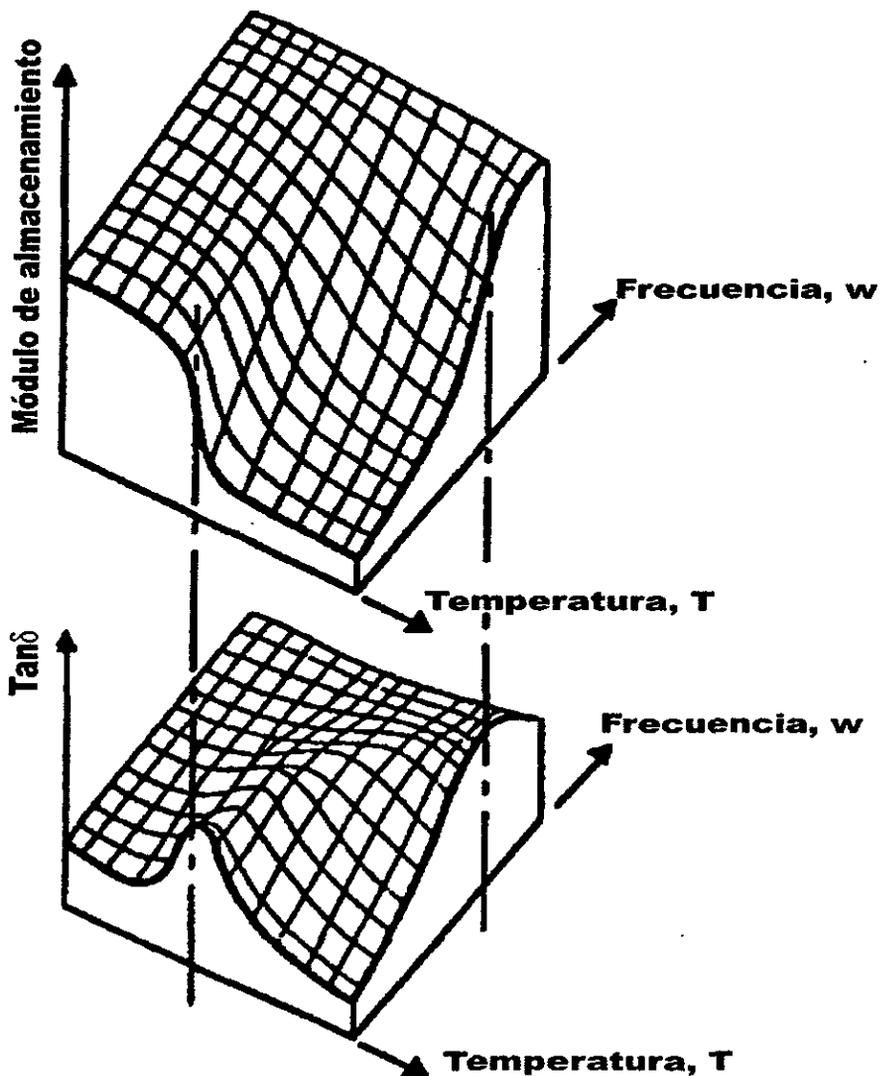


Fig. 2-7 Módulo de almacenamiento y tangente de pérdida como función de la frecuencia y la temperatura (Moore, 1993).

En la fig. 2-8 se muestra el comportamiento de la tangente de pérdida con cambios súbitos de frecuencia cuando el material de prueba es un copolímero estireno butadieno.

La pérdida por rodamiento del compuesto se puede relacionar con pruebas de histéresis tales como las de acumulación de calor o la del Flexómetro de Goodrich, así como con la prueba de resiliencia por rebote a temperatura ambiente y elevada. Los materiales que no absorben mucha energía, y en consecuencia tienen valores de rebote altos, son los mejores para reducir la resistencia al rodamiento (Chakraborty y Mukherjee, 1987, y Caín, 1994).

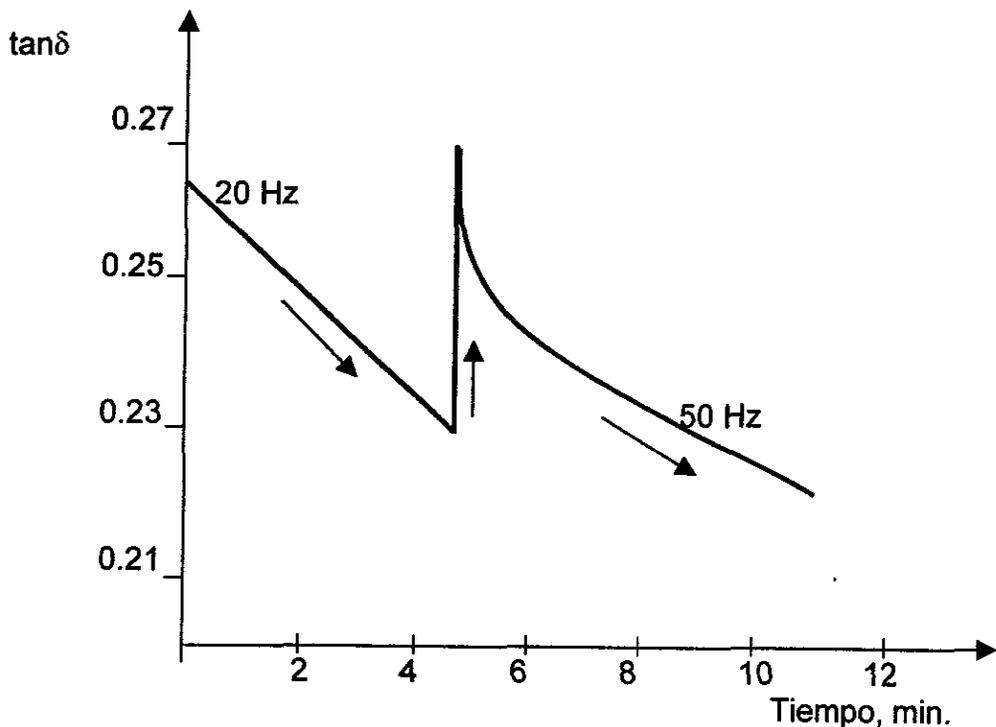


Fig. 2-8 Efecto de un cambio súbito de frecuencia en la tangente de pérdida del SBR (Schuring, 1980).

2.6.2.4 Efecto de la velocidad del vehículo

Novopolsky en 1959, observó que las pérdidas por rodamiento se incrementan al aumentar la velocidad si la temperatura de la llanta se conserva constante, pero

disminuyen cuando se alcanza la temperatura de equilibrio. La disminución se marca más a bajas velocidades.

Cuando una llanta está fría (Curtiss, 1969, Schuring, 1981 y Schuring, 1988), pequeños cambios en velocidad causan variaciones en las pérdidas por rodamiento, mientras que al final de un camino largo, después de haber alcanzado el estado de temperatura de equilibrio, las pérdidas por rodamiento son casi insensibles con el cambio de velocidad. La pérdida por histéresis del hule disminuye con la temperatura a frecuencia constante y aumenta con la frecuencia a temperatura constante. En una llanta los dos efectos ocurren simultáneamente.

Un incremento de la velocidad instantánea aumenta inmediatamente la pérdida por rodamiento. Conforme la llanta se va calentando debido a las altas pérdidas, la temperatura aumenta también, así que las pérdidas por rodamiento disminuyen. La presión aumentará causando otra disminución en la pérdida por rodamiento porque las deflexiones en la llanta se disminuyen. También a altas velocidades aumentará la rigidez de la llanta debido al crecimiento de las fuerzas centrífugas resultando esto en una disminución de la pérdida por rodamiento (Curtiss, 1969 y Jablonski, 1983).

2.6.2.5 Efecto de la presión de inflado

Una de las maneras más fáciles de ahorrar combustible es la de aumentar la presión de inflado de las llantas (Beatty y Mischk, 1980, Grugett, *et al*, 1981 y Schuring y Speyer, 1983). No obstante, un aumento significativo disminuye la comodidad de manejo, y la resistencia al impacto de la llanta, y promueve fallas tempranas de los componentes del vehículo debido a cargas de impacto transmitidas a través de las ruedas hacia el chasis. Un aumento de presión de 200 kPa a 250 kPa, disminuye el consumo de combustible de un automóvil en casi un 1%, mientras que una disminución de 200 kPa a 150 kPa lo aumenta en casi un 2% (Curtiss, 1969 y Elliot, *et al* 1969). Así mismo la capacidad tractiva disminuye al aumentar la presión de inflado.

2.6.3 Desgaste de la cinta de rodamiento

El desgaste de la cinta de rodamiento de una llanta es un fenómeno complejo, donde se identifican dos mecanismos básicos: tensión (Schallamach, 1958) y fatiga (Kraguski, 1965). El mecanismo dominante, el de tensión, depende de la superficie del camino y de las condiciones de manejo. Bajo condiciones no muy severas de desgaste, el mecanismo de fatiga es el que domina, pero para severidades altas, opera un mecanismo que puede ser relacionado a la T_g del polímero (fig. 2-9). Mientras más baja sea la T_g del material de la cinta de rodamiento, mayor será la resistencia a la abrasión.

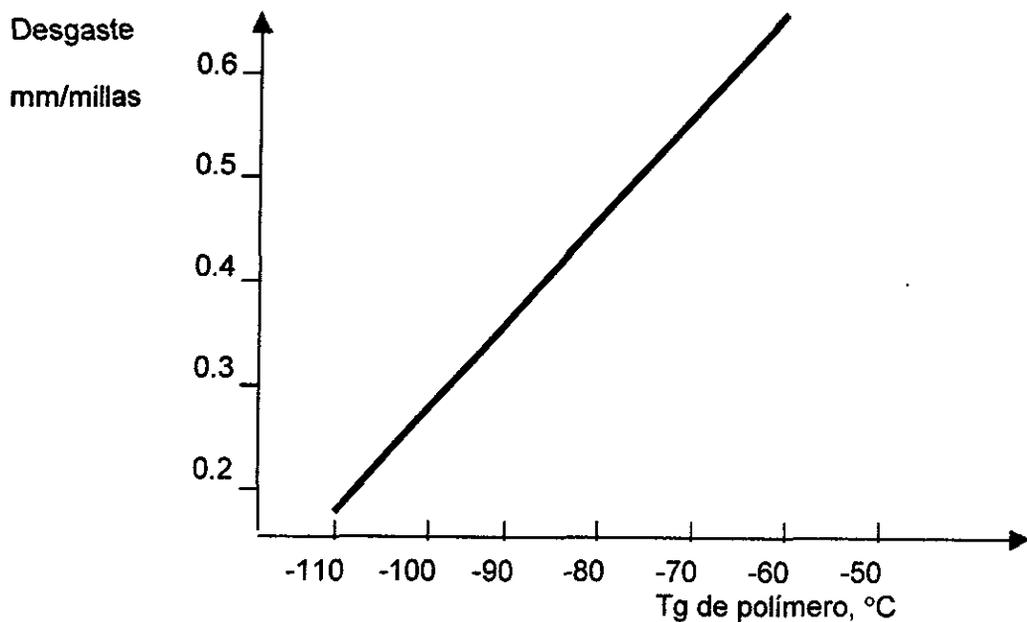


Fig. 2-9 La influencia de la temperatura de transición del polímero en el desgaste de la cinta de rodamiento (Kraguski, 1965).

Como ya se había mencionado anteriormente existe una relación directa entre la pérdida por rodamiento y el espesor de la cinta de rodamiento (Novopolsky, 1959, Kraghelsky y Nepomnyashchi, 1964 Seki, Sasaki y Tsunoda, 1969, y Curtiss, 1969).

En una investigación con llantas de camión, Treichel (1982) sugiere que la pérdida por rodamiento es casi una función lineal del espesor de la cinta de rodamiento. Ésta disminuye 16% si el espesor de la cinta se desgasta 12 mm. Por otro lado, en 1969 Curtiss ya había comparado las pérdidas por rodamiento de dos llantas radiales idénticas, una de ellas nueva y la otra con sólo un milímetro de espesor restante de la cinta de rodamiento (fig. 2-10) (Rhode, 1987).

El material de la llanta está también sujeto al envejecimiento por calor, el cual tiene efectos negativos con respecto a la resistencia al desgaste y la pérdida por rodamiento (Lansdown y Price, 1986).

El desgaste de las llantas ocurre cuando hay un movimiento relativo en el área de contacto entre la periferia de la llanta y el suelo, por lo que se encuentra relacionado con el mecanismo de patinaje (Schallamach, 1958).

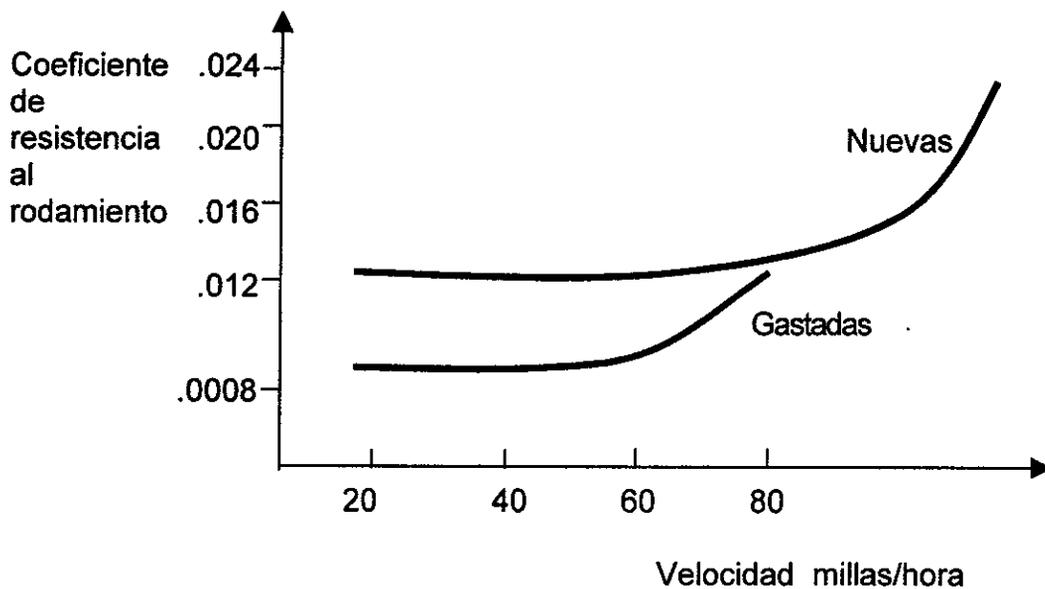


Fig. 2-10 Efecto de la velocidad en la resistencia al rodamiento de llantas nuevas y de las mismas después de que la cinta de rodamiento ya se gastó (Curtiss, 1969).

2.6.4 Relación entre la temperatura y las pérdidas por rodamiento

La temperatura en la llanta, puede variar desde la temperatura ambiente en la superficie (fig. 2-11) hasta casi 100° C y más en la región del hombro (Schuring y Clark, 1987).

Cada cambio en las condiciones operacionales de una llanta (carga, presión, velocidad, temperatura ambiente, condición del suelo, etc.) modificará la producción de calor de ésta. El tiempo necesario para alcanzar la temperatura de equilibrio de las llantas para automóviles es de unos 30 minutos y de casi 150 minutos para las llantas grandes de los camiones. Para las llantas de los equipos móviles de construcción el tiempo se puede alargar hasta 24 horas (Stiehler, Steel, Rickey, Mandel y Hobbs, 1959, Claxton y Conant, 1974, Whincker, 1981, Schuring y Hall, 1981, Browne, 1982, Schuring *et al*, 1985 y Yavari, Tworzydlo y Bass, 1993).

Las llantas que tienen ruedas de aluminio se mantienen más frías que las que tienen ruedas de acero por lo cual tienen una mayor pérdida por rodamiento. Contrariamente, las pérdidas por rodamiento disminuyen cuando se usan ruedas de plástico reforzadas con fibras (Conant, 1971).

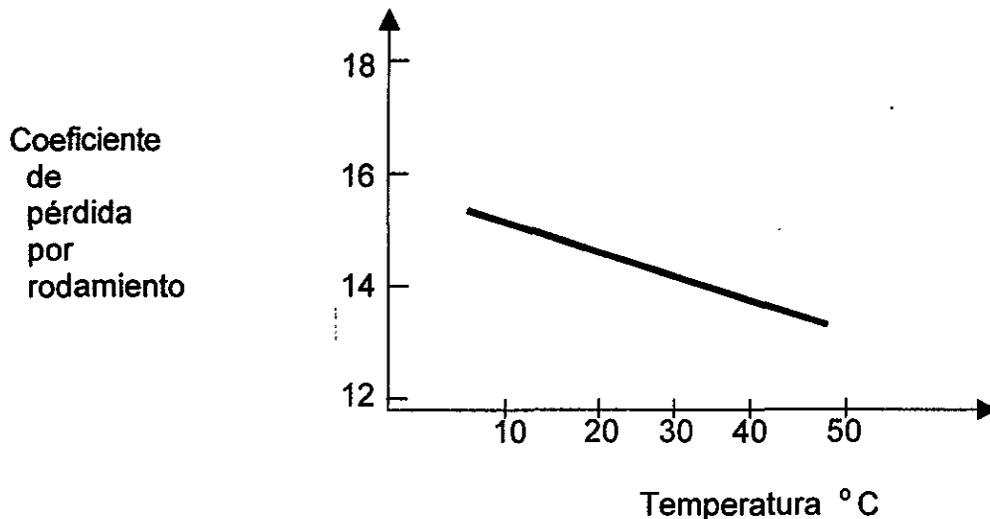


Fig. 2-11 Pérdida por rodamiento de llantas de automóviles como función de la temperatura ambiente (Ivens, 1989).

2.6.5 Modelos matemáticos de la pérdida por rodamiento

Estos modelos son predominantemente para un propósito: simular la relación entre la pérdida por rodamiento de las llantas y los parámetros de las llantas. Los parámetros incluyen todas las condiciones de servicio que tienen un efecto sobre la pérdida por rodamiento, como sería la carga, la presión, la velocidad, la temperatura ambiente, la aspereza del suelo y la curvatura del camino; también todas las características estructurales de la llanta, tales como la geometría de la cinta de rodamiento, la construcción de los cinturones de refuerzo, el tipo de cuerdas, la forma de la llanta y los detalles de diseño.

Los modelos matemáticos pueden ser divididos en cuatro grupos: empíricos, térmicos, viscoelásticos y termo-viscoelásticos (Schuring, 1980). El último de éstos es el más completo y mejor fundamentado aunque muy complejo. Un ejemplo de este modelo fue desarrollado por la General Motors mediante elemento finito, basado únicamente en datos de la llanta, las propiedades del material y las condiciones operacionales de la llanta (Whicker y Rohde 1981, Sarkar *et al*, 1987, Faria, *et al*, 1992, Trivisono, 1992 y Luchini *et al*, 1994).

En los modelos viscoelásticos, la pérdida por rodamiento es calculada de las ecuaciones constitutivas del material a temperatura constante y de los esfuerzos y deformaciones que se originan en una llanta que rueda bajo carga. En ellas, las pérdidas son calculadas como una fracción de la energía de deformación. Los esfuerzos y las deformaciones son derivados de una variedad de modelos estructurales de llantas. Unos investigadores han dividido la sección transversal de una llanta en siete regiones y suponen un patrón simplificado de esfuerzos para cada sección y calculan las energías de pérdida y deformación. El modelo sirve para predecir los cambios de pérdidas por rodamiento producidos por los diferentes materiales y detalles de construcción (Pirkovskii, 1987). Por otro lado, se desarrolló un modelo compuesto de una cinta de rodamiento circular y elástica, apoyada por resortes radiales lineales y amortiguadores (Loo, 1985).

Durante la década de los 80's se desarrolló un modelo no lineal, que consiste en un anillo hecho de una cinta de rodamiento elaborada con un material compuesto. El modelo predice las pérdidas de fricción en caminos planos, y cuando se utilizan rodillos en pruebas de laboratorio. Además se puede predecir la capacidad tractiva (Klingbell, 1989, Yamagishi, *et al*, 1987, Zegelaar, *et al*, 1990 y Pottinger, 1992).

2.7 Capacidad tractiva

La deformación local de un elastómero juega un papel importante en sus propiedades friccionantes y capacidad tractiva (Reynolds, 1875, Bely, Sviridenok, Petrokovets y Savkin, 1995).

Existe confusión sobre el efecto de la fuerza tractiva en la pérdida por rodamiento. Según Stiehler, Steel, Rickey, Mandel y Hobbs (1959) no existe efecto. En cambio Billingsley, Evans, Hulswit, y Roberts (1942) encontraron que la pérdida se incrementa con la fuerza tractiva.

Muchos de los factores asociados con la reducción de la pérdida por rodamiento también causan una pérdida no deseada de tracción en suelo seco y mojado. Los compuestos de hule de alta histéresis generalmente dan altos coeficientes de tracción aunque también una mayor resistencia al rodamiento.

La capacidad tractiva en suelo mojado está relacionada con la temperatura de transición (T_g) del elastómero; mientras más alta sea ésta, mayor será la resistencia a la tracción en suelo mojado.

Según la figura 2-12, a temperaturas arriba de 30 °C la $\tan\delta$ deberá ser baja para minimizar la resistencia al rodamiento y la formación de calor, mientras que entre 0 y 30 °C el requerimiento es de alta histéresis para maximizar la tracción en suelo mojado. El máximo en la curva deberá ser a baja temperatura para obtener una alta resistencia a la abrasión.

De lo anterior se concluye que es deseable establecer la temperatura de transición T_g cerca del régimen asociado con alta tracción para obtener valores altos de tangente de pérdida a bajas temperaturas sin llegar a elevar significativamente los valores de dicha tangente en la zona de pérdidas por rodamiento (ver fig. 2-12). Es posible manipular hasta cierto punto la macroestructura de la cinta de rodamiento y la interacción entre las cargas de refuerzo y las cadenas poliméricas para lograr valores bajos de tangente de pérdidas a altas temperaturas.

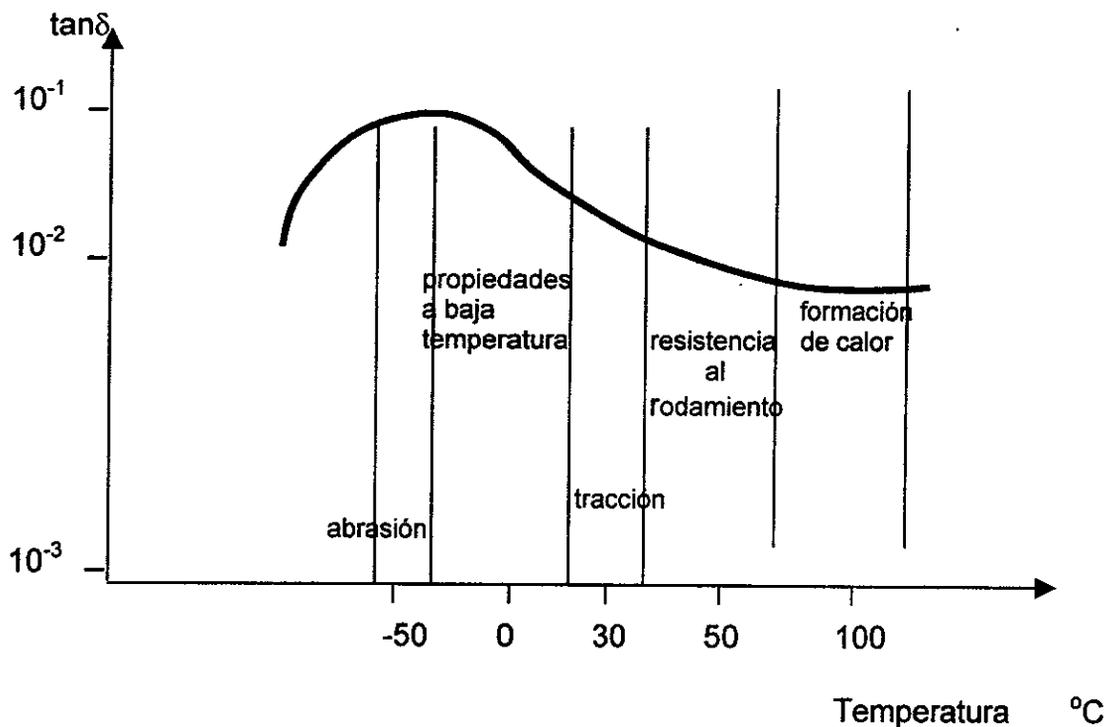


Fig. 2-12 Perfil histerético de una cinta de rodamiento de una llanta SBR1500 (1hz) y su relación con las propiedades de la cinta de rodamiento (Gelling, 1994).

Los hules que tradicionalmente han sido usados en las cintas de rodamiento no satisfacen todos los requerimientos antes mencionados. El hule natural exhibe propiedades de baja resistencia al rodamiento y baja formación de calor, pero una pobre tracción en suelo mojado; lo contrario es el caso con el SBR. El perfil de histéresis de un polímero ideal se presenta en la Fig. 2-13. Éste exhibe las propiedades deseadas de la cinta de rodamiento (Hays, 1974 y Gelling, 1994).

El parámetro reológico que generalmente se considera indicativo de la resistencia a la tracción en suelo mojado es el factor de pérdida ($\tan\delta$) a temperatura ambiente y frecuencias altas (arriba de 1000 Hz) ya que existe una equivalencia entre la frecuencia y la temperatura (Aggarwal, 1986). Se puede utilizar como indicador el valor de la $\tan\delta$ a baja frecuencia y baja temperatura (0° C y 100 Hz aproximadamente). La frecuencia de deformación experimentada por la llanta durante el frenado es muy alta pues resulta de las irregularidades asociadas con la textura del piso.

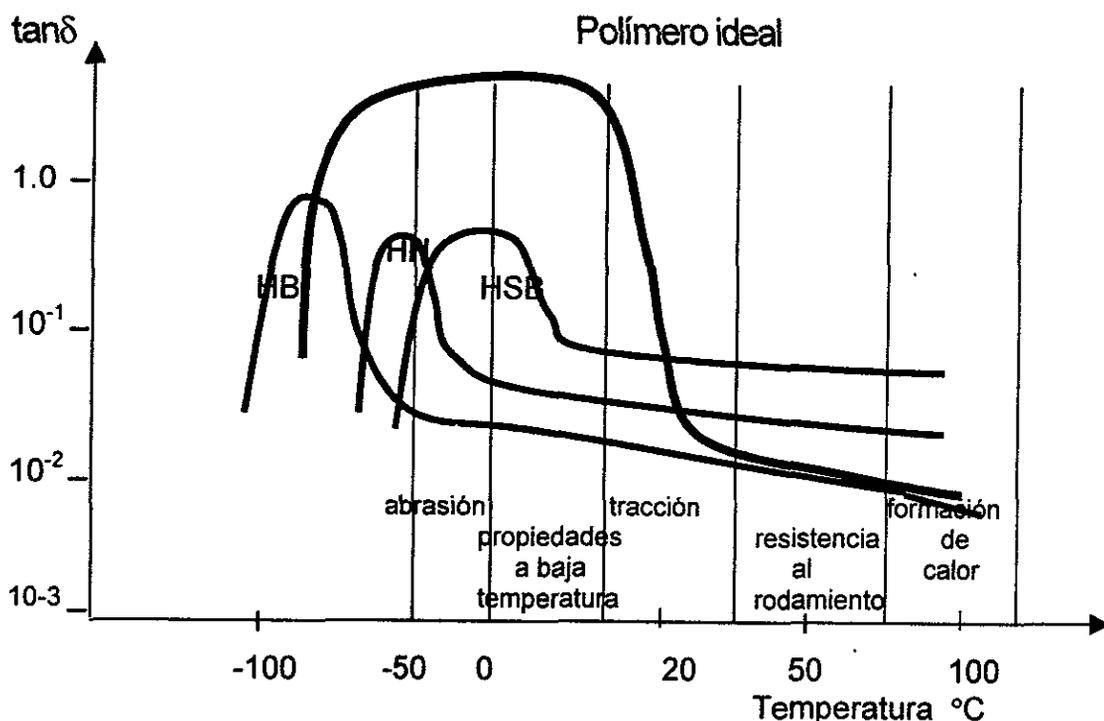


Fig. 2-13 El perfil de histéresis (1Hz) de un polímero ideal de una cinta de rodamiento (Gelling, 1994).

Las componentes de la fricción entre una llanta y el piso se han descrito mediante diferentes mecanismos: adhesión, relacionada con el área de contacto real, deformación ligada a la histéresis, abrasión, y rasgado (Moore, 1975 y Hess y Klamp, 1982). Los mecanismos de pérdida de energía por abrasión y por

rasgado son muy importantes en superficies rugosas, mientras que el de adhesión es más importante en superficies duras y secas. La deformación es el mecanismo principal de la tracción en superficies mojadas que son irregulares, aunque de naturaleza más tersa. Las cintas de rodamiento suaves, en general, dan coeficientes de tracción más altos (tabla 2-6) por el aumento en el área real de contacto.

Tabla 2-6 Valores típicos del coeficiente de fricción para distintos tipos de camino (Szczepaniak, 1982)

Tipo de camino	VALORES DE μ	
	Estado del camino	
	Seco	Mojado
Asfalto, hormigón	0.7 – 0.8	0.3 – 0.4
Adoquín con piedras naturales	0.6 – 0.7	0.3 – 0.4
Terraplén	0.5 – 0.6	0.3 – 0.4
Nevado duro	0.2 – 0.35	
Helada	0.08 – 0.15	

Para evitar el fenómeno conocido en inglés "aqua planing", pérdida de contacto con el piso debido a la presencia de películas gruesas de agua y alta velocidad, es preferible el hule duro y la presión alta. En una investigación se demostró que cuando la dureza de los hules natural, estireno butadieno y polibutadieno aumenta entre 20 y 30 unidades en dureza shore, el coeficiente de fricción en suelo húmedo se incrementa apreciablemente (Veith, 1980). Éste es función de la temperatura de transición del polímero utilizado. Para velocidades bajas (30-60 km/h) depende de la resiliencia del compuesto elastomérico. Una buena tracción en suelos mojados a altas velocidades (100 km/h) requiere de una combinación de alta histéresis y relativamente una alta dureza. El hule natural y el polibutadieno, en general, son muy pobres en lo que respecta a la tracción en suelo mojado (Rahalkar, 1988 y Bely, Petrokovets y Savkin, 1995).

Tabla 2-7 Valores medios del coeficiente de resistencia al rodamiento del automóvil en función del tipo de camino y su estado (Szczepaniak, 1982).

TIPO DE CAMINO	VALORES MEDIOS DEL COEFICIENTE FRICCIÓN	
	En buen estado	En mal estado
Hormigón, asfalto	0.010 – 0.017	-
Adoquines	0.012 – 0.020	0.020 – 0.032
Apisonado	0.014 – 0.025	0.025 – 0.050
Adoquinado con piedras naturales	0.014 – 0.026	0.026 – 0.060
Nevado	0.018 – 0.032 duro	0.027 – 0.040 blando
Tierra suelta	0.022 – 0.050 dura	0.050 – 0.138 suelta
Arena	0.100 – 0.150 húmeda	0.150 – 0.300 seca

Se han realizado algunos estudios con el fin de mejorar la tracción en las llantas y se han patentado algunos métodos para prevenir el patinaje de éstas (Watanabe, 1995). Los métodos propuestos son:

- a) Colocar pequeños pernos en la cinta de rodamiento, de modo que sus puntas salgan de la superficie de ésta, con el fin de que los pernos actúen previniendo el patinaje de la llanta cuando ésta rueda sobre un piso con nieve o congelado. El perno está hecho de una mezcla que puede contener partículas duras finas (arena, partículas cerámicas o partículas de resina reforzada con fibras), hule y una resina de silicón. Desafortunadamente, el uso de llantas de este tipo ha sido prohibido recientemente debido a problemas de deterioro en las carreteras.

Se considera que la arena tiene excelentes características que sirven para evitar el patinaje de la llanta, aunque se ha tenido el problema de que se desprende muy fácilmente de la superficie de la cinta de rodamiento.

- b) Realizar la mezcla de partículas finas duras, hule y resina de silicón pero, en lugar de formar pequeños pernos, dispersar esas componentes en la cinta de rodamiento. Watanabe (1995) señala que este método proporciona excelentes resultados.

Otras patentes proponen el uso de materiales pulverizados de cáscara de huevo o cáscara de nueces, que también se integran a la cinta de rodamiento (patente japonesa en trámite No. G-41355).

2.8 Elastómeros reforzados

Los compuestos elaborados con fibras cortas de alta resistencia embebidas en diferentes matrices han encontrado un uso muy amplio dentro de la ingeniería. Los renovadores de llantas, desde hace algunos años, han usado en sus productos fibras cortas no metálicas, principalmente de algodón y rayón, incluso se comercializó una llanta de automóvil cuyo cinturón de refuerzo contenía fibras cortas de acero en lugar de fibras continuas. Posteriormente, en el material de la cinta de rodamiento de algunas llantas para tractores o equipo agrícola y también de aviones, se utilizaron fibras de vidrio cortas porque se decía que les proporcionaban una mayor vida útil (Foldi, 1975 y Geethamma, *et al*, 1995).

Las fibras debido a su alta relación longitud a diámetro, son potencialmente muy efectivas cuando se usan como refuerzos en los elastómeros, como se ilustra en la siguiente ecuación (Guth *et al*, 1937):

$$G = G_0(1 + 0.67 f_c + 1.62 f^2 c^2) \dots \dots \dots (1)$$

Donde

c = concentración del volumen del refuerzo

f = proporción longitud a diámetro de la partícula

G = módulo del material reforzado

G₀ = módulo del hule sin refuerzo

Sin embargo, esta ecuación es válida sólo si existe una buena adhesión entre las fibras de refuerzo y la matriz elastomérica, pero desafortunadamente, sin un aditivo especial es muy difícil lograrlo.

Las limitaciones de uso de las fibras cortas en las aplicaciones de los compuestos de hule se deben a: las dificultades para lograr una dispersión uniforme, la ruptura durante su manejo o en el proceso de incorporación y las dificultades para lograr una buena adhesión con la matriz elastomérica.

En una investigación realizada por Derringer (1971) se indicó que el uso de fibras orgánicas resulta ser más ventajoso que el de las inorgánicas en los materiales compuestos con matriz elastomérica, aunque estas últimas se puedan mezclar y dispersar fácilmente (Geethamma, Reethamma y Thomas, 1995). En este estudio, Derringer propuso el uso de un sistema de adhesión que consiste en hexametimetramina, resorcinol y partículas finas de sílica hidratada (HRH) porque consideraba que ofrecía excelente adhesión entre la mayoría de los elastómeros y las fibras textiles más comunes, continuas y discontinuas. En la fig. 2-14 se muestran las curvas de esfuerzo deformación para un compuesto de hule natural y estireno butadieno reforzado con fibras cortas de vidrio. Algunas de estas fibras fueron cubiertas con el adhesivo HRH y otras no. Con el adhesivo, el módulo del compuesto resultó más alto que el que se obtuvo utilizando refuerzos convencionales (pigmentos).

En el mismo trabajo se presentan resultados experimentales que muestran que el módulo de Young se incrementa con el contenido de fibra de vidrio. Derringer observó que en el caso del policloropreno la resistencia a la tensión disminuye en un principio con el volumen de la fibra de vidrio pero pasando éste de un 20% se incrementa notablemente con dicho volumen. El efecto sobre la elongación es una disminución monotónica con el volumen de la fibra de vidrio siempre y cuando halla una buena adhesión.

Con el uso del adhesivo HRH se obtuvieron valores de módulos imposibles de conseguir mediante la adición de los negros de humo. Lo mismo sucedió con los valores de resiliencia. Derringer concluyó que el sistema HRH resultó efectivo en los compuestos formados con matrices de hule natural, estireno butadieno, polibutadieno o policloropreno reforzadas con fibras de rayón, orlón, vidrio, asbesto y poliamida.

En otra investigación, llevada a cabo en 1975 por Foldi, se estudiaron las fibras de vidrio, acero, rayón y poliamida; reforzando a los hules típicos de la industria llantera (hule natural, estireno butadieno y polibutadieno). Finalmente, como sistema de adhesión se utilizó una formulación de RFL (Resorcinol Formaldehído y Látex).

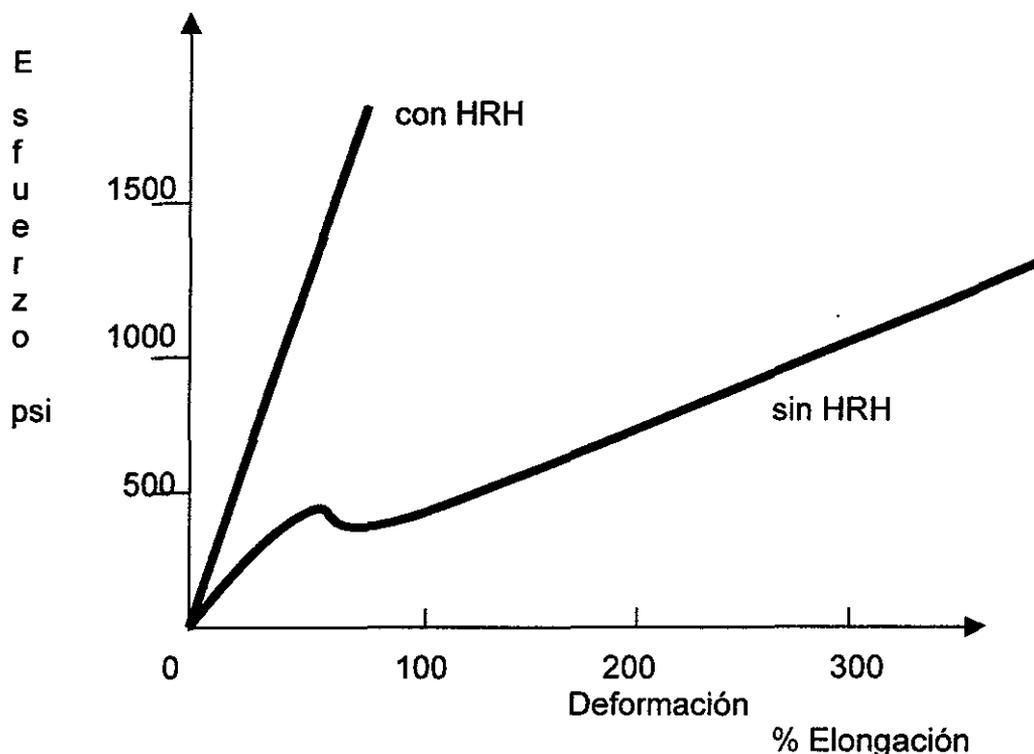


Fig 2-14 Efecto del adhesivo HRH en fibra de vidrio en una matriz de Hule natural o de estireno butadieno (Derringer, 1971).

El grado de orientación y dirección de las fibras se estableció en una operación de calandreo. Las fibras de vidrio que originalmente medían entre 19 y 38.1 mm de

largo se rompieron hasta convertirse en fibras individuales de 0.2 a 0.3 mm (Foldi, 1975), lo cual concuerda con otros estudios (Derringer, 1971). El cambio de longitud de las fibras no tuvo un efecto significativo en las propiedades mecánicas del material reforzado. Para que el refuerzo de un elastómero mediante fibras tenga éxito, el cociente longitud/diámetro de las fibras debe tener un valor entre 40 y 250 (Foldi, 1975).

A pesar de la fragilidad de la fibra de vidrio, su función como refuerzo mejoró cuando las fibras se mezclaron con un agente promotor de la adhesión de hule, aumentando el módulo del material compuesto (Tabla 2-8).

Los resultados obtenidos por Foldi en este experimento fueron los siguientes: a) fue virtualmente imposible orientar a la totalidad de las fibras en una dirección específica. El grado de orientación de las fibras de vidrio se estimó entre el 53 y el 75%; b) la presencia de las fibras en la matriz elastomérica aumentó la resistencia a la tensión y disminuyó el punto de cedencia, mientras la dureza se incrementó; c) El aumento del módulo fue substancial para elongaciones pequeñas, acompañado por un aumento moderado de la dureza.

Tabla 2-8 Efecto del adhesivo los refuerzos de hule con 10% de fibra de vidrio a 38.1 mmde longitud (Foldi, 1975)

	Esfuerzo con una deformación del 100%, MPa,
sin adhesivo	6.52
con adhesivo HRH	9.07

En 1977, O'Connor realizó otra investigación donde las fibras en estudio fueron de vidrio, poliamida (nylon), carbono y aramida. La longitud inicial de todas las fibras fue 6.35 mm y su contenido se conservó constante en 17% en volumen. Los elastómeros utilizados fueron: hule natural y hule nitrilo. En esta ocasión fue posible controlar la alineación de las fibras. Los nuevos materiales fueron sometidos a diferentes pruebas mecánicas. Todas las propiedades de los

compuestos mostraron una dependencia significativa en la orientación de la fibra. Las propiedades mecánicas más pobres se obtuvieron al usar las fibras de vidrio y las de carbono. La alineación de las fibras de refuerzo mediante operaciones de calandreo produce una anisotropía muy significativa en las propiedades de los compuestos (Ashbee, 1990, van der Pol y de Vos, 1995 y Kikuchi, 1996). El grado de alineación de las fibras y la uniformidad de la dispersión de las mismas que se obtuvo con las fibras de vidrio y las de carbono fue adecuado.

Para especímenes probados en la dirección longitudinal, la adición de un adhesivo mejora significativamente la resistencia en el punto de cedencia para todos los tipos de materiales compuestos. El módulo de Young se mejoró considerablemente en los materiales compuestos que contienen fibras de vidrio, carbono y aramida, mientras que en la dirección transversal los resultados no fueron muy significativos.

O'Connor estudió también el efecto de tres diferentes sistemas de adhesión en el compuesto de hule natural que contenía 17% de fibra en volumen. Los sistemas estudiados fueron: el HRH, el RH sin sílica y una resina (tabla 2-9). Fue mínimo el incremento de la adhesión obtenida debido a cualquiera de los sistemas para las fibras de vidrio y de carbono con el hule natural. La interacción entre la fibra y el elastómero sólo se puede lograr usando adhesivos que sean compatibles, tanto con las fibras como con el hule (Porter, 1993). Existen agentes enlazantes que promueven la adhesión entre ellos, sin embargo, con cada fibra y/o elastómero se tiene un efecto diferente.

En la fig. 2-15 se muestra la resistencia a la tensión para fibras en la dirección longitudinal. Como se puede apreciar hay una disminución de la resistencia a medida que aumenta el contenido de fibra para bajos porcentajes del mismo y a partir del 12% la resistencia vuelve a subir. En la dirección transversal (fig. 2-16), la resistencia a la tensión muestra una muy importante reducción al aumentar el contenido de las fibras hasta un 10%. En este caso, la resistencia depende de la

matriz elastomérica, la cual se debilita con la presencia de las fibras alineadas transversalmente.

El módulo de Young aumenta con el contenido de fibra (van der Pol y de Vos, 1995) y esto es válido para cualquier tipo de fibra (fig. 2-17). El módulo más alto correspondió a la aramida y los más bajos fueron los de las fibras de vidrio y de carbono.

El comportamiento y propiedades de los compuestos elastoméricos reforzados con fibras cortas están en función del tipo de fibra, de su contenido, orientación y dispersión, de la relación longitud/diámetro de la fibra, de la adhesión entre la fibra y la matriz elastomérica, de los métodos de procesamiento y de las propiedades elastoméricas de la matriz. Si se pudieran manipular todos estos parámetros, se podría crear un compuesto con un comportamiento específico deseado (Bhagwan et al, 1980).

Tabla 2-9 Efecto de los adhesivos en las propiedades de compuestos de hule natural reforzado con fibras cortas (O'Connor, 1977).

FIBRA	VOLUMEN %	AGENTE ENLAZANTE	ORIENTACION DE LA FIBRA	MÓDULO DE YOUNG MPA	ELONGACIÓN EN LA RUPTURA, %
No	-	-		3.1	620
No	-	Resina		2.4	603
No	-	RH		6.3	456
No	-	HRH		6.8	417
Vidrio	16.5	-	Longitudinal Transversal	34.5 11.7	313 337
Vidrio	16.6	Resina	Longitudinal Transversal	31.3 14.0	307 287
Vidrio	16.5	RH	Longitudinal Transversal	25.4 16.9	130 192
Vidrio	16.7	HRH	Longitudinal Transversal	31.8 16.1	63 90
Carbono	16.4	-	Longitudinal Transversal	23.6 9.7	303 333
Carbono	16.8	Resina	Longitudinal Transversal	19.2 6.2	303 343
Carbono	16.9	RH	Longitudinal Transversal	35.1 13.5	50 96
Carbono	17.4	HRH	Longitudinal Transversal	45.0 16.0	47 77

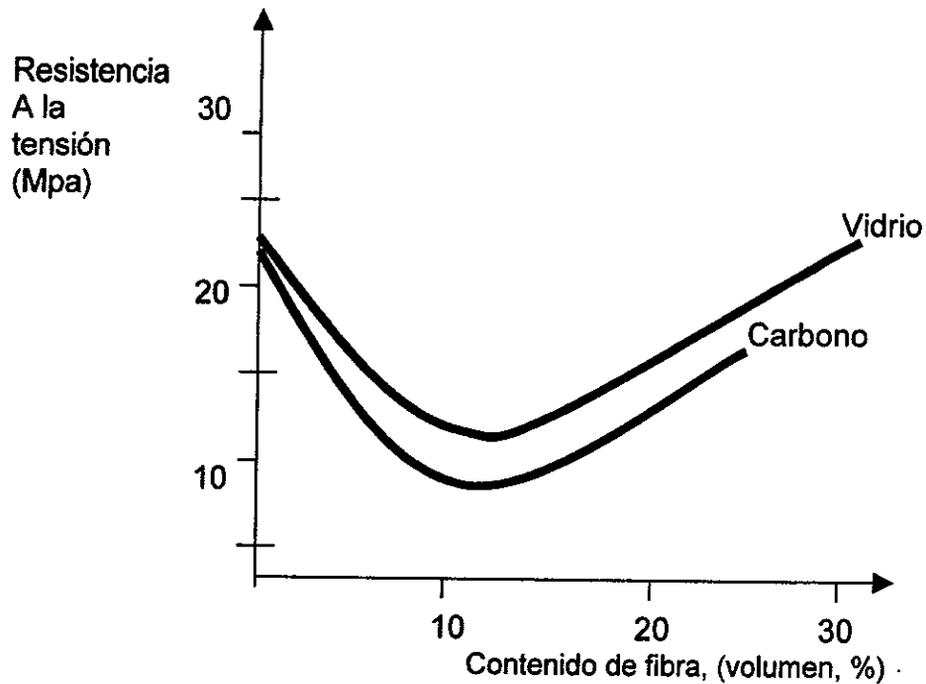


Fig. 2-15 Efecto del contenido de fibras en la resistencia a la tensión para el hule natural reforzado con fibras cortas usando un sistema de adhesión RH. La dirección de las fibras es longitudinal (O'Connor, 1977).

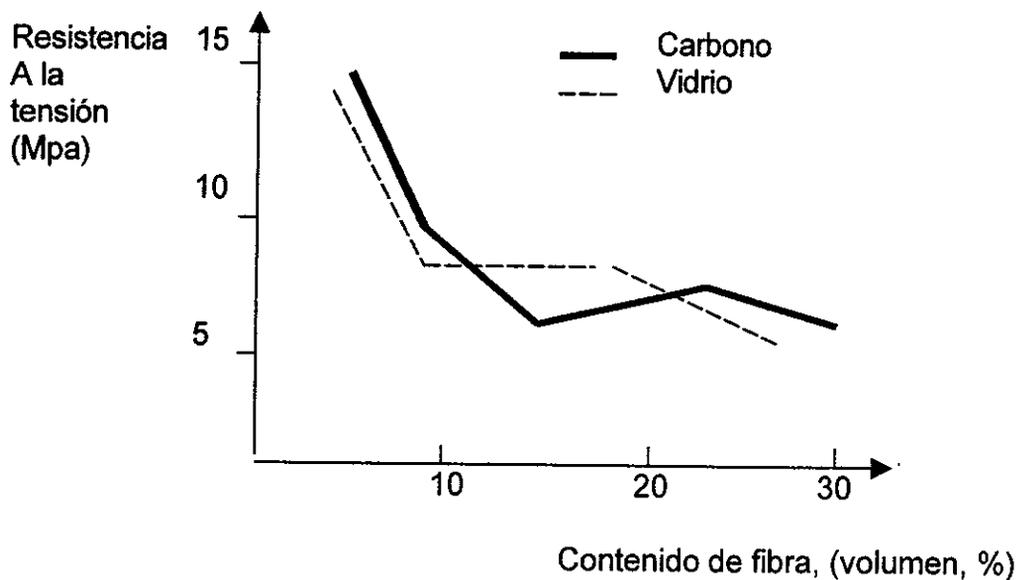


Fig. 2-16 Efecto del contenido de fibra en la fuerza de tensión en hule natural reforzado con fibras cortas usando un sistema de adhesión RH. La dirección de las fibras es transversal (O'Connor, 1977).

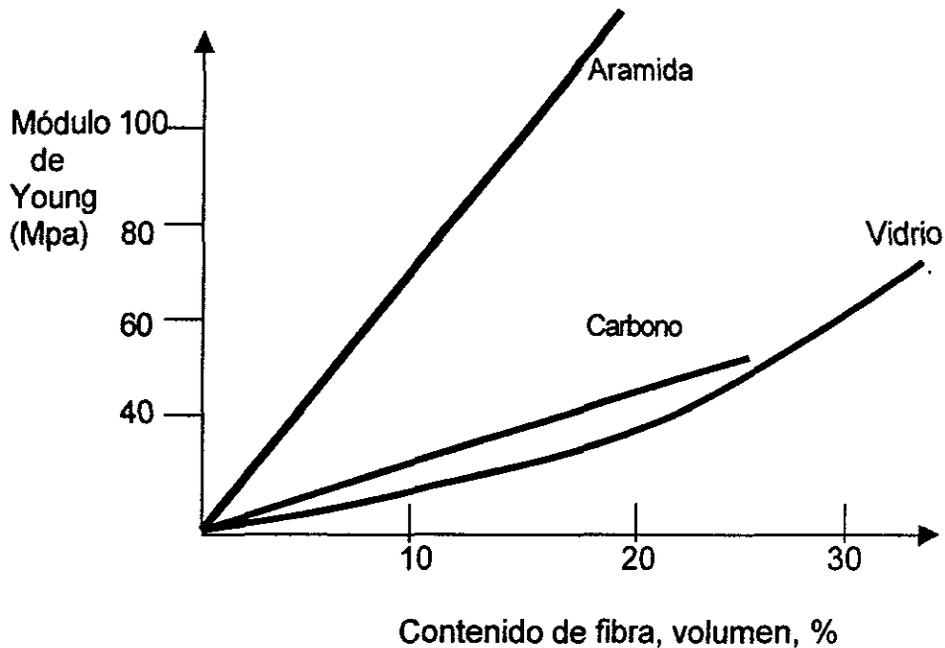


Fig. 2-17 Efecto del contenido de fibra en el módulo de Young del hule natural reforzado con fibras cortas, utilizando un agente de unión RH en dirección longitudinal (O'Connor, 1977).

2.8.1 Materiales compuestos reforzados con partículas

El efecto reforzante de partículas en los materiales poliméricos fue reconocido primeramente en los compuestos con matrices elastoméricas. Una de las teorías más antiguas de los sistemas compuestos fue desarrollada por Einstein (1956) para compuestos con inclusiones esféricas rígidas, que dió por resultado la siguiente ecuación:

$$\eta_c = \eta_m (1 + K_t V_p) \dots \dots \dots (2)$$

donde η_c y η_m son la viscosidad del compuesto y de la matriz, respectivamente.

K_t es el coeficiente de Einstein el cual es igual a 2.5 para esferas, V_p es la fracción del volumen de las partículas. Se considera que la ecuación (2) se puede

usar intercambiando la viscosidades por los módulos en cortante $\left(\frac{\eta_c}{\eta_m} = \frac{G_c}{G_m} \right)$:

$$G_c = G_m (1 + 2.5V_p) \dots\dots\dots(3)$$

Para la ec. (3), la acción de la rigidez de una carga de refuerzo es independiente de su tamaño. Se ha probado que esta ecuación es útil para concentraciones bajas de refuerzos. Para partículas que se pueden aproximar como cilindros existe otra ecuación (Brodnyan, 1959 y Ahmed y Jones, 1990):

$$G_c = G_m e^{\left[\frac{2.5V_p + 0.407(p-1)^{0.5} V_p}{1.5V_p} \right]} \dots\dots\dots(4)$$

donde p es la relación longitud/ancho de las partículas. Su valor se encuentra entre $1 < p < 15$.

Guth en 1951 generalizó el concepto de Einstein introduciendo otro término de interacción con la partícula y modificó la ecuación (3) a la siguiente forma:

$$G_c = G_m (1 + K_f V_p + 14.1V_p^2) \dots\dots\dots(5)$$

también supuso que el cambio de la constante elástica del hule por introducir partículas esféricas es análogo al considerado en la teoría de la viscosidad. Cuando un compuesto de hule fabricado con negro de humo es estirado, las partículas de este ingrediente afectan a los esfuerzos y deformaciones del material; esto provoca un aumento en la energía elástica y, por lo tanto, se incrementa también la constante elástica. Para partículas esféricas:

$$E_c = E_m (1 + K_p V_p + 14.1V_p^2) \dots\dots\dots(6)$$

2.9 Teoría de transferencia de esfuerzos en compuestos reforzados con fibras cortas

En los materiales compuestos las cargas no son aplicadas directamente en las fibras, sino que son aplicadas a la matriz del material y se transfieren a las fibras

en sus extremos. Cuando la longitud de una fibra es mucho mayor que la longitud sobre la cual se lleva a cabo la transferencia de esfuerzo, los efectos de los extremos pueden ser despreciados y las fibras pueden ser consideradas como continuas. En el caso de los compuestos con fibras cortas, dichos efectos no pueden ser despreciados y las propiedades del compuesto son función de la longitud de la fibra. En las fibras cortas el esfuerzo máximo ocurre en el centro de la longitud de la fibra (Mallick, 1988).

La relación entre el esfuerzo máximo de la fibra y el esfuerzo máximo de la matriz es igual a la relación de sus respectivos módulos elásticos. Esto indica que aún si la unión interfacial entre la fibra y la matriz se rompe, la transferencia de carga todavía puede ocurrir debido a las fuerzas de fricción entre los dos, sin embargo, si las fibras son normales a la dirección de la carga o la distancia entre la fibra se vuelve muy pequeña, lo anterior no se cumple.

Los compuestos producidos con fibras cortas orientadas al azar son esencialmente isotrópicos; tales materiales pueden ser elaborados por inyección o moldeo por compresión. Predecir las propiedades de estos compuestos es excesivamente complejo. Una ecuación empírica dada por (Agarwal, Lifshitz y Broutman, 1974 y Hull, 1988) es:

$$E_{\text{azar}} = 3/8E_L + 5/8E_T \dots\dots\dots(7)$$

Donde E_L y E_T son los módulos longitudinales y transversales respectivamente de un compuesto con fibras cortas alineadas teniendo la misma relación de longitud/diámetro y el mismo volumen.

CAPÍTULO 3

Materiales propuestos y métodos de evaluación

3.1 Consideraciones en la selección de las materias primas

La selección de las materias primas para la fabricación de los materiales compuestos que se investigaron, se realizó pensando en modificar el comportamiento histerético de la cinta de rodamiento, sin involucrar demasiado la química del compuesto de hule de la llanta. Por tal motivo, para la fabricación de la matriz elastomérica, se utilizó una formulación típica, ya existente, de una cinta de rodamiento de una llanta ordinaria y se eligieron los elastómeros más comúnmente utilizados en las llantas. El refuerzo del material se eligió, con base en los módulos elásticos de las fibras.

Al inicio de la investigación se escogieron, para la fabricación de la matriz elastomérica, tres elastómeros: un hule natural (del tipo crepé) y dos sintéticos (estireno-butadieno y polibutadieno). Posteriormente, al encontrar dificultades en el procesamiento de los materiales, se pensó utilizar otro tipo de elastómeros cuyas características físicas facilitarían la incorporación de los materiales de refuerzo. Uno fue el poliuretano (no se utiliza en la fabricación de llantas), que se puede mezclar manualmente y además

vulcanizar a temperatura ambiente, y el otro fue el látex, que al estar en forma líquida, permite mezclarse con otros materiales antes de coagular.

El hule natural, el estireno butadieno y el polibutadieno se consiguieron en bloques de 10 kg cada uno, aunque comercialmente se venden en bloques de 30 kg. La resina de poliuretano se comercializa en galones y el catalizador por litros. El látex también se consiguió por galones.

Como materiales de refuerzo, se escogieron las fibras de vidrio y las de carbono y además, arena de playa (Hornos, Acapulco). Este último material se eligió, por considerarse que pudiera formar en el nuevo material compuesto, una superficie con mayor fricción, que le proporcionara una buena capacidad tractiva.

La fibra de vidrio que se utilizó es del tipo S. La presentación de esta fibra viene en rollos de 1.5 m de ancho. En el rollo, las fibras de vidrio están entrelazadas con fibras de poliamida. Sus principales características se presentan en la tabla 3-1.

La fibra de carbono hasta ahora no ha tenido aplicación dentro de la industria llantera, sin embargo, se consideró en este estudio por poseer un módulo de elasticidad alto.

La fibra de carbono fue del tipo 6K que viene enrollada en carretes de 2470 yardas/lb. Esta fibra sólo se fabrica en el extranjero, su localización y adquisición resulta bastante difícil. La tabla 3-2 muestra sus principales propiedades.

Tabla 3-1 Propiedades de las fibras de vidrio tipo S (Cheremisinoff, 1993)

Tipo de fibra	S
Resistencia a la tensión GPa (lb/in ²)	4.30 (665,000)
Módulo Elástico GPa (lb/in ²)	86.9 (12,600,000)
Elongación a 22.2° C (72° F), %	5.4
Constante dieléctrica, 22.2° C (72° F) 10 ⁶ Hz	5.34
Tangente de pérdida, 22.2° C (72° F), 10 ⁶ Hz	0.002
La fibra tipo S, se aprecia por su gran fuerza y rigidez. Esta fibra posee la mayor resistencia a la tracción de todas las otras fibras de vidrio. se utiliza en productos sometidos a altas temperaturas	

Tabla 3-2 Propiedades mecánicas de algunas fibras de carbono (Watt y Johnson, 1966).

PROPIEDAD	UNIDADES	FIBRAS DE CARBONO TIPO I	FIBRAS DE CARBONO TIPO II
Diámetro	μm	7,0 – 9.7	7.6 – 8.6
Densidad	10^3kgm^{-3}	1.95	1.75
Módulo de Young	GNm^{-2}	390	250
Módulo (perpendicular al eje de la fibra)	GNm^{-2}	12	20
Fuerza de tensión	GNm^{-2}	2.2	2.7
Coefficiente de expansión térmica (0 hasta 100° C)	$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-0.5 hasta -1.2(paralelo) 7 – 12 (radial)	-0.1 hasta -0.5 (paralelo) 7 – 12 (radial)
Conductividad térmica (paralela al eje de la fibra)	$\text{Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	105	24
Elongación hasta la fractura	%	0.5	1.0

Las fibras de carbono son casi completamente frágiles y muestran 100% de recuperación elástica cuando se le aplica un esfuerzo debajo de la fuerza de fractura.

La arena de playa utilizada en los experimentos de este estudio presenta las siguientes características:

Es una mezcla de cuarzo (=SiO₂ =Silice) y Feldespatos (= Sílico - aluminatos de Na, K, Ca, Al = Albita, Microclina) con bajo contenido de Anfiboles (= Sílico -aluminatos de Na, Ca, K, Fe, Mn = Riebeckita) y Micas (= Sílico - aluminatos de Na, K, Al =Muscovita).

El análisis semicuantitativo por Fluorescencia de Rayos X dio como resultado:

SiO₂ = 71.6%, K₂O = 9.0%, CaO = 6.3%, Al₂O₃ = 4.65%, Fe₂O₃ = 4.33%, Cl = 1.17%, P₂O₅ = 1.10%, SO₃ = 0.4%, TiO₂ = 0.34%, BaO = 0.29%, Rb₂O = 0.14%, SrO = .13%, MgO = 0.13%, Na₂O = 0.12%, ZrO₂ = 0.10, MnO = 0.10%, ZnO = 0.03%, CuO = .02%.

El análisis por Fluorescencia de Rayos X se efectuó con el espectrómetro Siemens SRS303, el software Spectra-AT v2.1 by Socabim y el programa Siemens-SemiQuant .

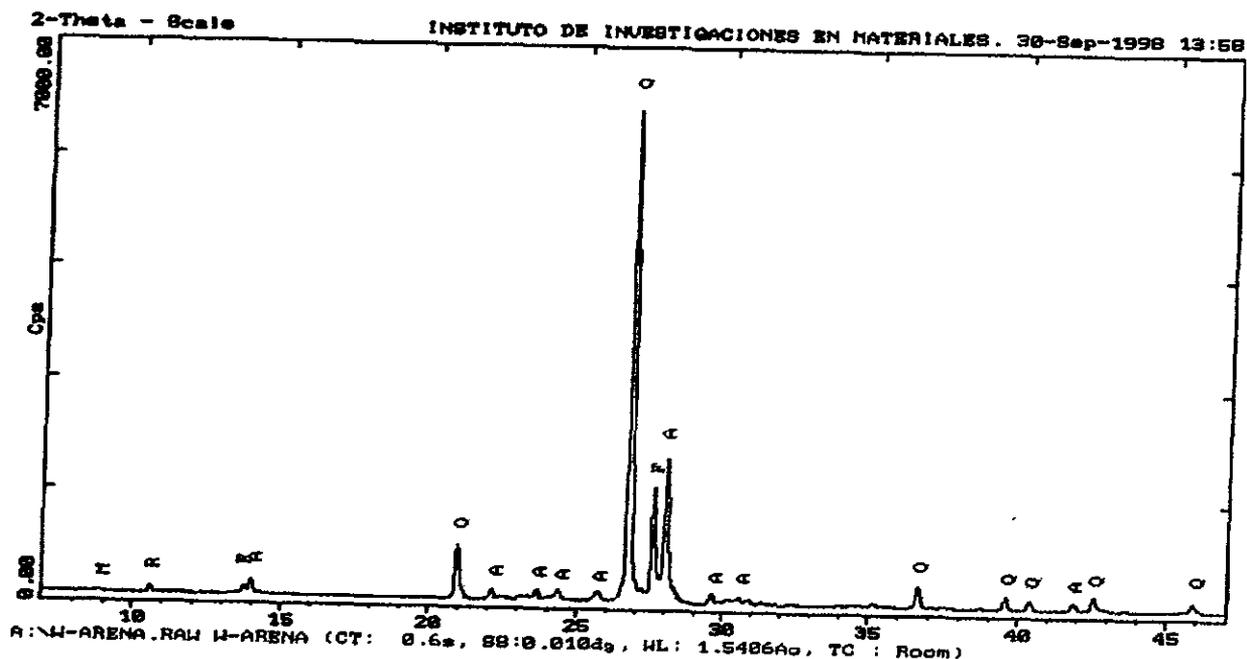


Fig. 3-1 Identificación de fases cristalinas para la arena de playa. Cada conjunto de picos de la gráfica representa una fase cristalina en la composición de la arena. Se nombró Q al SiO_2 (Cuarzo), A es $(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$ (Albita), F es KAlSi_3O_8 Microclina, R es $(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Fe}_2(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}$ (Riebeckita), $(\text{K}, \text{Na}) \text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (Muscovita).

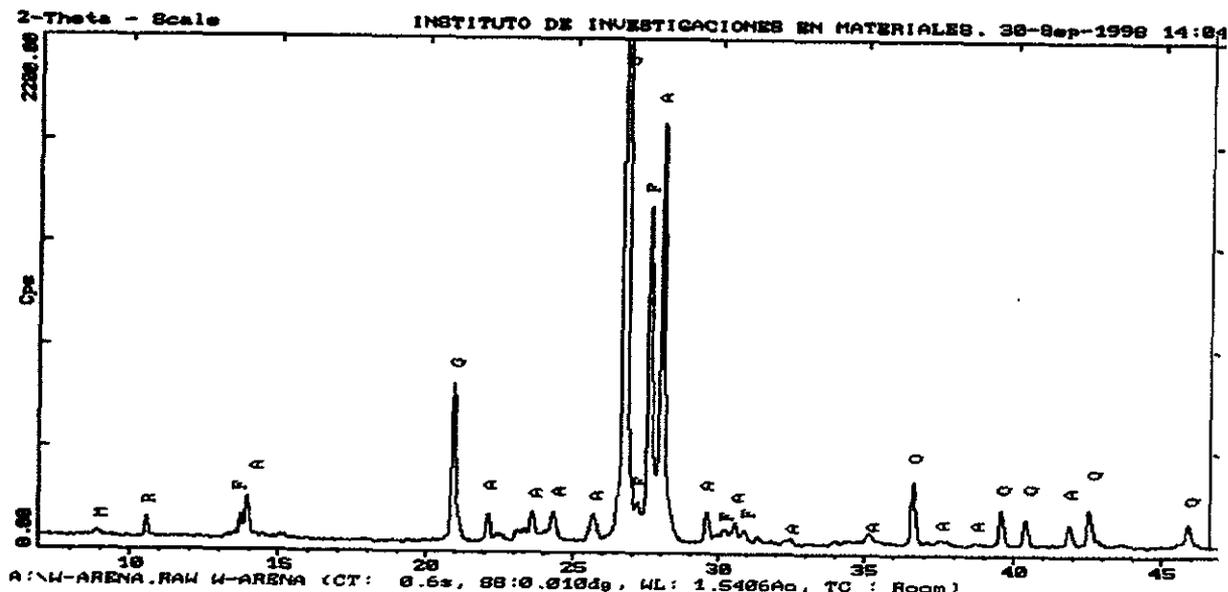


Fig. 3-2 Identificación de fases cristalinas para la arena de playa amplificada en el eje Y.

El análisis por Difracción de Rayos X se realizó con el difractor Siemens D5000, con el software Diffrac-AT v3.2 by Socabim y la base de datos PDF-1 del ICDD. Esta identificación de fases cristalinas se hizo por el método de polvos que es como una huella digital del material cristalino que se identifica con una base de datos JCPDS (Joint Committee of Powder) del ICDD (International Centre of Diffraction Data). Se presentan las gráficas (fig. 3-1 y fig. 3-2) con la identificación de difracción de polvos.

Se le practicó también análisis por granulometría por mallas vía seca y vía húmeda dando los resultados mostrados en la fig. 3-3 y fig. 3-4.

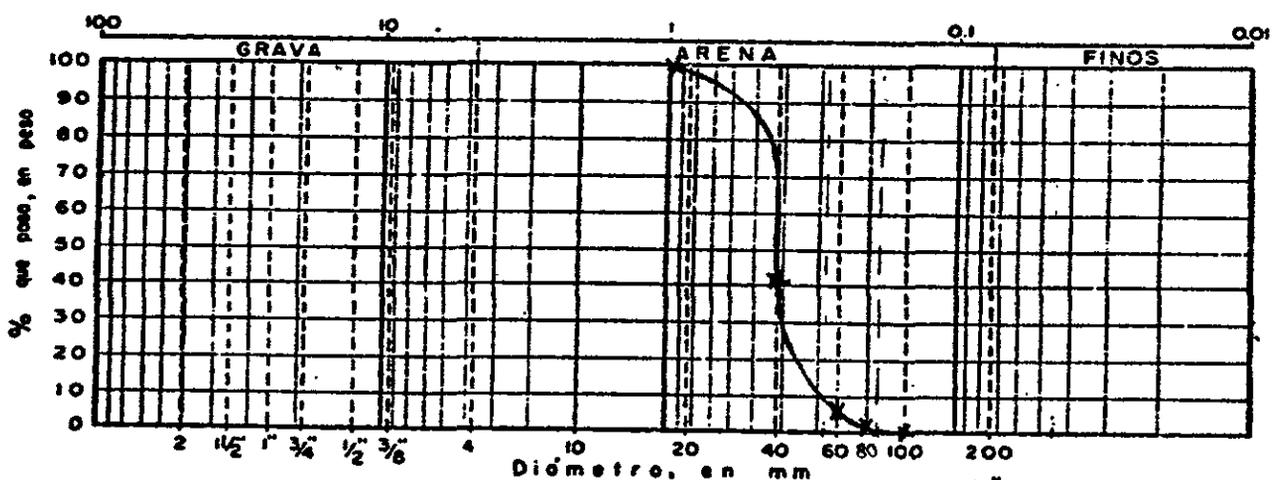


Fig. 3-3 Granulometría por mallas vía seca

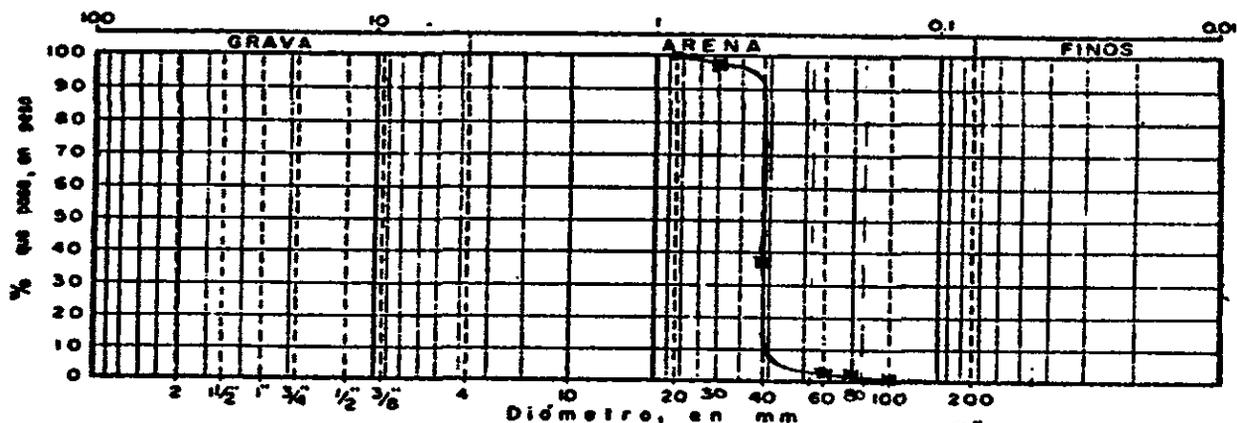


Fig. 3-4 Granulometría por mallas vía húmeda

3.2 Determinación de los nuevos materiales compuestos

Se determinaron las posibles combinaciones entre las diferentes matrices elastoméricas y los diferentes materiales de refuerzos con el fin de seleccionar los más prometedores.

Se elaboraron cuatro tipos de matrices, dos con hule natural y las otras dos con hule sintético. Una de cada tipo de hule llevaría negro de humo como carga reforzante, y las otras llevarían sílica. El hule sintético se formuló con una relación 70:30 de estireno butadieno y polibutadieno (se realizó de esta manera porque el polibutadieno facilita el procesamiento del estireno butadieno además de mejorar la resiliencia de la mezcla).

Las combinaciones realizadas se presentan en la tabla 3-3. Las combinaciones se hicieron al 6, 8, 10, 15, 20, 25 y 60% de acuerdo al contenido (en peso) del material reforzante. Para indicar que los materiales reforzantes se impregnaron con algún adhesivo se utilizaron las letras: W, C, B, X con excepción de Celanese donde se usa la palabra completa.

Con los otros elastómeros; el poliuretano y el látex, se hicieron básicamente las mismas combinaciones pero en un sólo porcentaje, 6%.

3.3 Formulación del compuesto de hule

Para elaborar los compuestos de hule (matriz) de la investigación, se utilizó una formulación típica para la fabricación de una cinta de rodamiento (Hess y Klamp, 1982). El objetivo de esta formulación es proporcionar al hule los ingredientes necesarios para que éste tenga propiedades mecánicas óptimas. Las cantidades de los ingredientes de la formulación se ajustaron a la capacidad de la máquina mezcladora que se utilizó en los experimentos (60 g.) Todas las combinaciones de los materiales pesaban en total 60 g. Al aumentar el porcentaje del material de refuerzo, en una

mezcla, automáticamente se disminuían las cantidades de los ingredientes del compuesto de hule.

Tabla 3- 3 Nombres designados a los diferentes materiales fabricados

Descripción del material	Abreviatura
Hule natural con negro de humo sin materiales de refuerzo	HN
Hule natural con sílica sin materiales de refuerzo	HNS
Hule natural con negro de humo y arena	HNA
Hule natural con sílica y con arena	HNSA
Hule natural con negro de humo y fibra de vidrio	HNFV
Hule natural con negro de humo y fibra de vidrio y arena.	HNAFV
Hule natural con sílica y fibra de vidrio	HNSFV
Hule natural con sílica y fibra de vidrio y arena	HNSAFV
Hule natural con negro de humo y fibra de carbono	HNFC
Hule natural con negro de humo y fibra de carbono y arena	HNAFC
Hule natural con sílica y fibra de carbono	HNSFC
Hule natural con sílica y fibra de carbono y arena	HNSAFC
Hule sintético con negro de humo sin materiales de refuerzo	HS
Hule sintético con sílica sin materiales de refuerzo	HSS
Hule sintético con negro de humo y arena	HSA
Hule sintético con sílica y arena	HSSA
Hule sintético con negro de humo y fibra de vidrio	HSFV
Hule sintético con negro de humo con fibra de vidrio y arena	HSAFV
Hule sintético con sílica y fibra de vidrio	HSSFV
Hule sintético con sílica con fibra de vidrio y arena	HSSFVA
Hule sintético con negro de humo y fibra de carbono	HSSFC
Hule sintético con negro de humo con fibra de carbono y arena	HSFCA
Hule sintético con sílica y fibra de carbono	HSSFC
Hule sintético con sílica con fibra de carbono y arena	HSSFCA
látex	L
Látex con sílica	LS
Látex y arena	LA
Látex con sílica y arena	LSA
Látex y fibra de vidrio	LFV
Látex con sílica y fibra de vidrio	LSFV
Látex con sílica y arena y fibra de vidrio	LSAFV
Látex y fibra de carbono	LFC
Látex con sílica y fibra de carbono	LSFC
Látex con sílica y arena y fibra de carbono	LSAFC
Látex y arena y fibra de vidrio	LAFV

Los ingredientes de la formulación fueron las siguientes:

- Hule Natural.* Se utilizó tipo crepé y en barra traído de Malasia. Su viscosidad en unidades mooney es alrededor de 120.
- Estireno-butadieno.* Se utilizó el SBR 1512 que se obtiene mediante el proceso de emulsión. Su viscosidad en unidades mooney es de 52.
- Polibutadieno.* Se utilizó el S-200 que se obtiene del proceso de solución. Su viscosidad está entre 45 y 53 en unidades mooney.
- Aceite Naftenítico.* Plastificante que actúa en la mezcla del hule como lubricante para enfriar el compuesto.
- Negro de Humo.* Se utilizó el N200. Este ingrediente se considera como una carga de refuerzo porque mejora la resistencia a la tensión o al rasgado e incrementa la dureza.
- Óxido de Zinc.* Es un activador del proceso de vulcanización que actúa a temperatura elevada para permitir el flujo del hule antes de iniciar la vulcanización.
- Ácido Esteárico.* Es un activador que ayuda a incrementar la velocidad de vulcanización de los compuestos del hule. El ácido esteárico reacciona con el óxido de zinc para formar estearato de zinc, el cual es un jabón soluble en el hule y por lo tanto más activo.
- Flexone 6H* Es un antiozonante que protege al material del medio ambiente.
- NOBS* Acelerador primario del proceso de vulcanización. Su acción se considera semirápida.

- DPG.* Acelerador secundario que tiene una cierta influencia en el funcionamiento de los aceleradores primarios.
- Azufre.* Agente vulcanizante que reacciona químicamente para formar uniones transversales de las moléculas de los elastómeros. Estas uniones producen compuestos resistentes y elásticos.

3.4 Preparación de las materias primas

De acuerdo a la formulación del compuesto de hule y a la capacidad de la máquina mezcladora que se utilizó en la investigación, se determinaron las cantidades de cada uno de los ingredientes de la formulación del nuevo material compuesto.

3.4.1 Preparación de los ingredientes de la formulación del compuesto

Los hules se cortaron en trozos de aproximadamente un centímetro cúbico, esto con el fin de que la alimentación de la máquina mezcladora fuera fácil y también para reducir el par en la máquina, que es mayor a mayor peso molecular del hule. El hule sin vulcanizar es muy fácil de contaminar por ser muy pegajoso, por lo que su manejo es delicado. Éste se pesaba (según lo calculado) y se guardaba en bolsas pequeñas de plástico, previamente etiquetadas con la clasificación establecida. El resto de los ingredientes de la formulación, también se pesaba cuidadosamente con una exactitud de milésimas de gramo y se guardaba en conos de papel. La reproducibilidad de un material depende grandemente de la exactitud del pesado de los ingredientes.

Finalmente, todos los componentes de la formulación se integraban junto con los materiales de refuerzo y se guardaban en el orden en que se agregarían en la mezcladora.

3.4.2 Preparación de las fibras

Las fibras de vidrio, debido a su presentación, se deshilaron separando de ellas las fibras de poliamida. Posteriormente se cortaron en largos de 10 mm al igual que la fibra de carbono. Se utilizaron guantes de látex y cubrebocas para efectuar esta tarea, ya que la ingestión de estas fibras para cualquier ser humano es peligrosa. Se debe evitar tocarlas para prevenir contaminarlas con la grasa natural de las manos, ya que ésta impide su adhesión con la matriz del compuesto.

Cuando las fibras ya tenían la longitud establecida, algunas fueron tratadas con tolueno (para eliminar cualquier agregado que pudieran tener que impidiera la adhesión entre ellas y la matriz elastomérica) y recubiertas con diferentes adhesivos (más adelante se explica con detalle). Otras fibras se utilizaron sin tratar con tolueno y sólo con algún adhesivo y otras se utilizaron directamente después de cortadas.

3.4.3 Preparación de la arena

Se utilizó la arena retenida por una malla calibre 50. Parte de la arena seleccionada se recubrió con una capa de los mismos adhesivos que se utilizaron con las fibras. El resto, se utilizó sin ningún agregado. Se pesó en las cantidades especificadas y se guardó en conos de papel.

3.5 Proceso de mezclado convencional

Para el proceso de mezclado se utilizó una máquina mezcladora HAAKE RHEOCORD TORQUE RHEOMETER que contiene una cámara de mezclado con capacidad para 60 gramos. La cámara tiene dos cuchillas rotatorias tipo "single curve" (fig. 3-5) que giran en direcciones opuestas. La velocidad de trabajo fue de 32 rpm. La mezcladora no cuenta con un sistema de enfriamiento integrado a la máquina. La fig. 3-6, muestra una fotografía de la cámara de mezclado.

Al iniciar el proceso, la máquina se enciende y se fija la velocidad de rotación de las cuchillas. En la mesa de trabajo se colocan todos los ingredientes según el orden en que se introducen en la mezcladora. Al introducir, los ingredientes en polvo se debe tener cuidado de no perder material, ya sea porque se quede pegado en las orillas de la cámara de mezclado o porque se esparza fuera de la cámara.

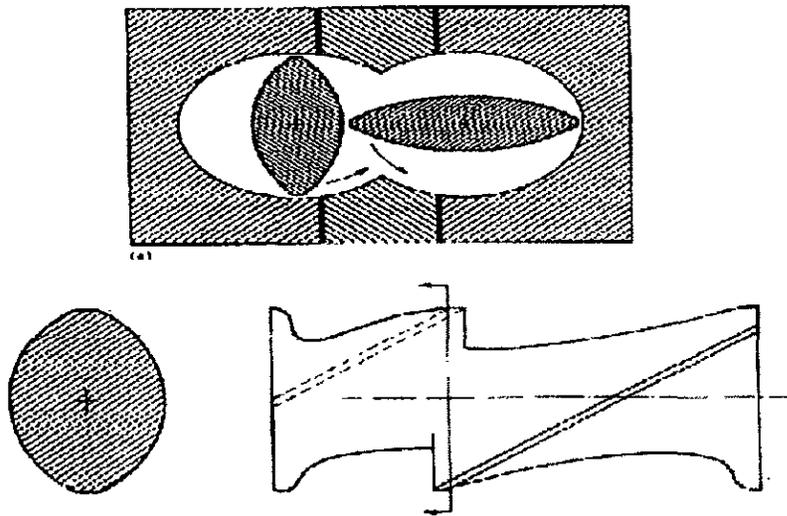


Fig. 3-5 Cuchillas “single curve” (Cheremisinoff, 1993)

El orden de mezclado fue el siguiente: primero las cargas reforzantes (incluyendo los materiales de refuerzo), luego los agentes plastificantes y finalmente los materiales vulcanizantes. Los ingredientes se vaciaban a la mezcladora, uno a uno con una diferencia aproximada de un minuto.

El ciclo de mezclado comienza a temperatura ambiente. Al terminar la primera carga, generalmente, ésta se ha elevado hasta 80° C. Las cargas posteriores inician a temperaturas más altas y terminan a temperaturas de hasta 90° C o más. Siempre se tuvo cuidado de no alcanzar la temperatura de vulcanizado (120° C). La temperatura se bajaba reduciendo la velocidad de mezclado o mediante inducción de aire (con un

ventilador). Cuando ésta era demasiado alta (arriba de 100° C), se paraba la máquina por el tiempo necesario para que bajara la temperatura hasta 30° C.

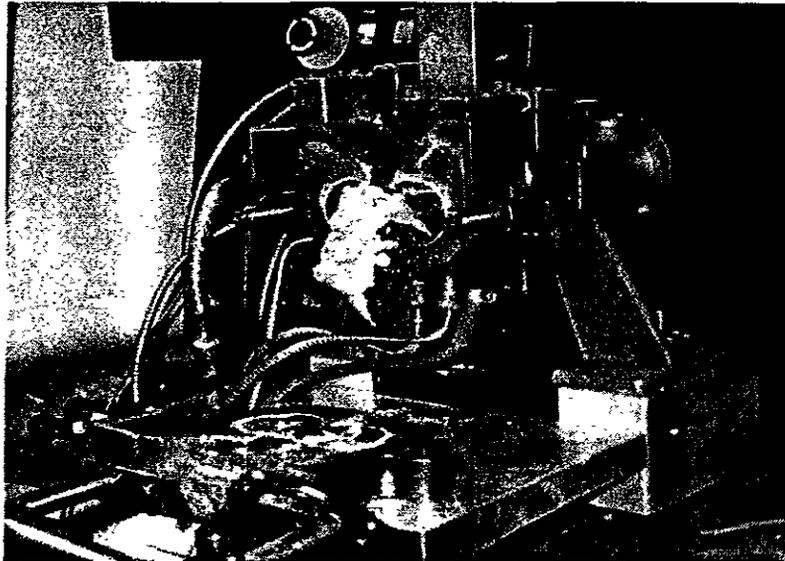


Fig. 3-6 Cámara de mezclado

Cuando se terminaba de agregar todos los ingredientes, el mezclado continuaba por 15 minutos más, con el fin de lograr que el nuevo material compuesto fuera lo más uniforme posible. La duración total del proceso por carga es de 50 a 60 minutos dependiendo del tipo de hule. Al finalizar se obtiene una masa pastosa y poco elástica la cual se debe dejar reposar (cinco horas) antes de ser sometida al siguiente proceso.

Se llevó un registro de cada una de las mezclas que se realizaron anotando los tiempos de mezclado de cada ingrediente, así como el tiempo total del proceso.

La fig. 3-7 muestra una gráfica obtenida durante el proceso de mezclado donde se puede apreciar el tiempo del proceso, la elevación de la temperatura causada por la fricción interna de la mezcla y el par requerido por cada uno de los ingredientes para integrarse a la mezcla. El hule natural, al tener un peso molecular muy alto, produce un

par mayor que la de los hules sintéticos. Antes de agregar cualquier ingrediente de la formulación, se permitía que el hule natural se mezclara dentro de la cámara de mezclado, hasta que su consistencia fuera uniforme.

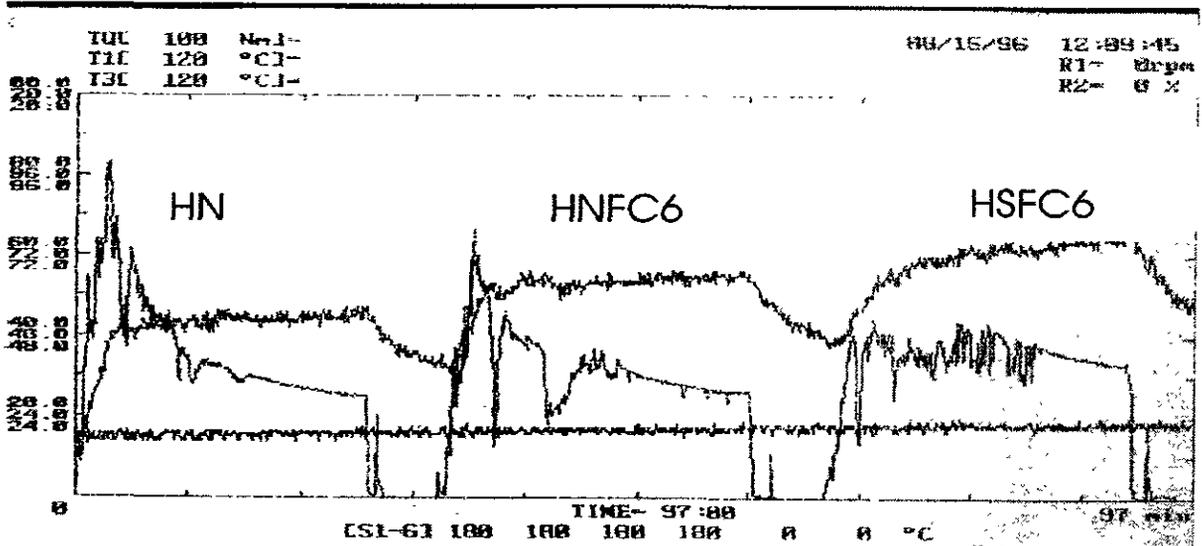


Fig. 3-7 Gráfica obtenida durante el proceso de mezclado

3.6 Proceso de vulcanizado

El proceso de vulcanizado de los materiales elastoméricos requiere de aplicación de calor y presión para obtener el producto deseado. Para este proceso se utilizó una prensa térmica marca Carver con capacidad de 12 tons. La prensa consta de dos placas conectadas a una resistencia que las calienta. En la placa superior se encuentra la carátula de un medidor de temperatura cuyo límite máximo es 750° F. La temperatura se controla mediante un termostato montado en el exterior de la prensa. La temperatura de vulcanización que se utilizó en todos los materiales fue de 120° C (punto de fusión del azufre). El tiempo de vulcanización varía según el tipo de hule. Para el hule natural se utilizan 25 minutos y para el hule sintético 30. Cuando las fibras eran tratadas con algún adhesivo el tiempo de vulcanización aumentaba a una hora.

El material obtenido del proceso de mezclado, se coloca dentro de los moldes de los especímenes de prueba y éstos posteriormente se ponen entre las dos placas de la prensa, la cual, para entonces, ya alcanzó la temperatura deseada de 120° C. Se les aplica una presión de 6 tons. para completar el proceso. Se llevó un registro de todos los ciclos de vulcanizado.

Al finalizar este proceso se esperaba al menos 8 horas antes de someter las probetas a las diferentes pruebas de caracterización requeridas en la investigación.

3.6.1 Elaboración de moldes para las probetas.

Cada una de las diferentes pruebas a las que fueron sometidos los nuevos materiales compuestos para su caracterización requirieron de formas especiales según la norma ASTM que les correspondía. Para crear estos especímenes de prueba, se diseñaron y fabricaron cinco diferentes matrices de acero inoxidable 304, con las que se les dio forma a los materiales durante el proceso de vulcanizado (fig. 3-8).

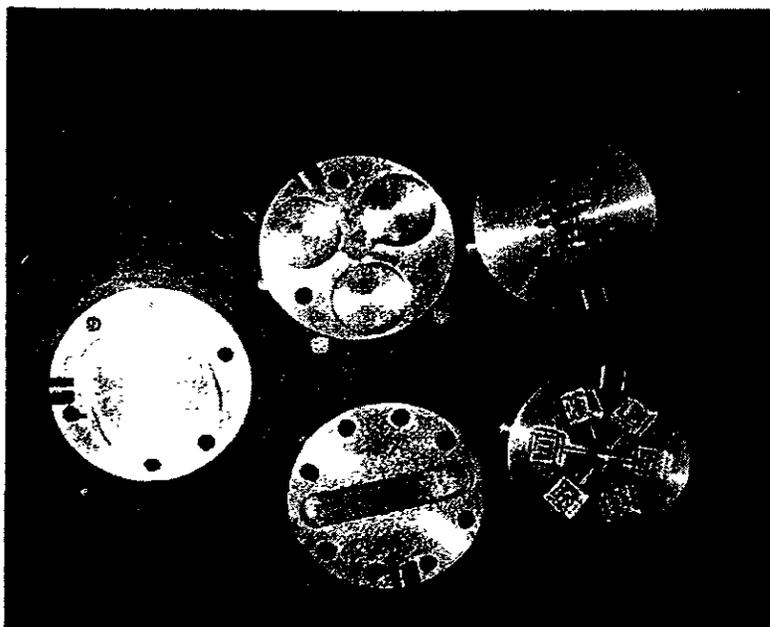


Fig. 3-8 Moldes para dar forma a las probetas.

3.7 Proceso de mezclado y vulcanizado con poliuretano

Las fibras de vidrio y de carbono se quiebran considerablemente durante el proceso de mezclado. Pensando en dar solución a ese problema, se buscó una manera de integrar la matriz y el material de refuerzo para formar el material compuesto, sin tener que usar un equipo que dañara las fibras. Para lograr lo anteriormente planteado se propuso utilizar un elastómero que por sus características no requiere ser mezclado en forma mecánica.

El poliuretano viene en forma de una resina (RU 2013) y un catalizador (HC 110) que al mezclarse dan como resultado un hule con una dureza aproximada de 60 unidades Shore A. Las proporciones usadas son de 100 partes de resina por 50 de catalizador. Este proceso se debe realizar rápidamente porque la mezcla se vulcaniza a temperatura ambiente en menos de 5 minutos. Las fibras, se agregan antes del catalizador. El material ya vulcanizado se deja reposar hasta que se endurece totalmente, lo cual puede tardar hasta 24 horas.

Para este proceso, se diseñó y fabricó un molde de acero que sirviera como recipiente para realizar el mezclado y además, al dejar el material ahí, diera forma a la probeta. Las dimensiones de ésta última son 75 mm de diámetro y 20 mm de alto.

Se prepararon cinco probetas reforzadas con fibra de vidrio y cinco reforzadas con fibra de carbono al 6 y al 10%.

3.8 Limpieza de fibras

El proceso de limpieza de las fibras consiste en sumergirlas en tolueno. Las fibras de vidrio y de carbono se lavan en esta substancia con el fin de remover cualquier materia extraña que tuviera desde su fabricación y que evitara su correcta adhesión con la matriz elastomérica. Las fibras se dejan sumergidas en el tolueno durante cuatro horas y luego se enjuagan con agua destilada. Después de enjuagarlas varias veces, se

dejan secar a la intemperie para que los últimos residuos de tolueno se evaporen. Algunas fibras se utilizaron directamente al terminar este proceso y otras posteriormente se impregnaron con el sistema RFL.

3.9 Preparación del adhesivo RFL

Para mejorar la unión entre los refuerzos (las fibras y la arena) y la matriz elastomérica, se utilizó el sistema de adhesión RFL, cuya fórmula (tabla 3-4) fue proporcionada por la empresa Quimir (que fabrica adhesivos para cuerdas de poliéster para llantas). En total se usaron cinco diferentes variaciones de dicha fórmula.

Tabla 3-4 Fórmula básica del sistema RFL

MATERIAL	%	ml
H ₂ O	22.94	114.7
NH ₄ OH al 28%	4.59	22.95
Resina al 75%	4.01	20.05
NaOH al 50%	0.23	1.15
H ₂ O	22.94	114.70
NH ₄ OH	1.72	8.60
Látex al 39%	40.13	200.65
Formol al 37%	3.44	17.2
Total	100	500

3.9.1 Latizado de refuerzos con una solución RFL

Los materiales de refuerzo (fibras y arena) son sumergidos en la solución RFL por una hora para que se saturan, luego se sacan y se escurren. Los materiales de refuerzo así impregnados se colocan dentro de un recipiente especialmente diseñado para que pueda circular aire frío entre ellas por 10 minutos (aplicado mediante una pistola para secar pelo) y así eliminar los excesos de humedad antes de ser introducidas a un horno a 150° C durante 15 minutos. Si la fibra, después de estos pasos no se ha secado totalmente, entonces se debe de introducir al horno nuevamente por otros 15 minutos o hasta que esté seca totalmente. Cuando la fibra ya esté lista se debe de almacenar en bolsas de plástico negras para evitar que la luz degrade la solución de RFL.

3.10 Proceso para reducir la ruptura de la fibra

En el proceso tradicional de fabricación del material compuesto (de hule y fibras), las fibras se introducen directamente a la máquina mezcladora. Éstas, de inmediato entran en contacto directo con las cuchillas de la máquina lo cual provoca su rompimiento. Considerando que las fibras podrían estar más protegidas se utilizó látex en lugar de hule sólido para fabricar la matriz del material compuesto.

La incorporación de las fibras al látex se realizó de la siguiente manera: primero se dejó el látex a la intemperie por dos días con el fin de eliminar algo del agua en que está diluida la parte sólida del elastómero. Cuando se obtuvo una consistencia pastosa, se agregaron las fibras formando un nuevo material. Posteriormente, éste se expuso al sol por un día. Para terminar de eliminar cualquier residuo de humedad que pudiera tener el nuevo material, se secó en un horno eléctrico por 2 horas a 100° C. Finalmente, el nuevo material se procesó en la máquina mezcladora como se acostumbra tradicionalmente. Se siguió el mismo proceso que con los otras matrices elastoméricas hasta obtener los especímenes de prueba.

3.11 Métodos de caracterización del nuevo material compuesto

Los nuevos materiales compuestos se sometieron a diferentes pruebas con el fin de determinar sus más relevantes y principales propiedades para esta investigación.

3.11.1 Análisis dinámico mecánico (DMA)

Esta prueba se llevó a cabo en dos equipos diferentes, el primero fue un DMA 2980 TA Instruments localizado en las oficinas de Equipar en EUA. La prueba se llevó a cabo en cuatro materiales: HN, HNFV6, HNA6 y HNFVAS6. Las probetas de prueba tienen las siguientes dimensiones: 16.85 X 12.7 X 3.0 mm. Se utilizó una frecuencia de 1 Hz y una amplitud de 20µm. El modo de prueba fue flexión por "cantilever" simple. El rango de la temperatura de la prueba fue de -150° C hasta 150° C.

El segundo equipo utilizado fue un DMA, Du Pont, propiedad del Centro de Investigación Científica de Yucatán. Las dimensiones de las muestras usadas son 5 X 5 X 6 mm. Los materiales utilizados fueron: HN, HNS, HNA6, HNA8, HNA20, HNA6W, HNA6C, HNSA15W, HNSA6C, HNFV15R, HNFCS6, HNFC6, HS, HSS, HSA15C, HSFC15R, HSSA15W, HSA15C, HSSA6C. El rango de temperatura de la prueba fue desde -120°C hasta 150°C con una rapidez de calentamiento de $2^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$. Se utilizó nitrógeno líquido para bajar la temperatura.

Por no contar con un equipo propio, este análisis no se llevó a cabo en todos los materiales a pesar de que es quizás la prueba más importante de la investigación.

3.11.2 Análisis termo-mecánico (TMA)

El análisis TMA se realizó en un aparato TA Instrument propiedad del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. La prueba consiste en una medición del cambio de dimensión (expansión, contracción) del material a través de un programa controlado de temperatura. El rango de temperatura de la prueba fue de -100°C hasta 150°C . Se utilizó nitrógeno líquido para bajar la temperatura. La rapidez de calentamiento fue de $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$. Se utilizaron especímenes cilíndricos de 6 mm de diámetro y 5 mm de alto los cuales se mantuvieron bajo una carga de compresión de un Newton durante la prueba. Se obtuvo la temperatura de transición T_g de los siguientes materiales: HN, HNA6, HNFVA6, HNFC6, HS, HSA6, HSFVA6 y HSFC6

3.11.3 Análisis dieléctrico (DEA)

El análisis dieléctrico es una prueba que se encuentra muy relacionada con las pruebas del DMA porque el DEA proporciona la posibilidad de examinar como cambia su conductividad iónica los materiales, lo cual a su vez, permite dar conclusiones con relación a sus cambios estructurales. Las gráficas que se obtienen de ésta prueba, son muy parecidas a las de las pruebas del DMA.

El DEA mide cuatro propiedades importantes: La permitividad, ϵ' , también llamada constante dieléctrica. El factor de pérdida, ϵ'' , es la energía requerida para alinear dipolos. La $\tan\delta_d$ (ϵ''/ϵ'), es el factor de disipación y se mide como el ángulo de fase entre el voltaje de entrada y la corriente de salida por lo que es análoga a la $\tan\delta$ mecánica. El DEA, al igual que el DMA, es una herramienta útil para examinar relajaciones moleculares y cambios de viscosidad. Al principio de esta investigación parecía que no se podría conseguir un equipo de DMA, en cambio sí se tenía acceso a un equipo de DEA, por lo que por todas las razones antes expuestas, se llevaron a cabo algunas pruebas en este último equipo. Para diferenciar las δ correspondientes al DMA y DEA, a la segunda de ellas se le agregó la letra d como subíndice.

El análisis dieléctrico DEA se llevó a cabo en un aparato TA Instruments propiedad del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. La prueba se realizó desde -100°C hasta 150°C . Se utilizó nitrógeno líquido para lograr bajar la temperatura. Las dimensiones de los especímenes son de $20 \times 20 \times 2$ mm. Los materiales analizados fueron: HN, HNFVA6, HS, HSFVA6.

3.11.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico, TGA, se realizó con el fin de determinar la temperatura a la que los materiales compuestos utilizados en esta investigación se degradan, ya que no se sabía si aguantarían las temperaturas a las que estarían sometidos en la prueba del DMA.

Para la prueba de TGA se utilizó un aparato TA Instrument propiedad también del Instituto de Investigaciones en Materiales. Esta es una prueba que mide pérdida o ganancia de peso de una muestra de material mediante un programa controlado de temperatura. El rango de temperatura de la prueba fue desde 0°C hasta los 600°C . El tamaño de la muestra varió entre 10 y 30 mg para que el cambio de peso de la muestra fuera de tan solo unos microgramos.

Esta prueba sólo se les aplicó a dos materiales: HN y HNFV6. Las dimensiones de los especímenes de prueba son: 20X20X2 mm.

3.11.5 Pruebas de tensión

En total se hicieron más de 600 pruebas. La metodología que se siguió fue la siguiente: se clasificaron y se prepararon 5 probetas de cada material para que la prueba fuera confiable. Las dimensiones de las probetas son: 60 mm de largo por 25 mm de ancho y 3 mm de espesor. Cada una de ellas se marcó y troqueló para darle la forma requerida por la norma ASTM D412. Como éstas eran más angostas en los extremos que lo requerido por la norma y de hecho se deslizaban fuera de las mordazas neumáticas se les colocaron en sus extremos unas extensiones, hechas de varias capas de cinta de enmascarar (maskin), de manera que se tuviera una mayor área de sujeción.

El hule en tensión generalmente falla por algún defecto causado por: el suaje cuando se le dió forma al espécimen, por una región de dispersión pobre, por porosidad por la inclusión de alguna partícula extraña, etc.

Se utilizó una celda de carga de 50 kg. La velocidad de prueba fue de 500 ± 50 mm/min, constante, indicada por la norma para los elastómeros. Se obtuvieron datos de módulo de tensión.

La curva esfuerzo deformación se debe de obtener siempre de especímenes que nunca hayan sido estirados. Esta es una curva que no se puede repetir con estiramientos subsecuentes por los cambios que se ocasionan en el material los cuales son sólo parcialmente reversibles. Estos cambios son más evidentes en compuestos que contienen cargas de refuerzo que en los que no tienen.

3.11.6 Prueba de Resiliencia

La resiliencia por rebote es una forma muy básica de una prueba dinámica en la cual el espécimen es sujeto a un ciclo de deformación. La deformación se aplica golpeando la probeta con un indentador que está libre para rebotar después del impacto. La resiliencia por rebote se define como el cociente de la energía del indentador después del impacto y su energía antes del impacto expresada como un porcentaje.

La resiliencia por rebote de la mayoría de los elastómeros varía ampliamente con la temperatura. A temperatura ambiente, los resultados de esta prueba para diferentes elastómeros varían de 5% a 75%, dependiendo del tipo básico de hule y de los ingredientes del compuesto (Nagdi, 1993). La histéresis es igual al 100% menos el porcentaje de resiliencia. Esta es una prueba atractiva, especialmente para propósitos de control de calidad por su simplicidad y porque el aparato resulta realmente económico.

Las pruebas de rebote son muy sensibles a la temperatura de la probeta, aunque no a la temperatura superficial. Esto permite que las pruebas se realicen en un laboratorio abierto donde los especímenes se pueden acondicionar a altas o bajas temperaturas con muy poco error. En la fig. 3-9 se muestra que si la temperatura del espécimen se baja, la resiliencia disminuye al mínimo y luego aumenta otra vez. Esta disminución ocurre cuando el hule se encuentra en el estado "leathery".

El rebote se aumenta al incrementar el módulo o al disminuir la fricción interna. Si estas propiedades se van a medir separadamente se deberá usar una prueba de vibraciones libres o forzadas.

En total se hicieron aproximadamente 700 pruebas. Las probetas son cilindros de 25 mm de diámetro y 12 mm de espesor. Las pruebas se efectuaron por ambas caras de cada una de tres probetas de cada material. Se tomaron entre 25 y 30 lecturas en cada cara de cada probeta.

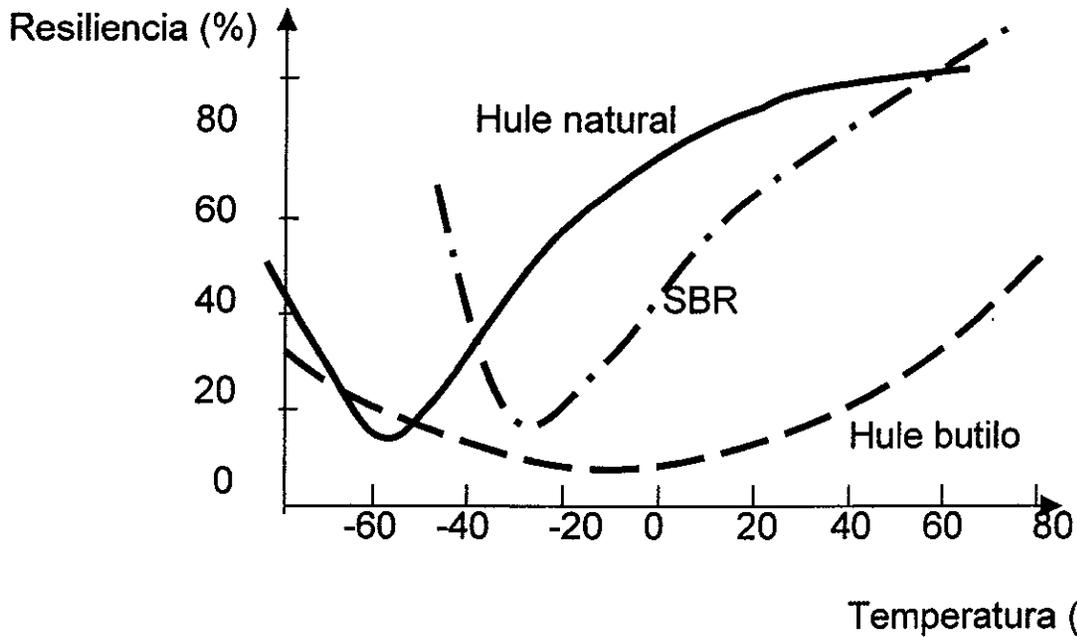


Fig. 3-9 Efecto de la temperatura en la prueba de rebote para varios tipos de hule (Brown, 1995).

El aparato utilizado fue diseñado y construido especialmente para esta prueba según la norma ASTM D 2632-92 (fig. 3-10).

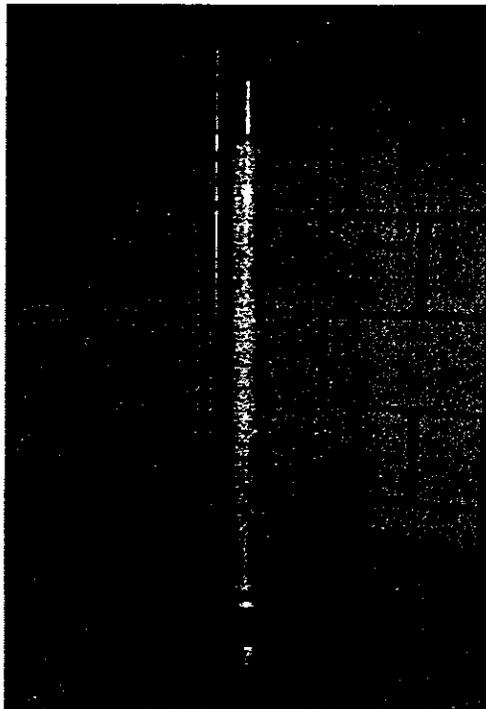


Fig. 3-10 Aparato medidor de resiliencia

En un principio fue un trabajo difícil porque el rebote del identador ocurre muy rápido, y porque la lectura se tomaba en forma visual, sin ayuda de algún dispositivo. Era muy difícil realizarla sin error. Algunos de los resultados de algunos materiales fueron sobresalientes por lo que se decidió repetir el experimento varias veces bajo diferentes condiciones de temperatura. En esta ocasión se utilizó una cámara de alta velocidad para obtener lecturas más confiables. Al utilizar este equipo, el tiempo requerido para llevar a cabo la prueba aumentó considerablemente ya que cada probeta requería de 30 minutos en lugar de los 9 que se requerían cuando la prueba se realizaba sin la cámara.

3.11.7 Prueba de compresión

Se efectuaron pruebas de compresión en las mismas probetas que se usaron en la prueba de resiliencia. Se utilizó una máquina Instron en donde se aplicaba una carga de 30 kg. con una rapidez de deformación constante, después se mantenía la deformación alcanzada con esa carga permitiendo la relajación de la probeta por cinco minutos durante los cuales se obtenía la gráfica que muestra como decae la carga (fig 3-11). De la parte inicial de la gráfica se obtiene el módulo de compresión. En total se realizaron aproximadamente 400 pruebas.

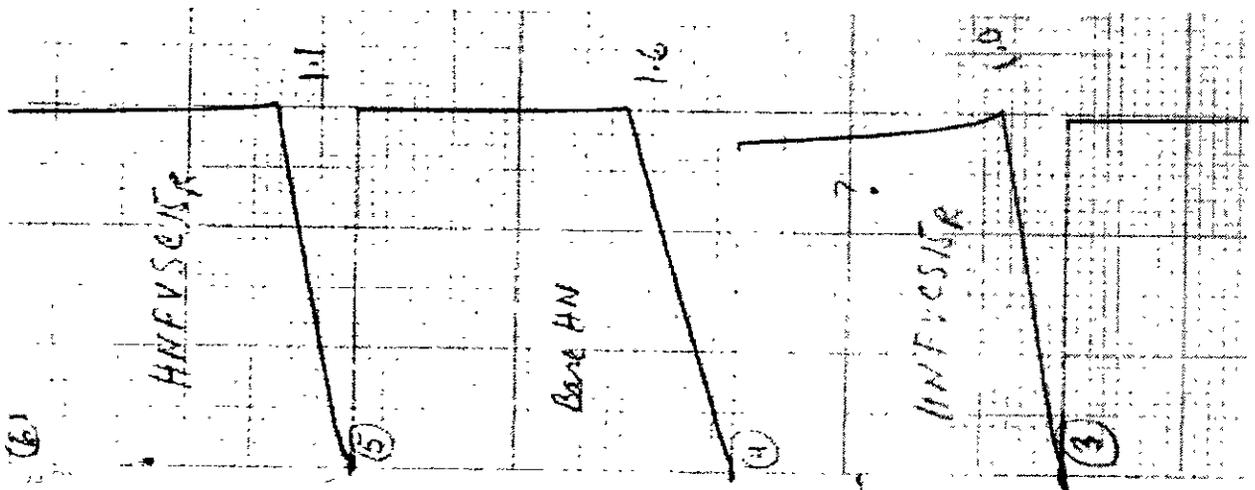


Fig. 3-11 Gráfica obtenida durante la prueba de compresión.

Con la prueba se pretendía simular el esfuerzo de compresión que soportan las llantas de un automóvil mediano en la zona de contacto con el piso.

3.11.8 Prueba de dureza

En total se realizaron 400 experimentos. Las dimensiones de las probetas son: 12 X12 X 6 mm según indica la norma ASTM D1415. La prueba se aplicó a tres probetas de cada material por sus seis caras haciendo un total de 30 mediciones por probeta. Las caras horizontales de cada probeta se dividieron en nueve partes y las caras laterales en tres. En cada una de las divisiones se colocó una marca para posicionar la punta del indentador del durómetro para tomar la lectura. Se utilizó un durómetro tipo Shore A propiedad del Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM.

3.11.9 Prueba de fricción

Esta prueba se lleva a cabo sobre una rampa hecha con un canal de lámina de 70 mm de ancho y 1.12 m de largo. El canal se relleno con asfalto. La rampa puede colocarse a diferentes grados de inclinación (fig. 3-13). Sobre la rampa se desliza un portamuestras (fabricado en acero rolado en frío) cuyo diseño se realizó para que el centro de gravedad del portamuestra y probeta coincidiera con el centro de la superficie de prueba de la probeta (fig. 3-12). Ambos dispositivos fueron diseñados y fabricados especialmente para la prueba. Previo al desarrollo de estos dispositivos se buscó información sobre los equipos en los que se llevaba a cabo este tipo de pruebas y se encontró un artículo sobre "The portable skid resistance tester", que es el más utilizado en estos casos, aunque su diseño es bastante complicado (Giles *et al*, 1962).

Las dimensiones de las probetas son las mismas de las de la prueba de dureza. Se utilizan tres muestras de cada material. Se programó hacer esta prueba a temperatura ambiente, temperatura baja (temperatura de la probeta de 5° C a 10° C) y temperatura

Cuando la prueba se realizó a baja temperatura, se utilizaron bolsas de hielo para mantener la superficie de la rampa y las probetas frías. Se midió la temperatura de la rampa, la cual fluctuó entre 5° C y 10° C.

Cuando la prueba se realizó a alta temperatura, se utilizó un horno eléctrico para calentar las probetas y el carro deslizador y darles una temperatura promedio de 50° C. La superficie de la rampa se calentó mediante dos focos de 100 Watts que se colocaron muy cerca de la rampa.

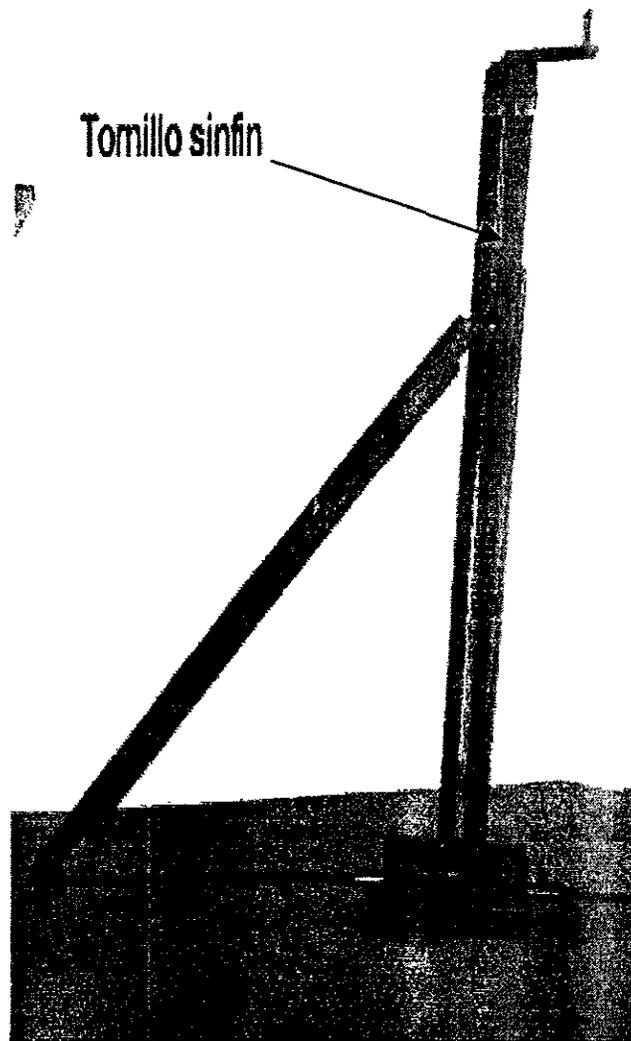


Fig. 3-13 Rampa de fricción.

3.11.10 Prueba de desgaste

Esta prueba se realizó con las probetas usadas durante las pruebas de fricción. También se utilizó la rampa y el carro deslizador portaprobeta.

Al finalizar las pruebas de fricción, todas las probetas se pesaron para determinar la masa inicial, con la que se haría la prueba de desgaste. La rampa se fijó a un ángulo de 53°, suficiente para que el carro portaprobeta se deslizara libremente con cualquier material. Cada probeta se deslizó por la rampa cinco veces una longitud determinada. Al finalizar la prueba, las probetas se pesaron para determinar la pérdida de masa. Se utilizó una balanza de alta precisión marca Bosch, con una precisión de 0.0001 g., para pesar todas las probetas. La prueba se llevó a cabo a temperatura ambiente solamente.

3.11.11 Pruebas utilizando el microscopio electrónico

Se analizaron 20 probetas de diferentes materiales con el fin de observar la distribución y estado de las fibras de vidrio y de carbono y de la arena además de medir los diámetros de las fibras. Para realizar este análisis, pequeñas muestras de los materiales (2X2X2mm) se colocaron sobre los portamuestras de aluminio que fueron fabricados especialmente para esta tarea. Posteriormente se les aplicó una capa de oro con el fin de hacerlas conductoras y así visibles en el microscopio electrónico. El oro se aplica en un aparato especial, marca Jeol Fine Coat ION Sputter JFC-1100, mediante la formación de vacío y de una diferencia de potencial. De las fotografías obtenidas se observó que las fibras se rompían aunque no se pudo apreciar con exactitud su longitud final.

Se utilizó un microscopio electrónico marca Philips propiedad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

3.11.12 Examen con el microscopio óptico

El objetivo de este examen fue determinar el tamaño de las fibras de vidrio y carbono después de pasar por el proceso de mezclado del látex. Se utilizó un microscopio marca Olympus AH 3-UMA propiedad del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

3.11.13 Prueba de adhesión de una sola fibra

Esta prueba se llevó a cabo para medir la resistencia cortante en la interfaz mediante la técnica de la microgota (Miller, 1991). Se usó para medir la fuerza de adhesión de las fibras de vidrio y de carbono al reforzar matrices de hule natural.

Se cortaron fibras (vidrio y carbono) de 100 mm de largo y se colocaron y pegaron paralelas sobre un marco que se fabricó especialmente para esta prueba. Se utilizaron fibras con y sin un tratamiento de adhesivo RFL. Posteriormente, el procedimiento de la microgota comienza con el depósito de una pequeña cantidad de hule sobre las fibras de modo tal que se formen "gotitas" concéntricas alrededor de éstas. Para vulcanizar las "gotitas" de hule el marco con las fibras se metió en un horno eléctrico SYBRON modelo thermolyne 1200 por una hora. La fibra de vidrio sin adhesivo y la fibra de carbono con hule natural requirieron una temperatura de entre 220° C a 230° C, mientras que la fibra de vidrio impregnada con adhesivo y la fibra de carbono sin adhesivo necesitaron de entre 230° C a 240° C.

La prueba mecánica se realizó en un marco de pruebas modelo Minimat al que se le adaptó una celda de 50 gr (fig. 3-14). La prueba consistió en desprender la fibra de la microgota utilizando una velocidad de 0.05 mm/min. La fuerza se monitoreó y registró continuamente.

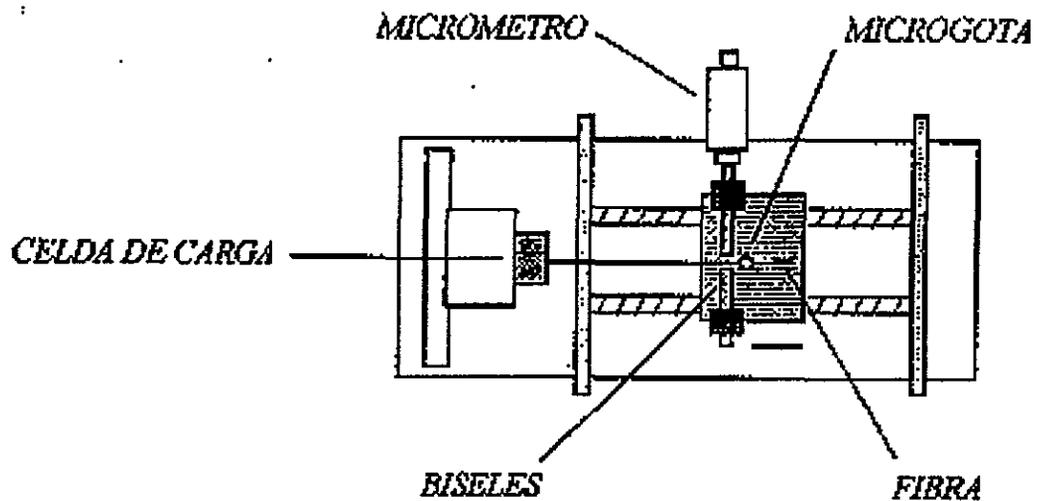


Fig. 3-14 Dibujo representativo de la máquina Minimát.

CAPÍTULO 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas que se llevaron a cabo durante la investigación y en el capítulo 5 se comentan. Se presentan en el mismo orden en que se describieron en el capítulo anterior. No se incluyen los resultados obtenidos con el poliuretano ya que este material, en cualquiera de las pruebas a las que fue sometido, arrojó resultados muy pobres que bien pudieron deberse a la poca destreza que se tenía en el manejo del material como materia prima.

4.1 Análisis dinámico mecánico

Los resultados obtenidos en el equipo de análisis dinámico mecánico DMA 2980 TA Instruments se presentan en las figuras 4-1 a 4-5. En ellas se aprecia el comportamiento de la $\tan\delta$, el módulo de almacenamiento (MPa) y el módulo de pérdida (MPa) a diferentes temperaturas desde $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se utilizó una frecuencia de 1 Hz.

En la fig. 4-1 se presentan las curvas obtenidas para el hule natural solo (sin materiales de refuerzo). La fig. 4-2 presenta las curvas obtenidas para el material compuesto por hule natural y un 6% de arena. La fig. 4-3 muestra las curvas obtenidas para el material compuesto por hule natural y 6% de fibra de vidrio. La fig. 4-4 corresponde a un hule con una carga de sílica formando un material compuesto mediante dos materiales reforzantes: 6% de fibra de vidrio y 6 % de arena.

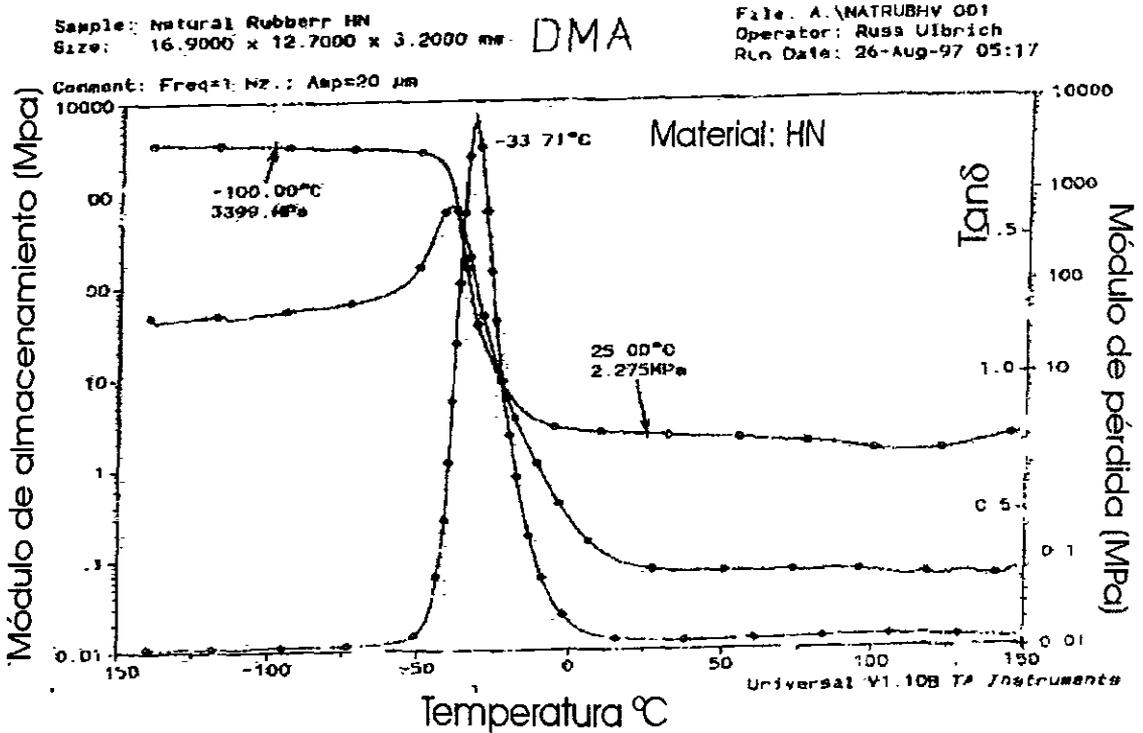


Fig. 4-1 Prueba de DMA realizada a una probeta de hule natural sin materiales de refuerzo.

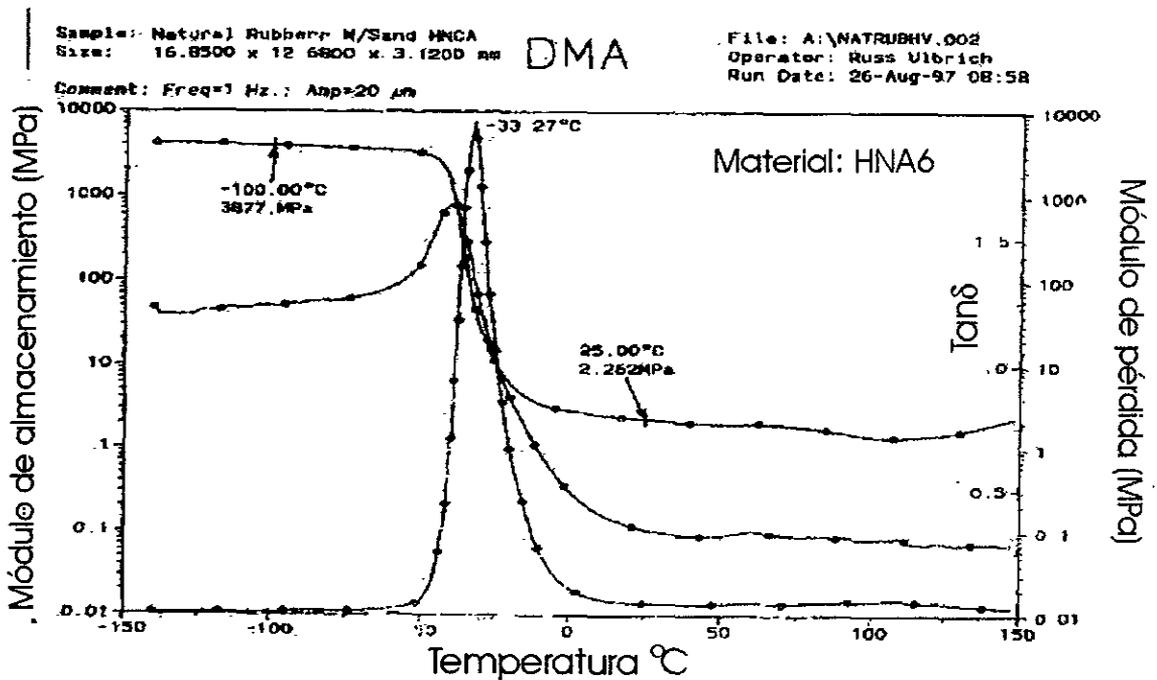


Fig. 4-2 Prueba de DMA realizada a una probeta de hule natural reforzada con 6% de arena

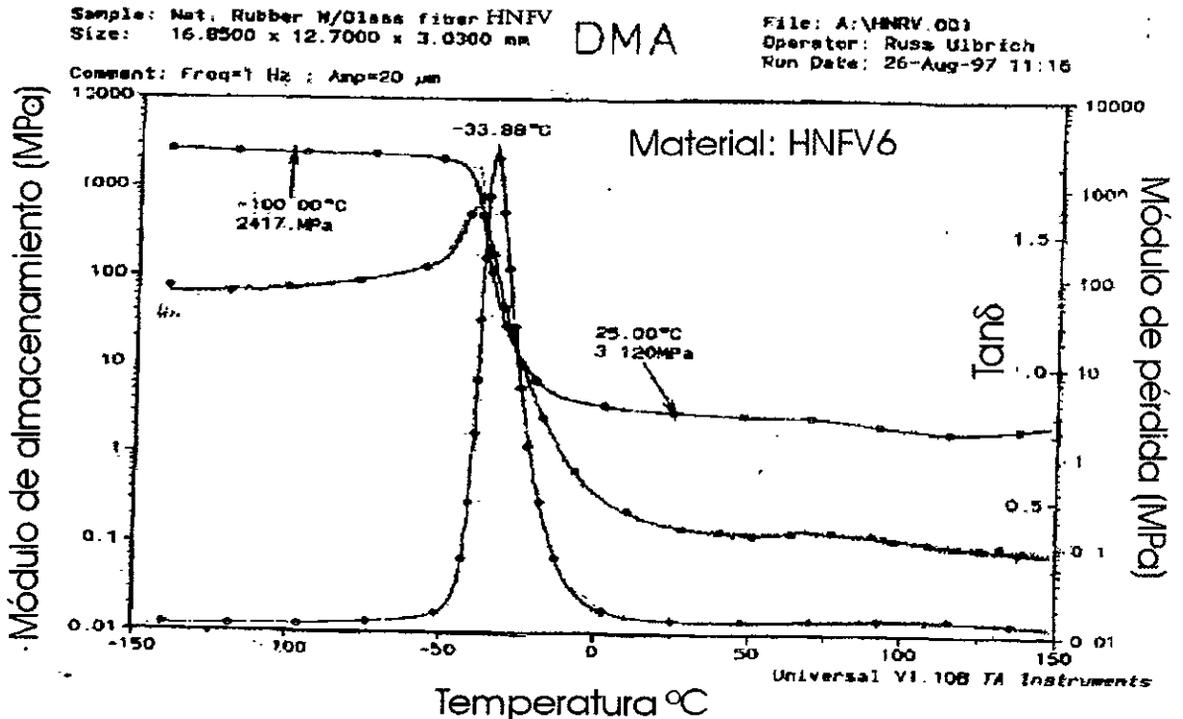


Fig. 4-3 Prueba de DMA realizada en una probeta de hule natural reforzada con 6% de fibra de vidrio.

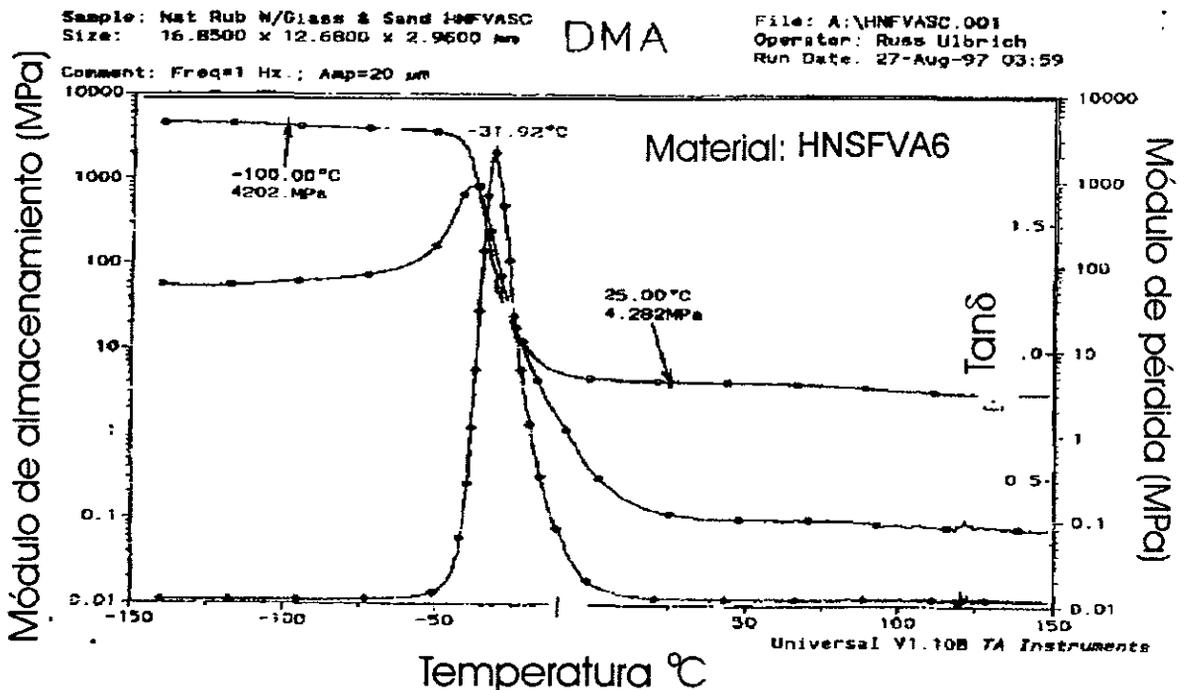


Fig. 4-4 Prueba de DMA realizada en una probeta de hule natural con una carga de sílica reforzada con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena.

La fig. 4-5 presenta el módulo de almacenamiento para los cuatro materiales mencionados anteriormente.

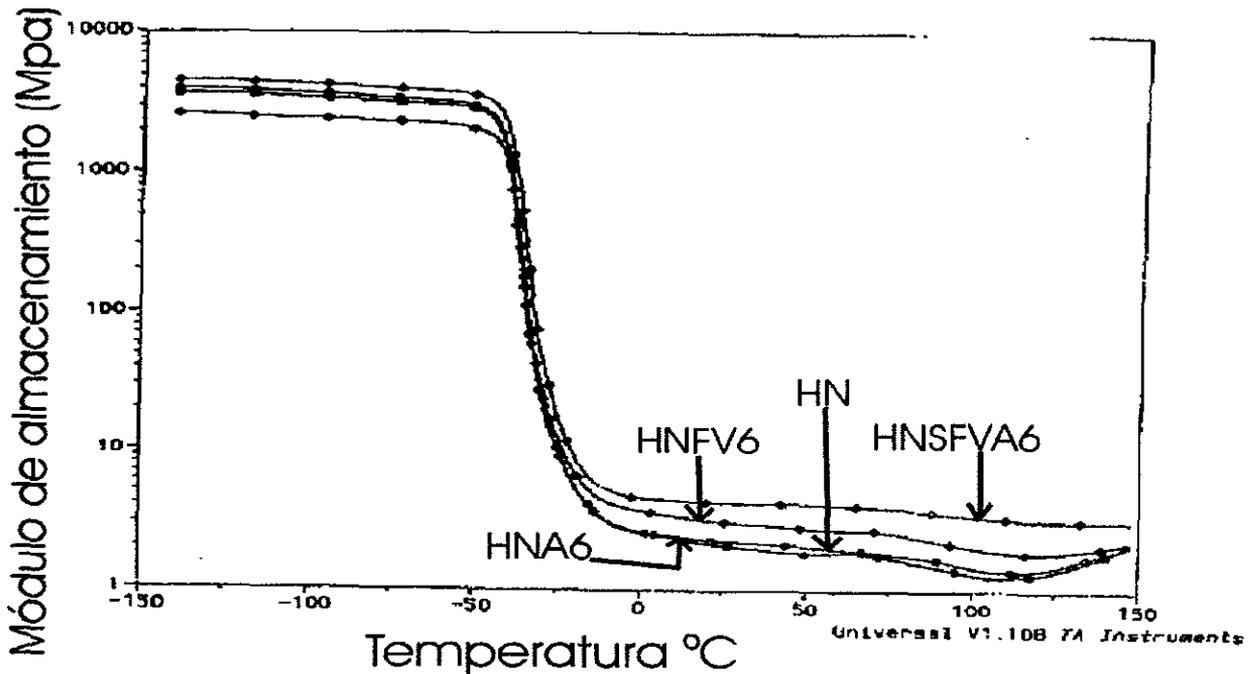


Fig. 4-5 Gráfica comparativa de los módulos de almacenamiento para los hules que se muestran en las gráficas de las figs. 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4.

Los resultados del equipo Du Pont se presentan en las figuras 4-6 a 4-13. Las curvas de $\tan\delta$ y de módulo de almacenamiento se muestran por separado. De la fig. 4-6 a 4-9 el rango de temperatura que se utilizó fue de $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y para el resto de las figuras la temperatura estuvo comprendida entre $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La fig. 4-6 presenta las curvas de $\tan\delta$ obtenidas para cuatro materiales: dos hules, HN y HNS, y dos materiales compuestos, HNFV15X y HNSFC6. La fig. 4-7 presenta el módulo de almacenamiento para los cuatro materiales correspondientes a la fig. 4-6. La fig. 4-8 muestra las curvas de $\tan\delta$ para dos hules, HSS y HS, y tres materiales compuestos: HSSF15X, HSFC15X y HSFC6 y la fig. 4-9 los módulos de almacenamiento de los materiales correspondientes a la fig.4-8.

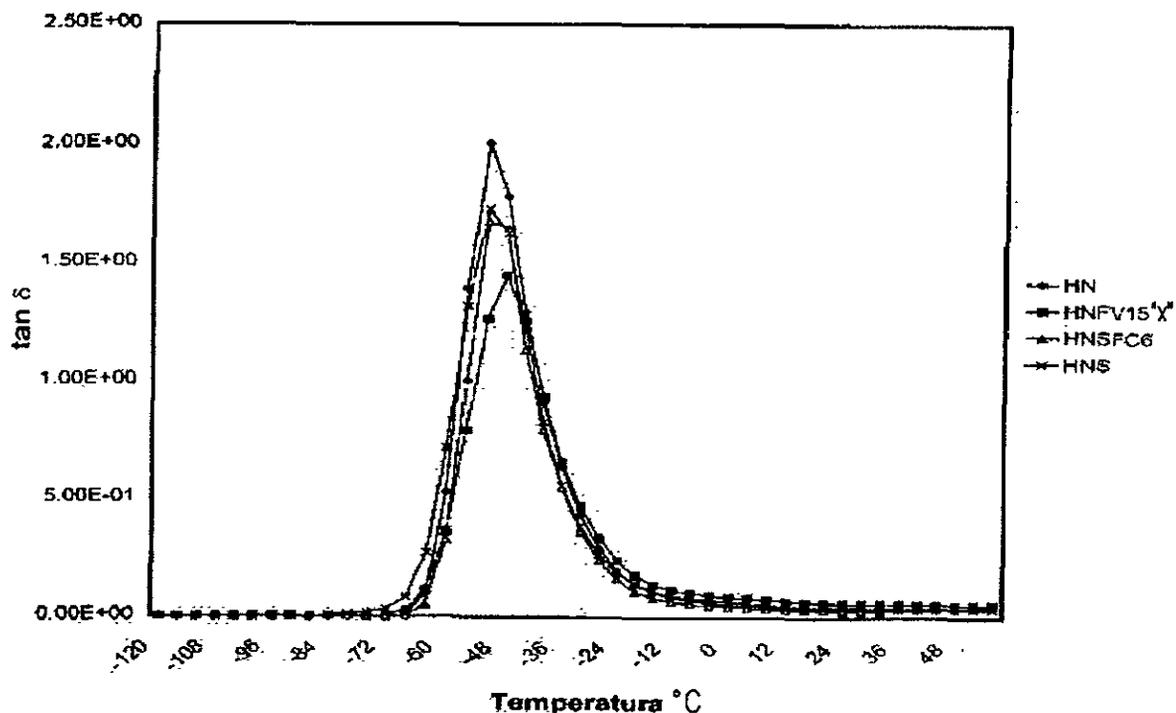


Fig. 4-6 Curvas de $\tan \delta$ para hule natural, hule natural con una carga de sílica, hule natural con 15 % de fibra de vidrio impregnado con el adhesivo X y hule natural con una carga de sílica reforzado con 6% de fibra de carbono.

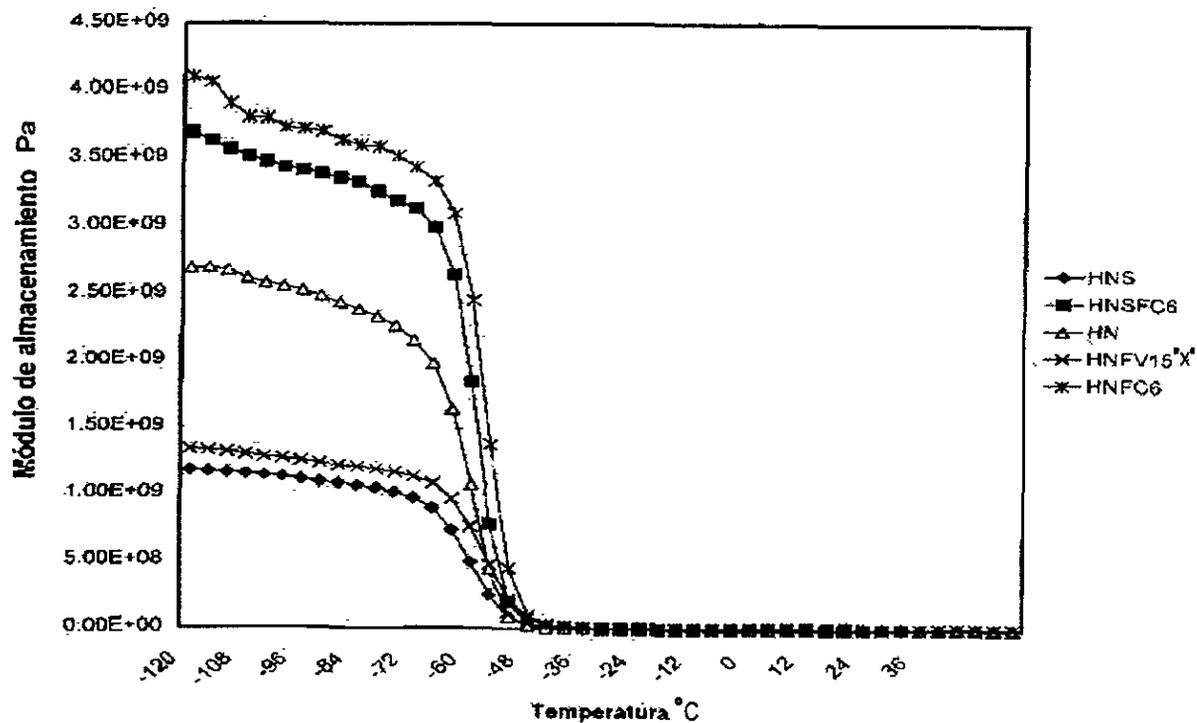


Fig. 4-7 Módulos de almacenamiento los mismos materiales de la figura anterior.

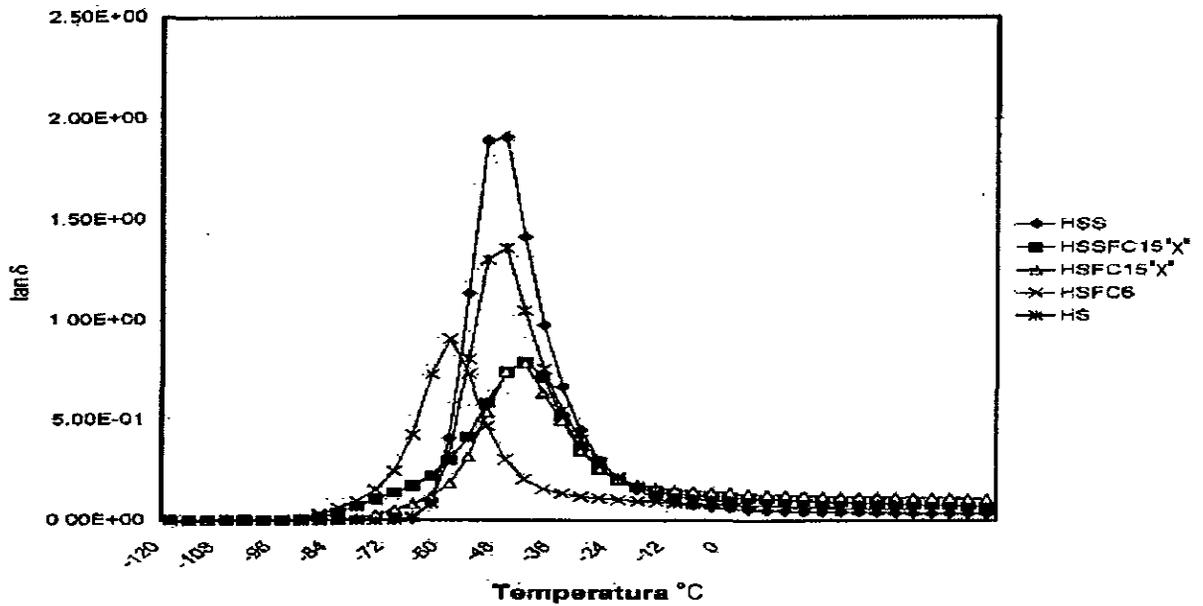


Fig. 4-8 Curvas de $\tan\delta$ para hule sintético, hule sintético con una carga de sílica, hule sintético con una carga de sílica reforzado con 15% de fibra de carbono impregnada con adhesivo "X", hule sintético reforzado con 15% de fibra de carbono impregnada con adhesivo "X" y hule sintético reforzado con 6% de fibra de carbono.

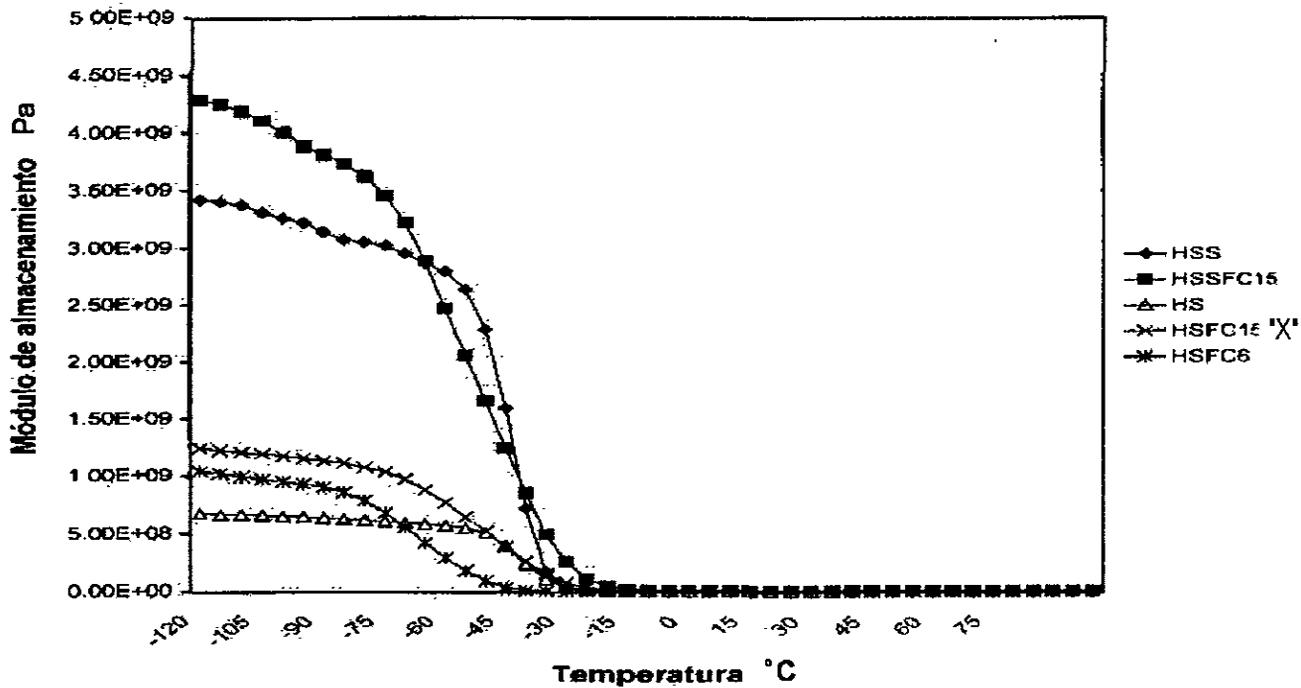


Fig. 4-9 Módulos de almacenamiento para los materiales de la figura anterior.

La fig. 4-10 muestra las curvas de $\tan\delta$ obtenidas para tres hules solos: HN, HSS y HS y cuatro materiales compuestos con refuerzos impregnados con alguno de los adhesivos en estudio: HSSA15W, HSA15C, HSSA6C Y HNSA15W. La fig. 4-11 presenta las curvas de los módulos de almacenamiento correspondientes. La fig. 4-12 muestra las curvas de $\tan\delta$ de siete materiales compuestos; todos contienen arena como material de refuerzo. En cuatro de éstos, la arena fue tratada con un adhesivo tipo "C" y en otro con adhesivo tipo "W". En las otras dos muestras no se usó adhesivo. En una de las muestras en las que se usó el adhesivo tipo "C" la matriz contiene sílica. De acuerdo con la designación introducida en el capítulo 3, estos materiales se identifican como: HNSA6C, HSA15C, HNA6C, HNA6W, HNA8, HNA20, HNA6. La fig. 4-13 presenta las curvas de los módulos de almacenamiento de estos materiales.

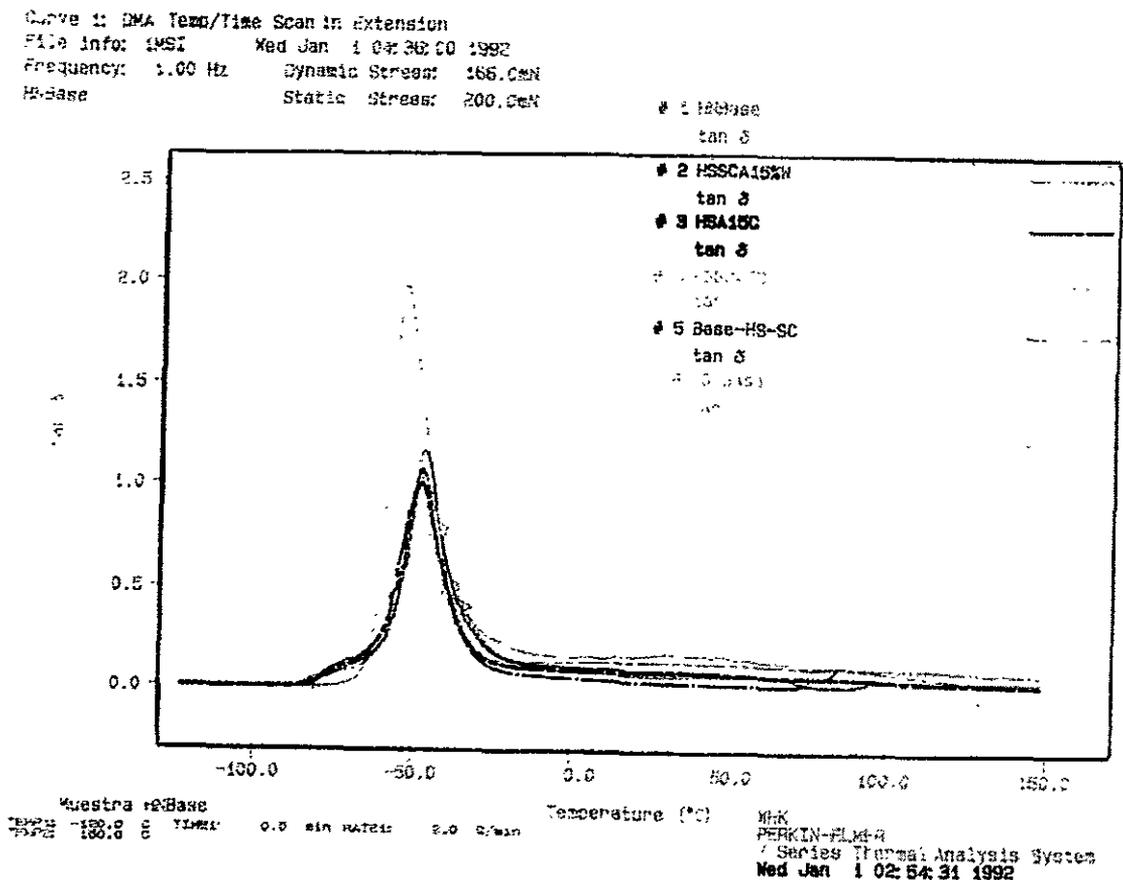


Fig. 4-10 Curvas de $\tan\delta$ para hule natural, hule sintético con una carga de sílica, hule sintético, hule sintético con una carga de sílica reforzado con 15% de arena impregnada con adhesivo "W", hule sintético reforzado con 15% de arena impregnada con adhesivo "C", hule sintético con una carga de sílica reforzado con 6% de arena impregnada con adhesivo "C" y hule natural reforzado con 15% de arena impregnada con adhesivo "W".

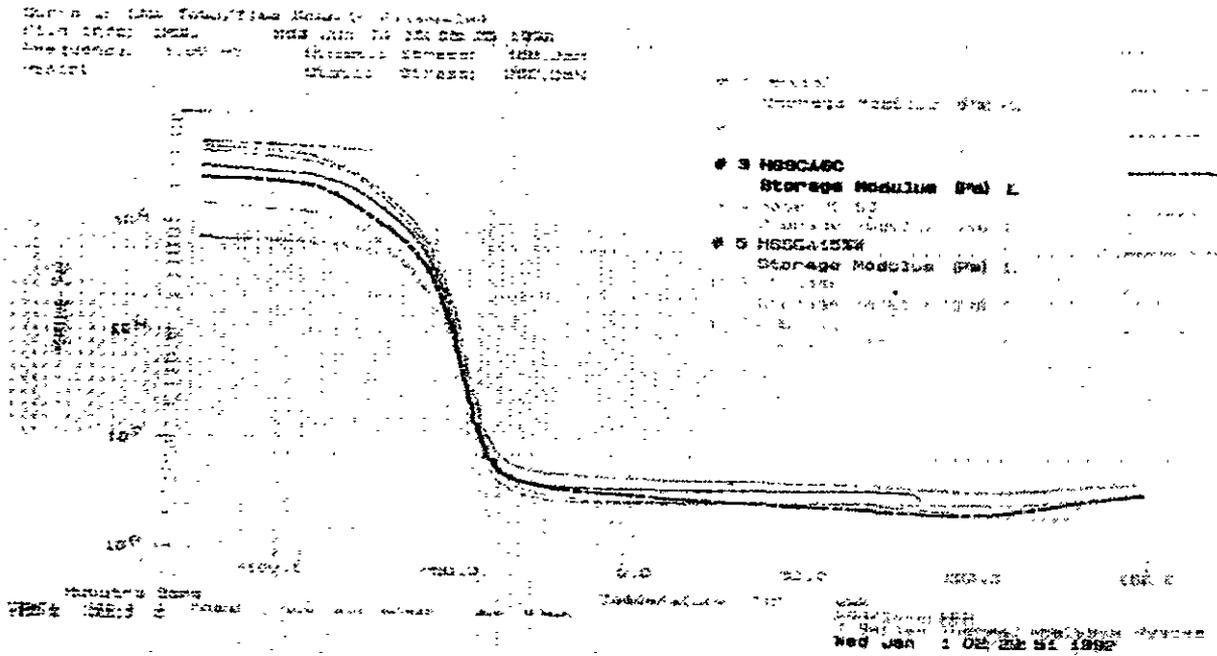


Fig. 4-11 Módulos de almacenamiento para los materiales de la figura anterior.

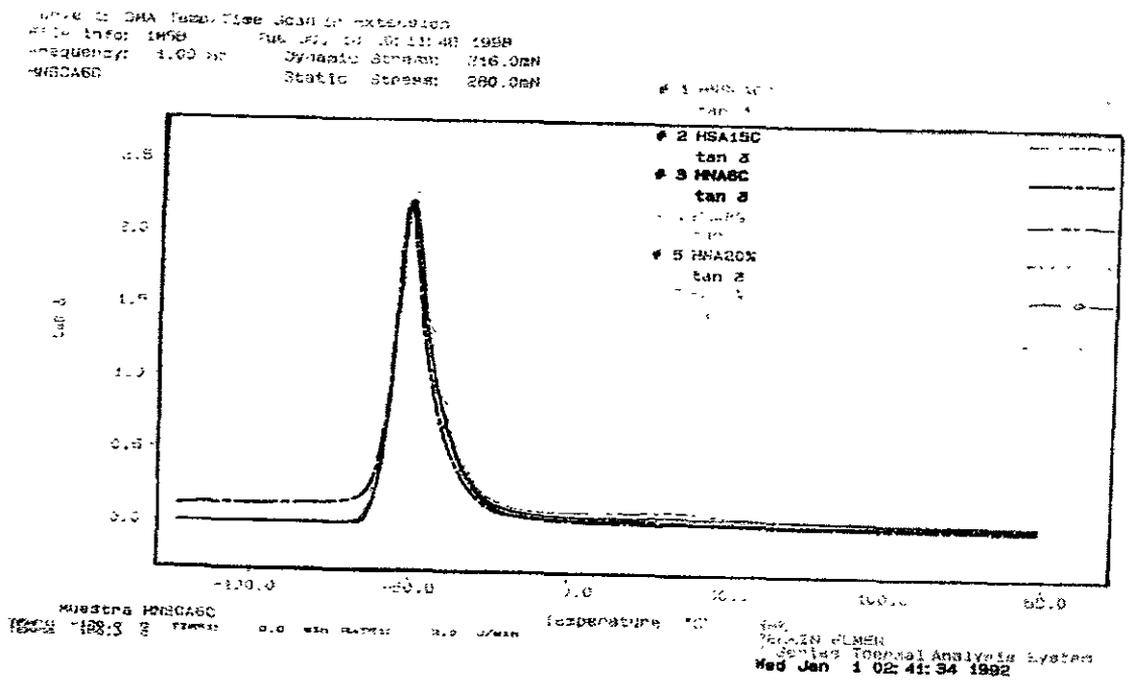


Fig. 4-12 Curvas de $\tan\delta$ para hule natural con una carga de sílica reforzado con 6% de arena impregnada con adhesivo "C", hule sintético reforzado con 15% de arena impregnada con adhesivo "C", hule natural reforzado con 6% de arena impregnada con adhesivo "C", hule natural reforzado con 6% de arena impregnada con adhesivo "W", hule natural reforzado con 8% de arena, hule natural reforzado con 20% de arena y hule natural reforzado con 6% de arena.

Sample ID: DPA Temp: Time Scan in Expansion
 File Info: HSL Wed Jun 24 15:08:25 1998
 Frequency: 1.00 Hz Dynamic Stress: 168.0mN
 DPA150 Static Stress: 202.0mN

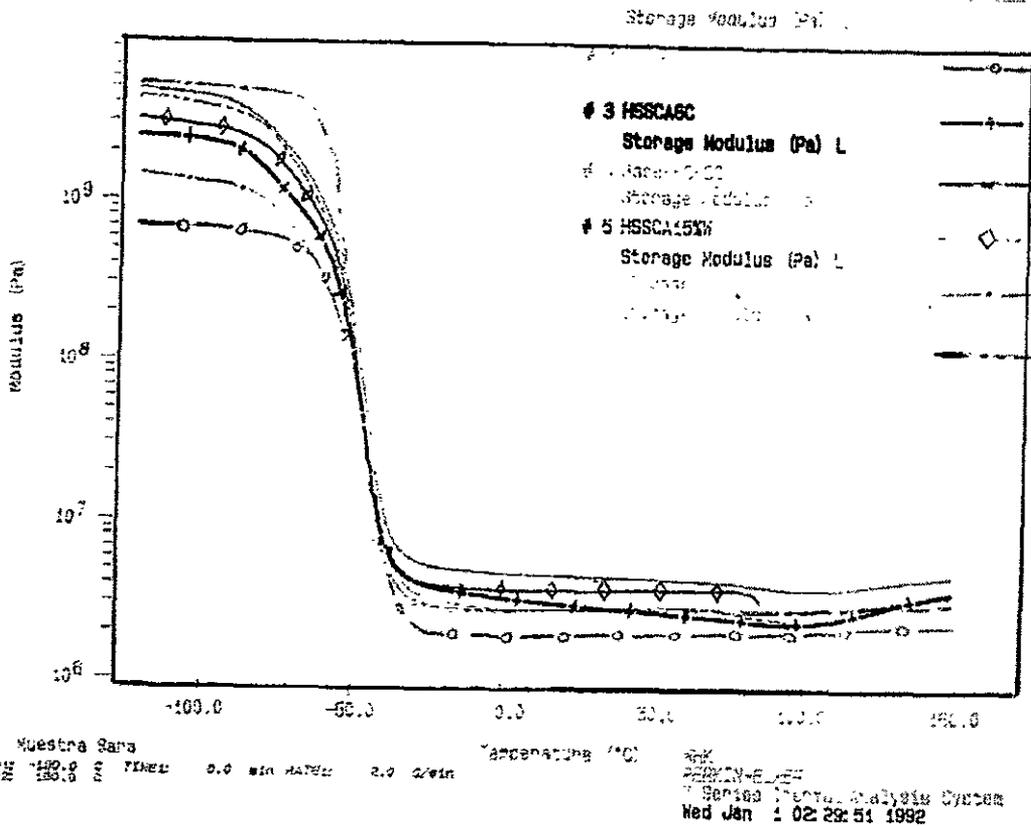


Fig. 4-13 Módulos de almacenamiento para los mismos materiales de la figura anterior.

4.2 Análisis termomecánico

A esta prueba se sometieron ocho diferentes materiales, dos hules y seis materiales compuestos. De la fig. 4-14 a 4-17 se presentan los resultados obtenidos para los materiales cuya matriz es el hule natural, y de la fig. 4-18 a la 4-21 los materiales que tienen una matriz de hule sintético. El rango de temperatura que se utilizó en todas las pruebas fue de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. El rango cubierto por la ordenada fue de -80 a $10\mu\text{m}$ con excepción de la prueba para el material compuesto por hule sintético y arena en que fue de -200 a $10\mu\text{m}$.

Sample: HN
Size: 1.7410 mm
Method: DETERMINACION TG
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: C:\SERCARTMA.125
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 2-Oct-96 12:01

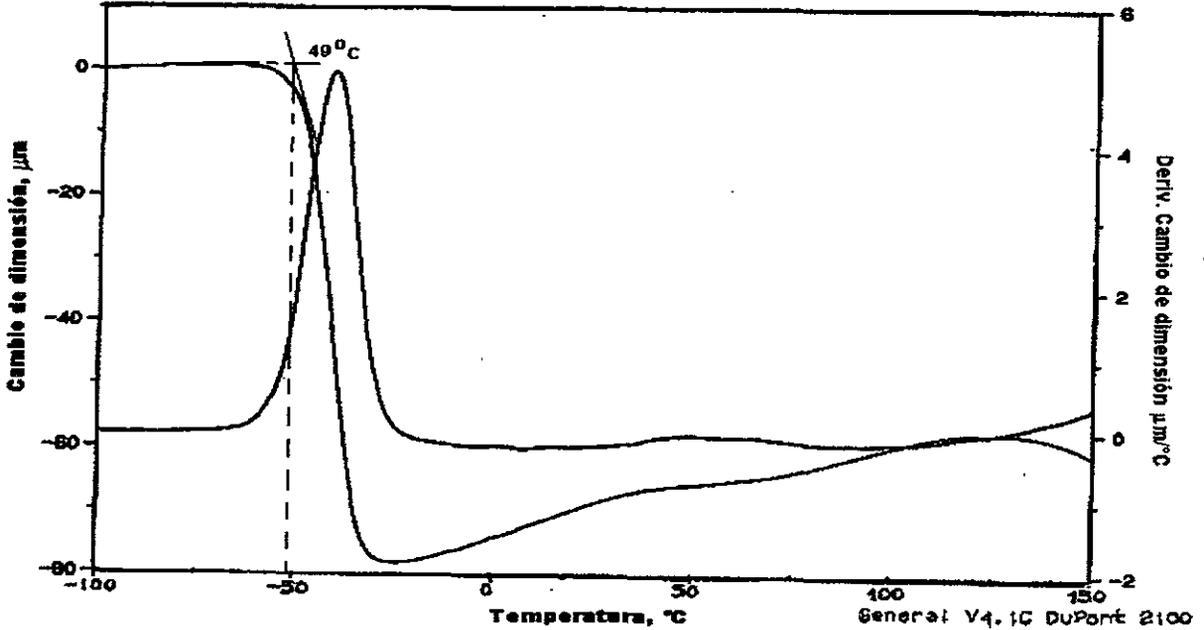


Fig. 4-14 Prueba de cambio de dimensión para el hule natural.

Sample: HNAG
Size: 1.7088 mm
Method: DETERMINACION TG
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: A:\SERCARTMA.124
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 2-Oct-96 11:01

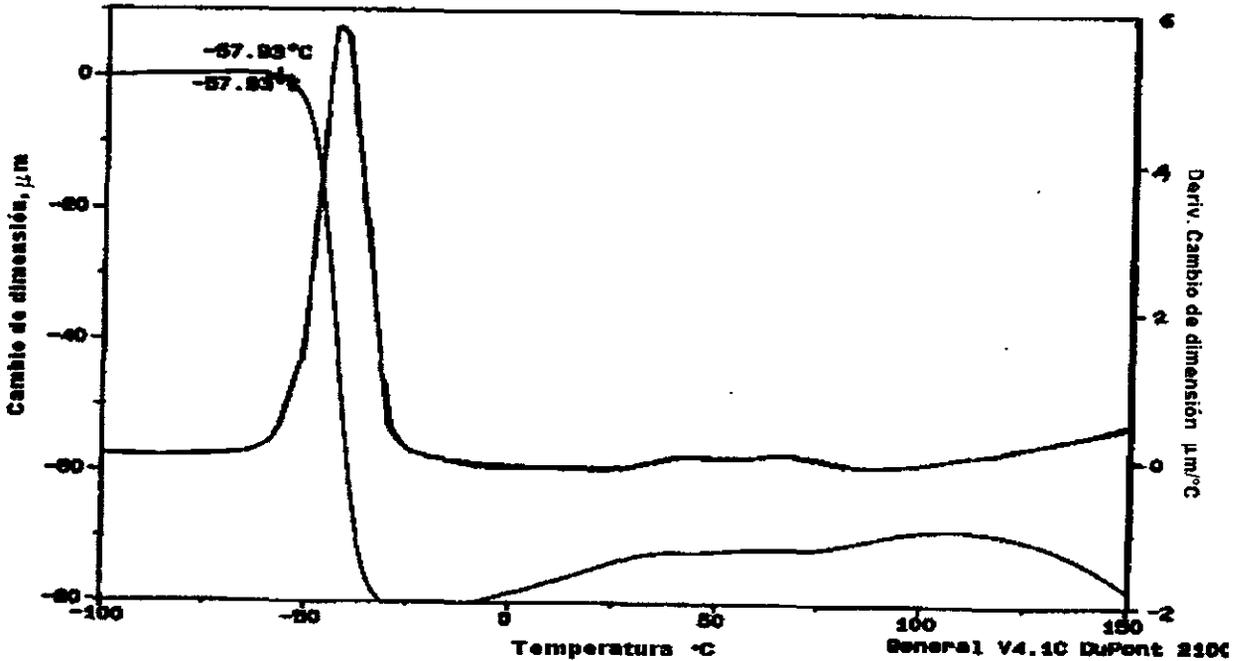


Fig. 4-15 Prueba de cambio de dimensión para el hule natural reforzado con 6% de arena.

Sample: HNFVA6
Size: 1.6508 mm
Method: DETERMINACION TG
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: A: SERCARTMA.122
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 2-Oct-88 09:12

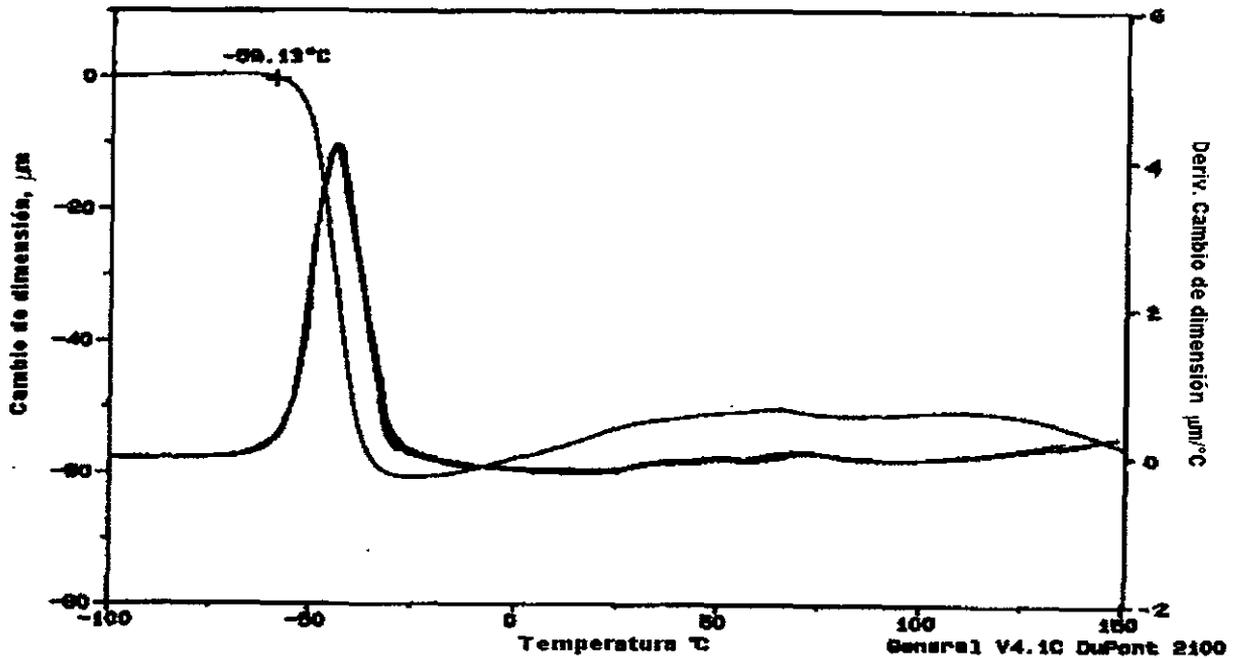


Fig. 4-16 Prueba de cambio de dimensión para un hule natural reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena.

Sample: HNFCA6
Size: 1.6503 mm
Method: DETERMINACION TG
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: C: SERCARTMA.123
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 2-Oct-88 09:51

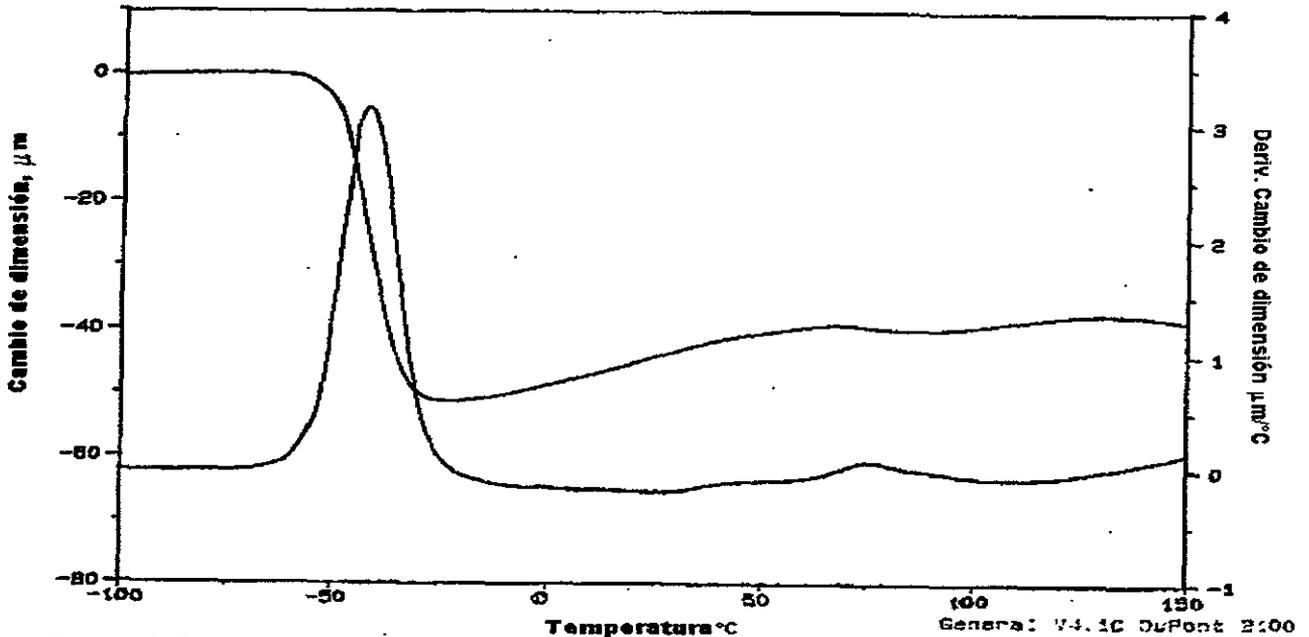


Fig. 4-17 Prueba de cambio de dimensión para un hule natural reforzado con 6% de fibra de carbono y 6% de arena.

Sample: HS
 Size: 1.6325 mm
 Method: DETERMINACION TG
 Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: C:\SERCARTMA.119
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 1-Oct-96 12:38

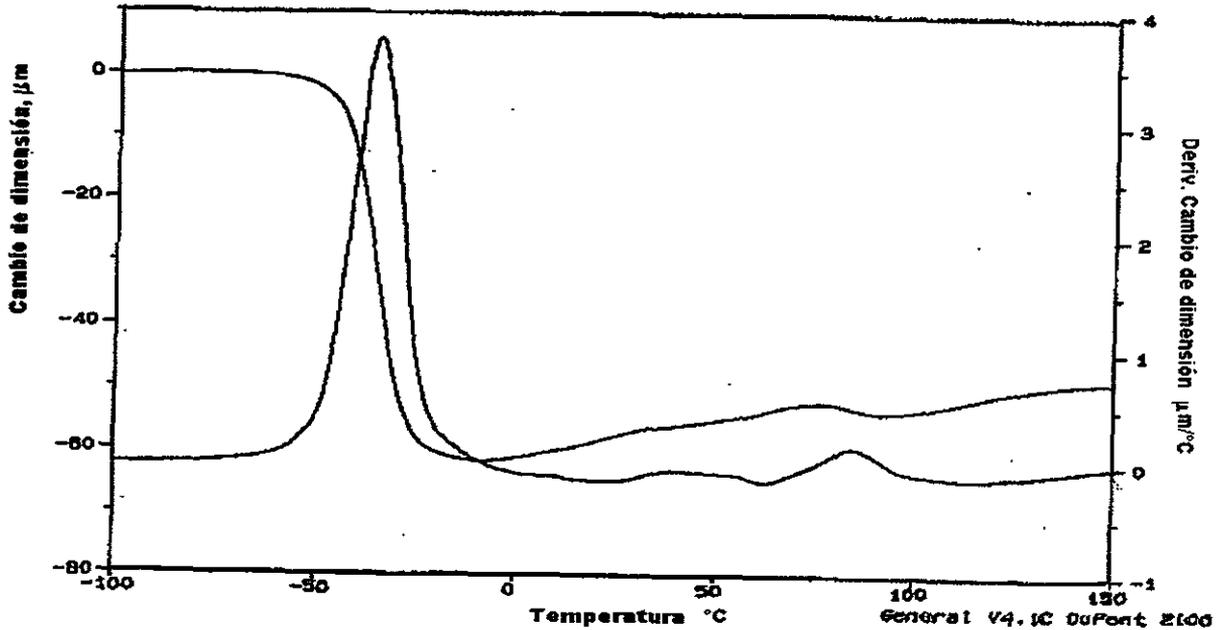


Fig. 4-18 Prueba de cambio de dimensión para el hule sintético.

Sample: HSAG
 Size: 1.8662 mm
 Method: DETERMINACION TG
 Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: C:\SERCARTMA.116
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 1-Oct-96 09:12

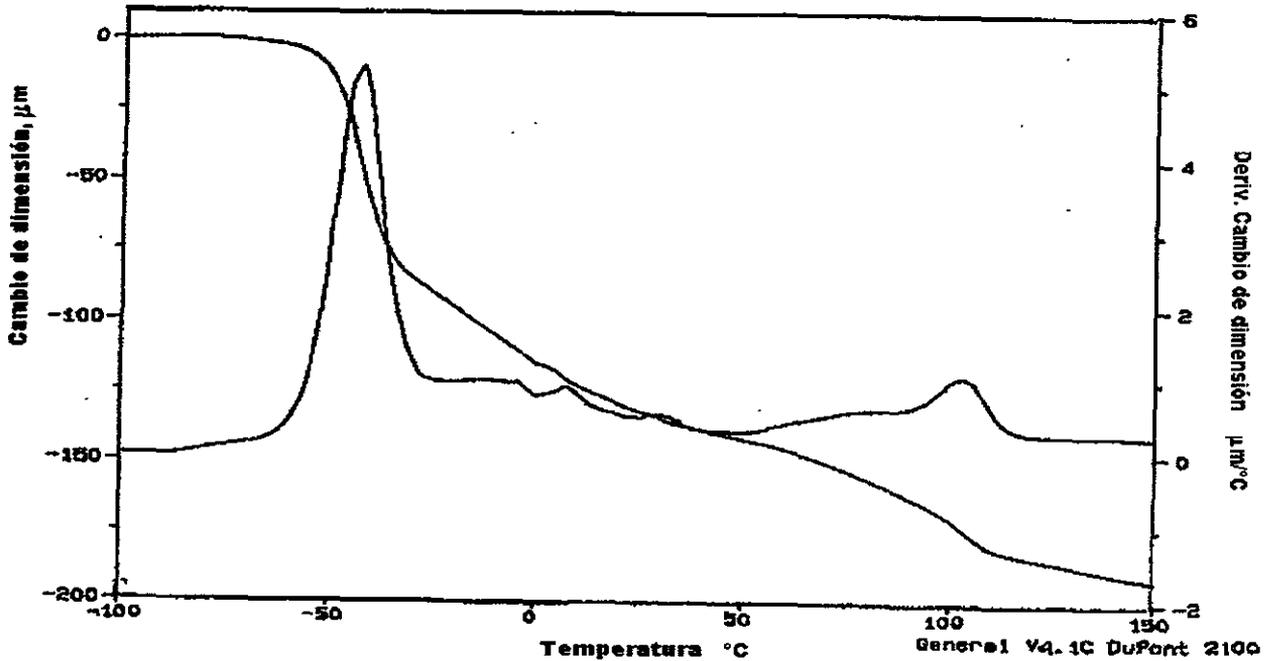


Fig. 4-19 Prueba de cambio de dimensión para el hule sintético reforzado con 6% de arena

Sample: HSFVAG
Size: 1.8184 mm
Method: DETERMINACION TG
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: A: SERCARTMA.121
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 2-Oct-96 08:28

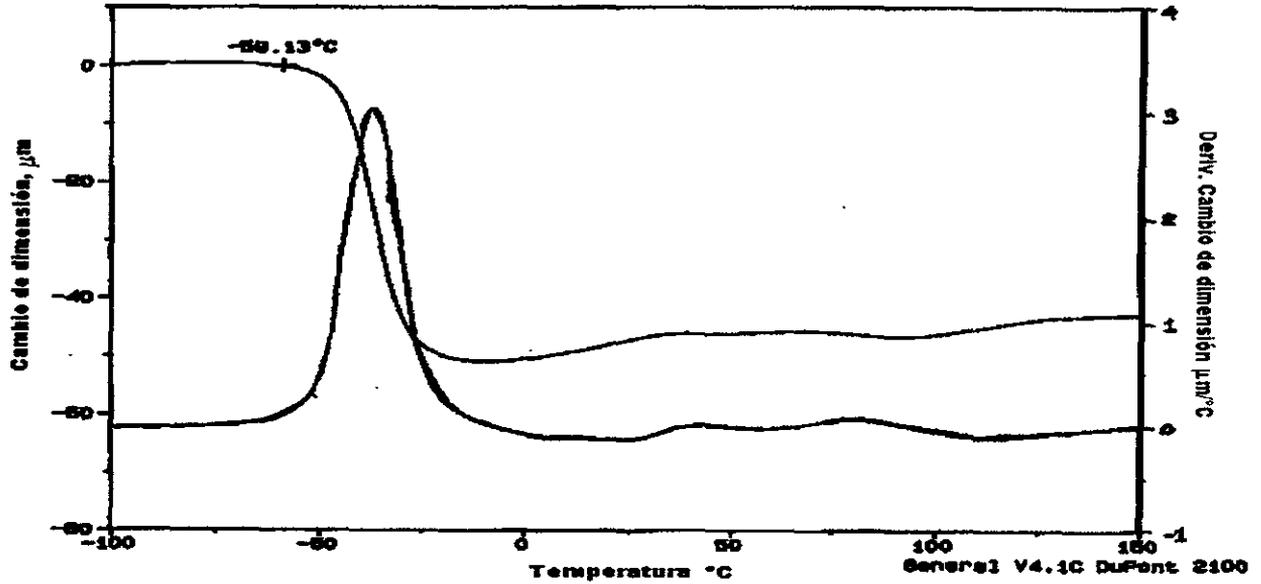


Fig. 4-20 Prueba de cambio de dimensión para el hule sintético reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena.

Sample: HSFCA6
Size: 1.6534 mm
Method: DETERMINACION TG
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL 10°C/MIN 1 Newton de fuerza

TMA

File: C: SERCARTMA.120
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 2-Oct-96 07:37

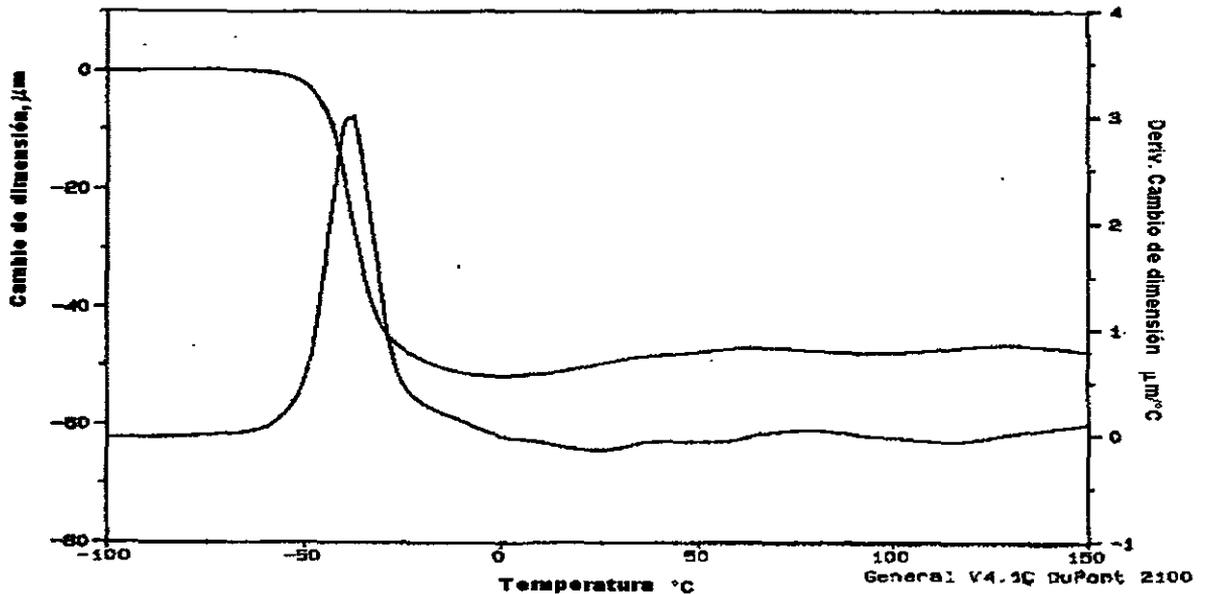


Fig. 4-21 Prueba de cambio de dimensión para el hule sintético reforzado con 6% de fibra de carbono y 6% de arena.

4.3 Análisis dieléctrico

Esta prueba se aplicó a cuatro materiales: HN, HNFVA6, HS, HSFVA6. Las pruebas se realizaron a las siguientes frecuencias: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 60, 200 y 1000 Hz. El rango de temperaturas fue el mismo para todas las pruebas: de -100° C a 150° C. La rapidez de calentamiento fue de 2 grados por minuto. Mediante éstas pruebas se obtienen datos de $\tan\delta_d$ y permitividad, sin embargo solo se presentan los resultados de $\tan\delta_d$ debido a que los de permitividad no se pudieron relacionar con los resultados de las pruebas mecánicas de interés para esta tesis.

Los materiales que tienen una matriz de hule natural se encuentran en las figs. 4-22 a 4-37 y los que tienen una matriz de hule sintético en las figs. 4-38 a 4-50.

Sample : HULE NATURAL
Size : 1.682 mm
Method : SARA
Comment: ATM DE AIRE

DEA

File : A: SARAHUMAC.013
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 8-Oct-96 07:11

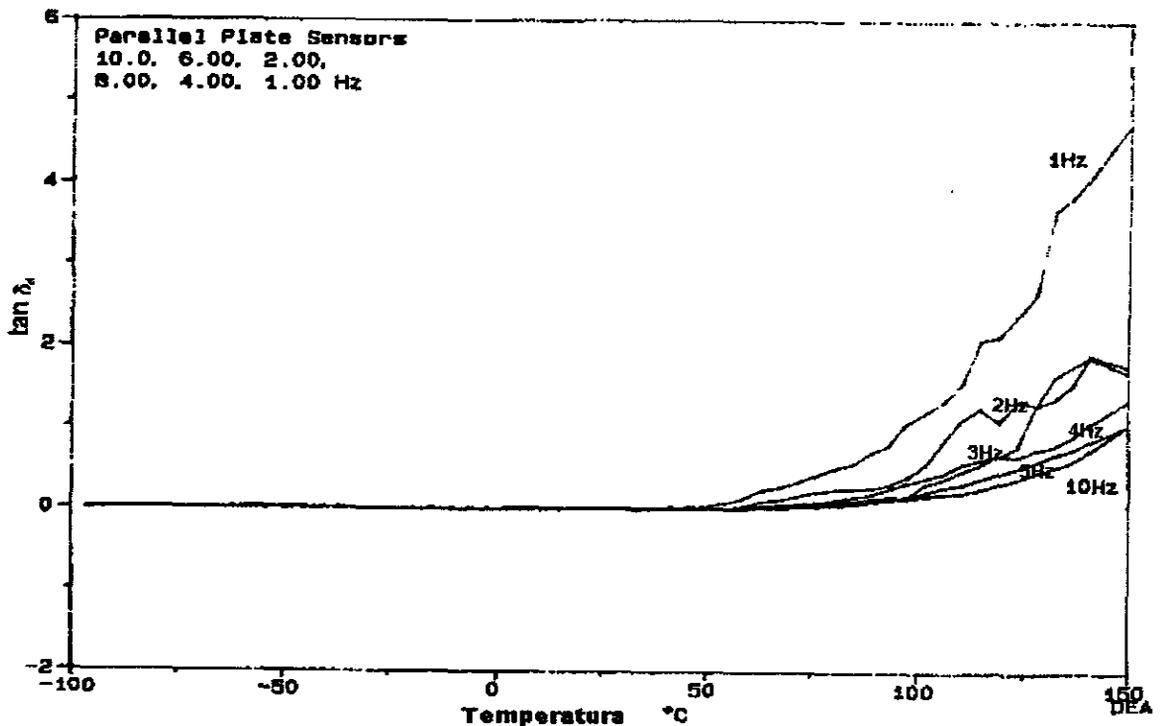


Fig. 4-22 Curvas de $\tan\delta_d$ a las frecuencias desde 1Hz hasta 10Hz para el hule natural.

Sample : HULE NATURAL
 Size : 1.682 mm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : C: SARAHUMAC.013
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 8-Oct-96 07: 11

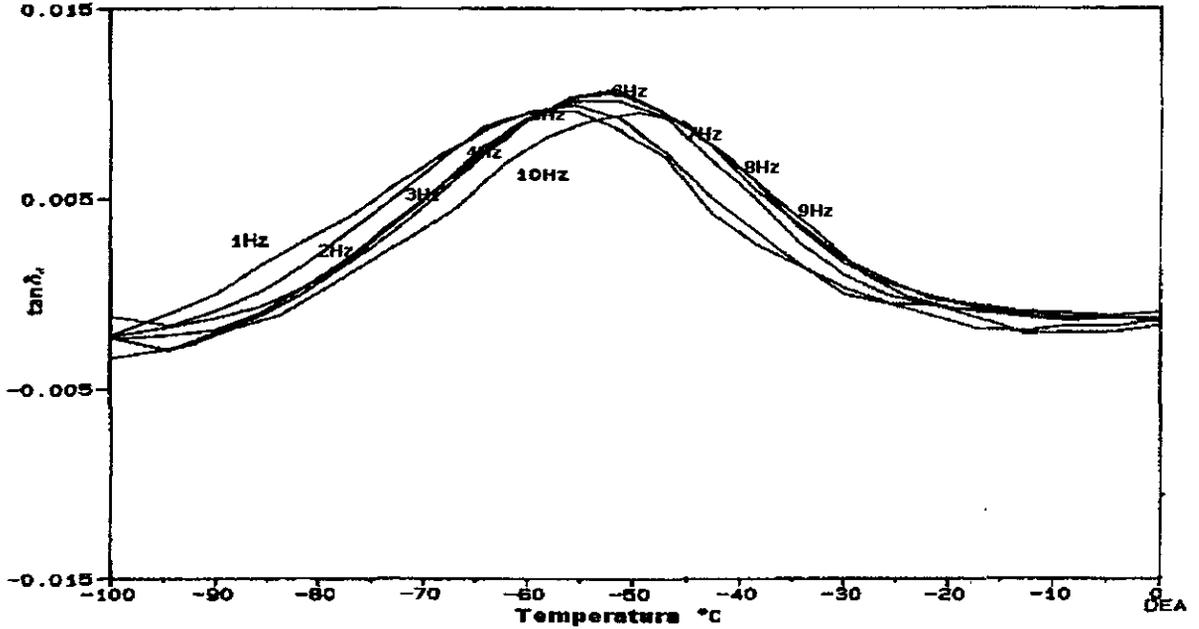


Fig. 4-23 Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el hule natural en el rango de -100°C a 0°C .

Sample : HNFVAG
 Size : 1.599 mm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : A: SARAHUMAC.012
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 7-Oct-96 08: 17

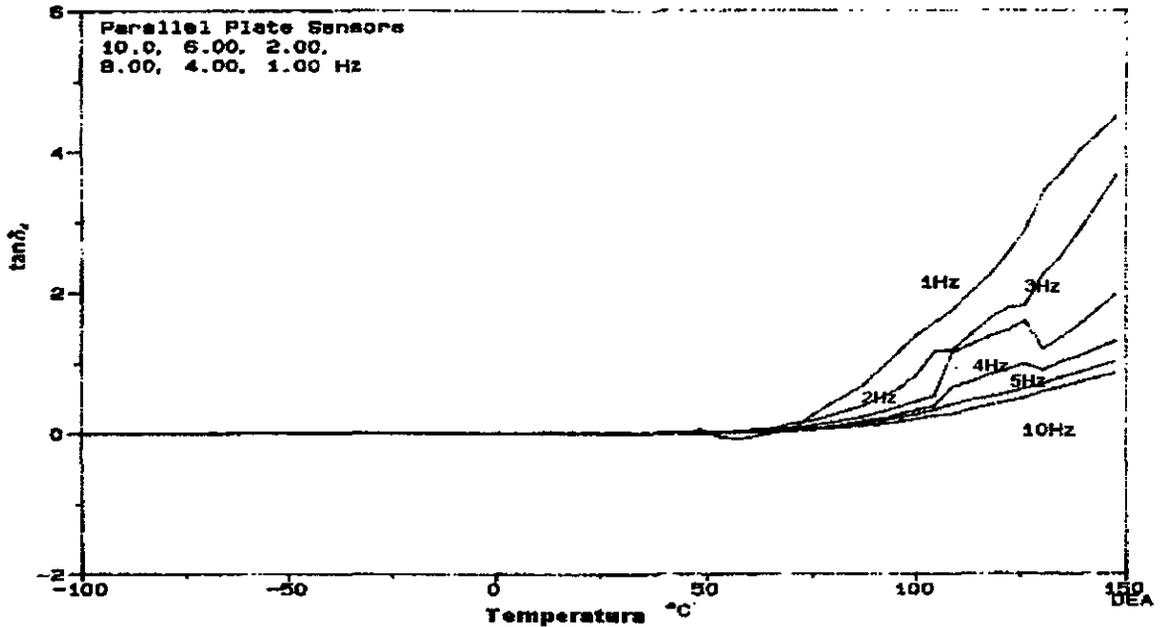


Fig. 4-24 Curvas de $\tan\delta_d$ para el hule natural reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena a las frecuencias desde 1Hz hasta 10Hz.

Sample : HNFVAG
Size : 1.599 mm
Method : SARA
Comment: ATM DE AIRE

DEA

File : C: SARAHUMAC.012
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 7-Oct-96 08:17

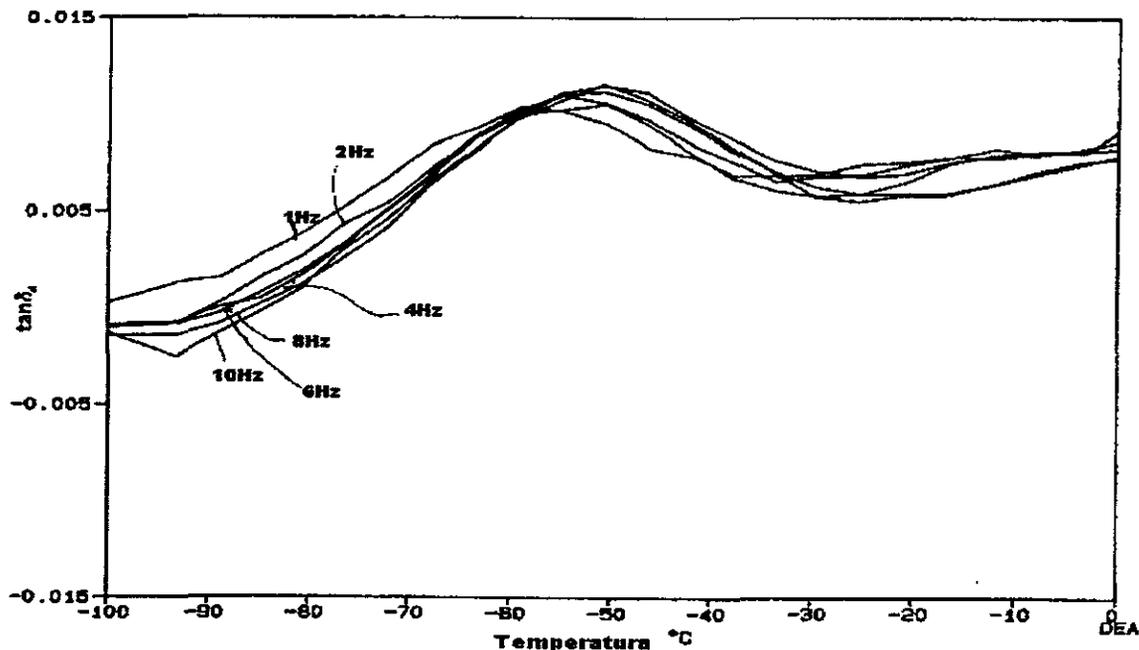


Fig. 4-25 Detalle de las curvas de $\tan \delta_d$ para el hule natural reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena en el rango de -100°C a 0°C .

Sample : HULE NATURAL
Size : 1.882 mm
Method : SARA
Comment: ATM DE AIRE

DEA

File : A: SARAHUMAC.013
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 8-Oct-96 07:11

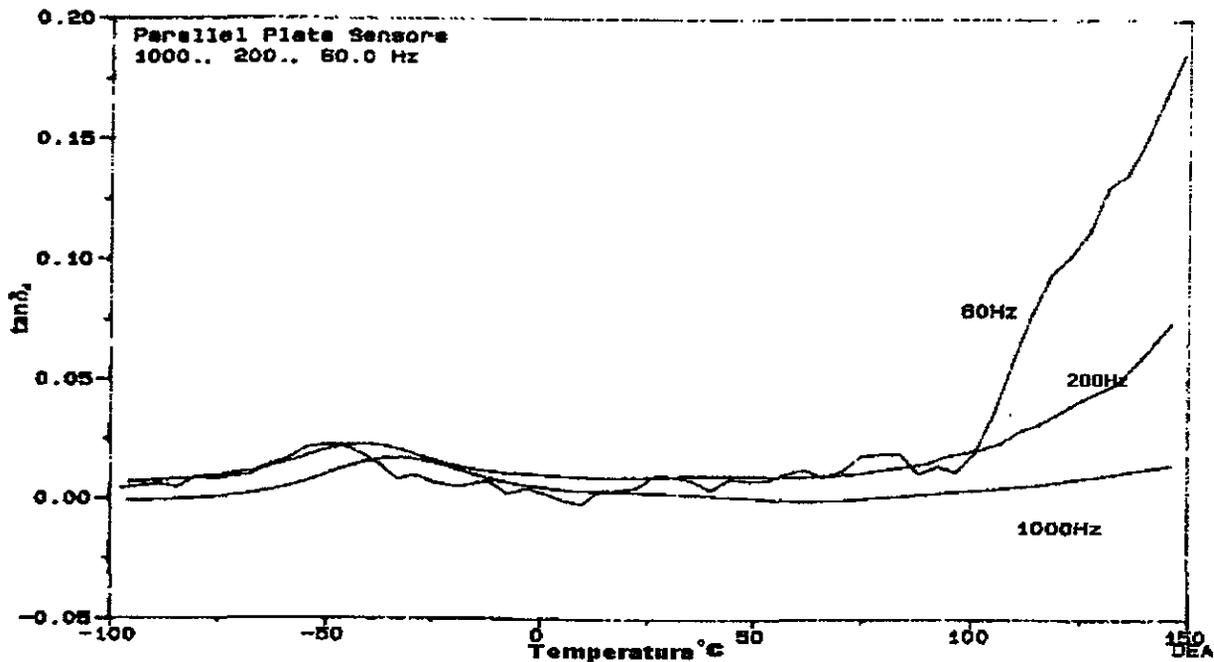


Fig. 4-26 Curvas de $\tan \delta_d$ para el hule natural a las frecuencias de 60 Hz, 200 Hz y 1000 Hz.

Sample : HULE NATURAL
Size : 1.682 mm
Method : SARA
Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : C: SARAHUMAC.013
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 8-Oct-98 07: 11

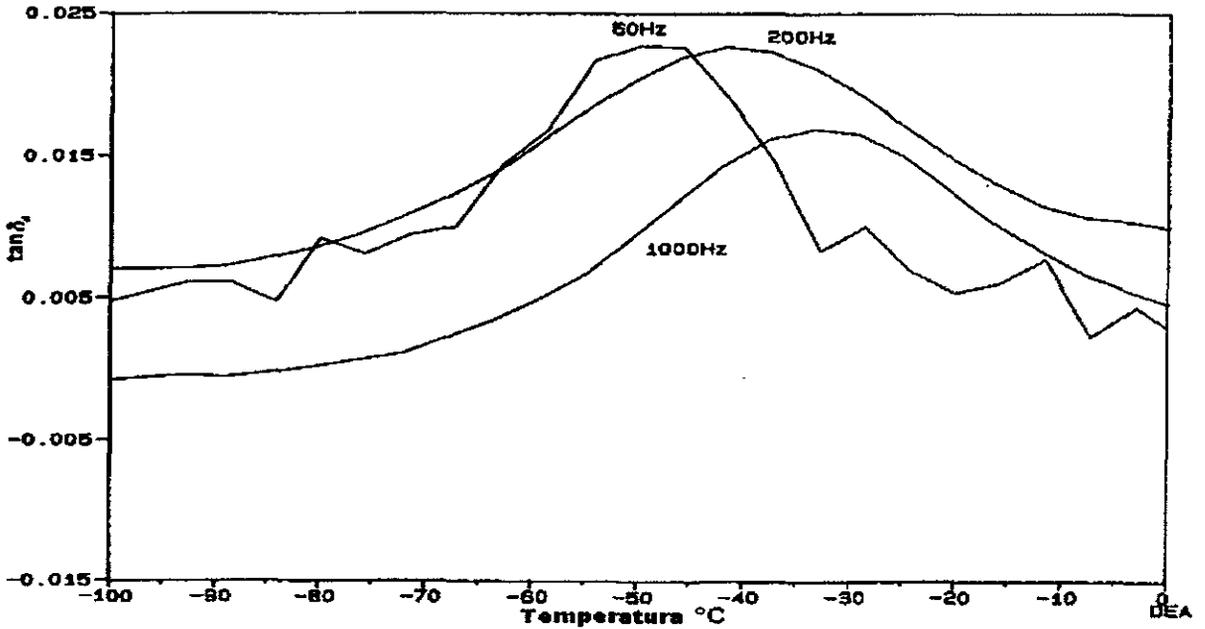


Fig. 4-27 Detalle de las curvas de $\tan \delta_d$ para el hule natural entre -100°C y 0°C .

Sample : HNFVA6
Size : 1.599 mm
Method : SARA
Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : A: SARAHUMAC.012
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 7-Oct-98 08: 17

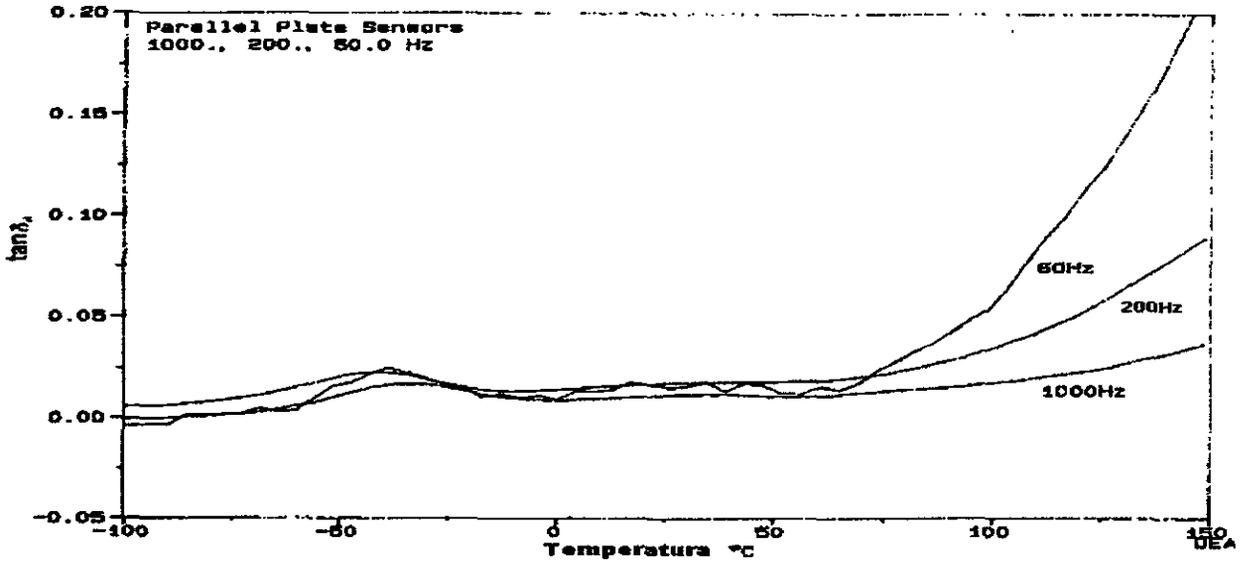


Fig. 4-28 Curvas de $\tan \delta_d$ obtenidas para el hule natural reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena a 60 Hz, 200 Hz y 1000 Hz.

Sample : HNFVAG
 Size : 1.599 cm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : C: SARAHUMAC.012
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 7-Oct-98 08:17

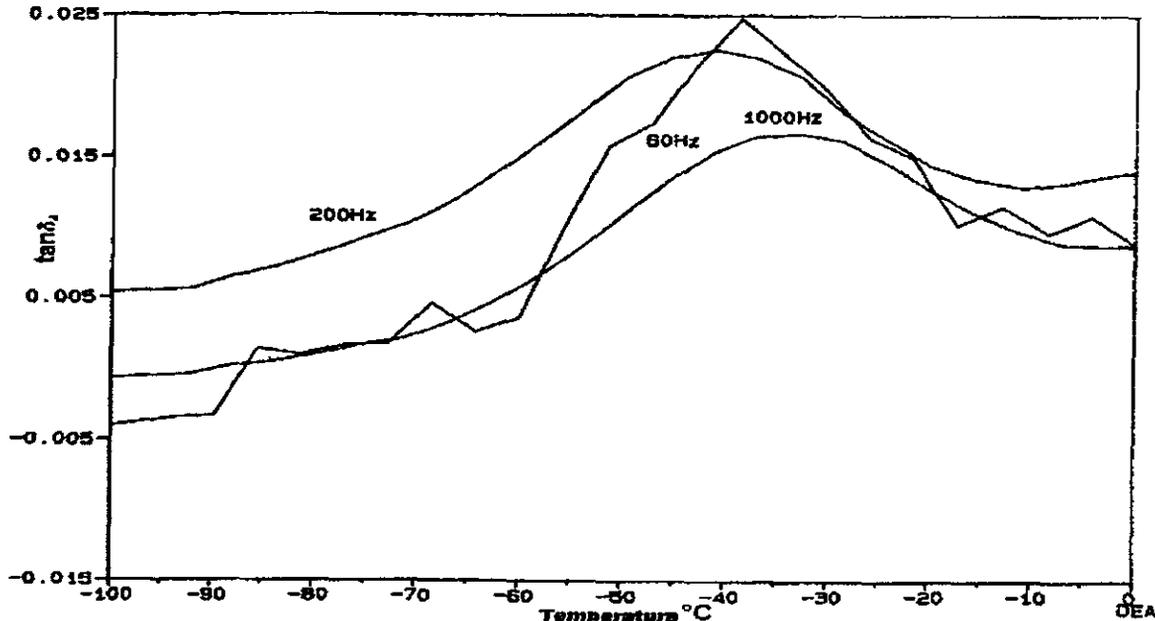


Fig. 4-29 Detalle de las curvas de $\tan \delta_d$ para el hule natural reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena en el rango de -100°C a 0°C .

Sample : HS
 Size : 1.537 mm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : C: SARAHUMAC.016
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 15-Oct-98 08:23

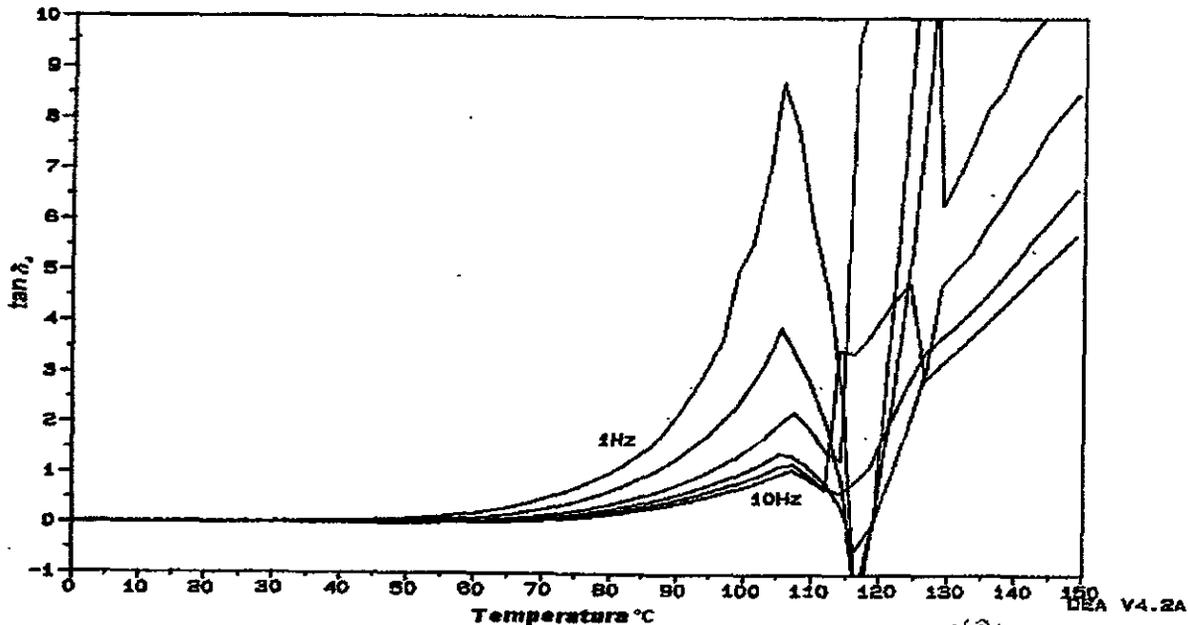


Fig. 4-30 Curvas de $\tan \delta_d$ para el hule sintético en las frecuencias de 1Hz hasta 10 Hz.

Sample : HS
 Size : 1.637 mm
 Method : SARA
 Comment: ATM DE AIRE

DEA

File : C: SARAHUMAC.015
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 15-Oct-85 08:23

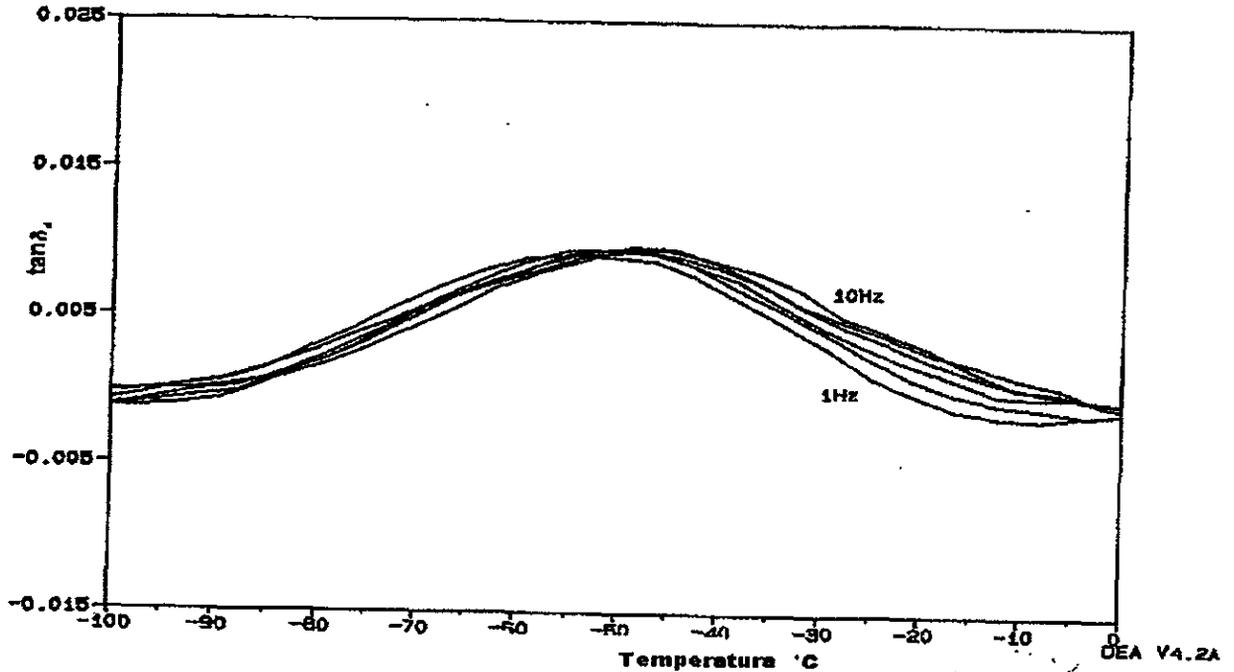


Fig. 4-31 Detalle de las curvas de $\tan\delta_d$ para el HS en el rango de -100°C a 0°C .

Sample : HEPYAG
 Size : 1.629 mm
 Method : SARA
 Comment: ATM DE AIRE

DEA

File : A: SARAHUMAC.015
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 8-Oct-85 08:41

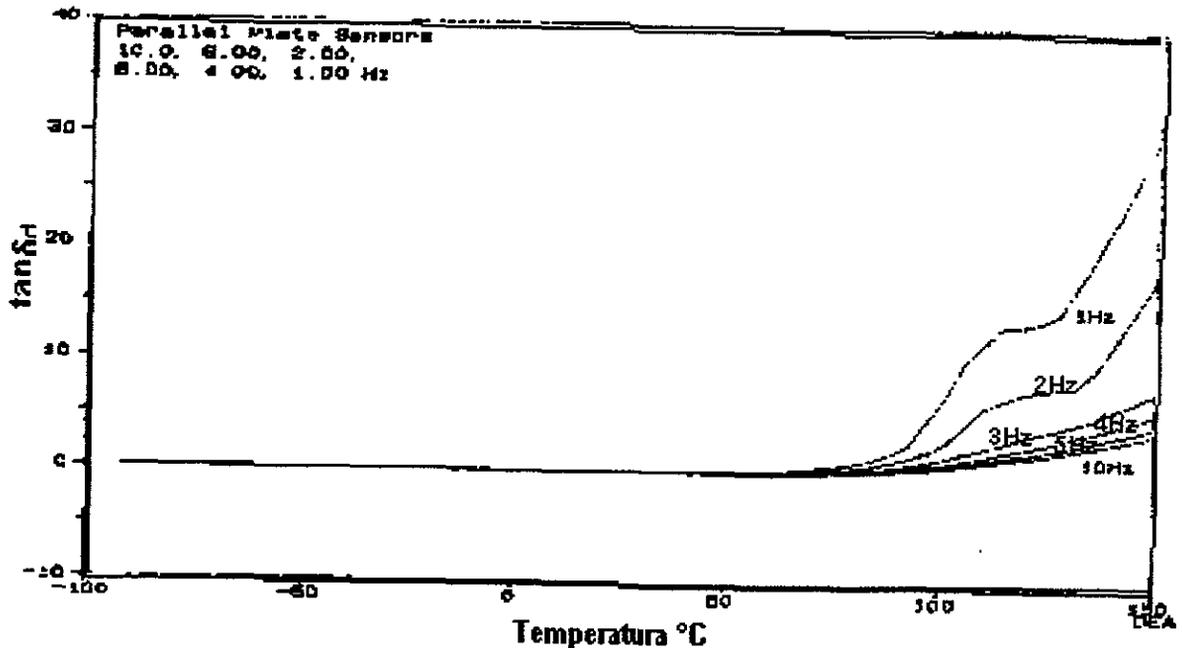


Fig. 4-32 Curvas de $\tan\delta_d$ para el hule sintético reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena en las frecuencias de 1Hz hasta 10 Hz.

Sample : HSFYAS
 Size : 1.023 mm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : C:\SARAHUMAC.016
 Operator : M.A. CANSECO
 Run Date : 9-Oct-98 08:45

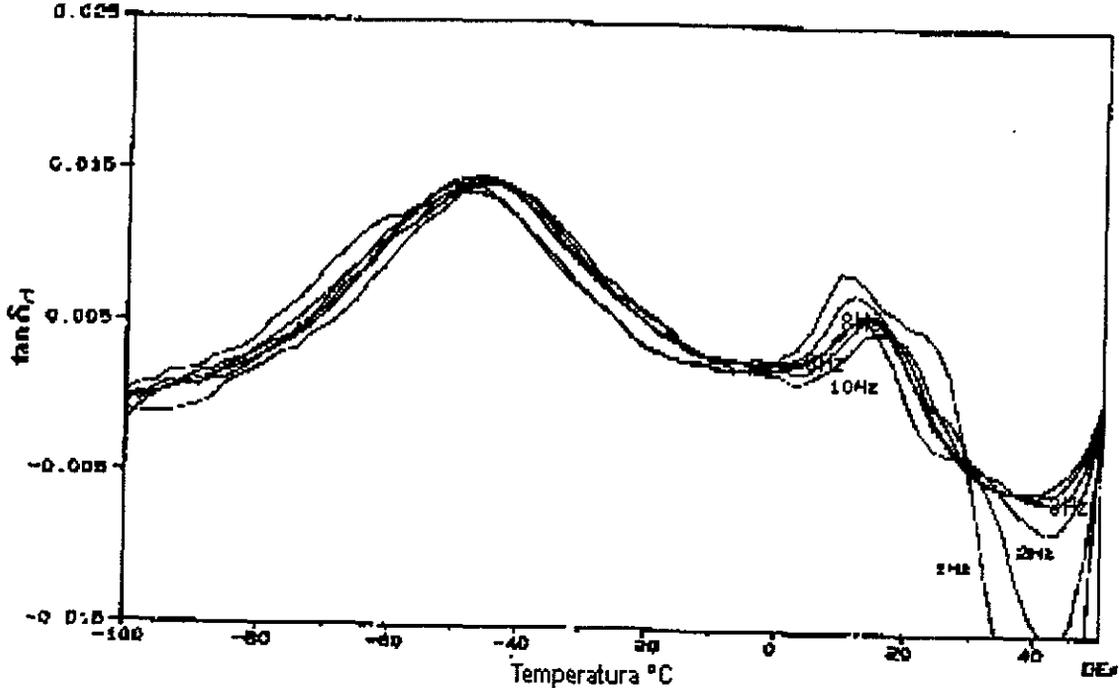


Fig. 4-33 Detalle de las curvas de $\tan \delta_d$ para el HS reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena en el rango de -100°C a 50°C .

Sample : HS
 Size : 1.837 mm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : A:\SARAHUMAC.016
 Operator : M.A. CANSECO
 Run Date : 15-Oct-96 08:23

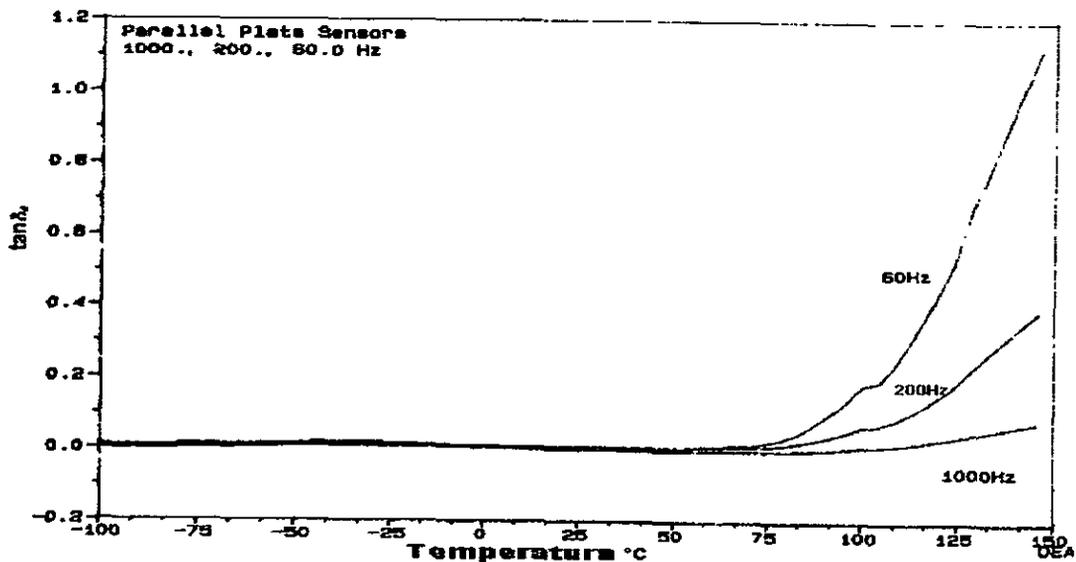


Fig. 4-34 Curvas de $\tan \delta_d$ para el hule sintético obtenidas a 60Hz, 200 Hz y 1000 Hz.

Sample : H5
 Size : 1.637 mm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : C:\SARAHMAC.015
 Operator : M.A. CANEDO
 Run Date : 18-Oct-88 08:29

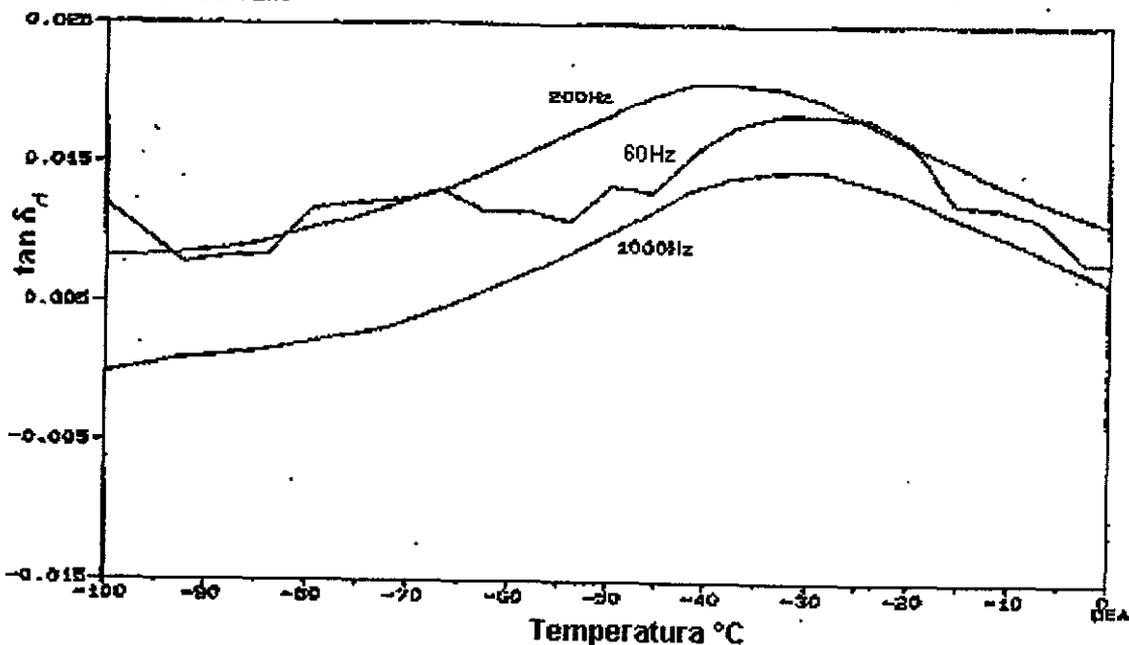


Fig. 4-35 Detalle de las curvas de $\tan \delta_d$ de la figura anterior para el HS en el rango de -100°C a 0°C .

Sample : H5FVAC
 Size : 1.633 mm
 Method : SARA
 Comment : ATM DE AIRE

DEA

File : A:\SARAHMAC.015
 Operator : M.A. CANEDO
 Run Date : 9-Oct-88 02:45

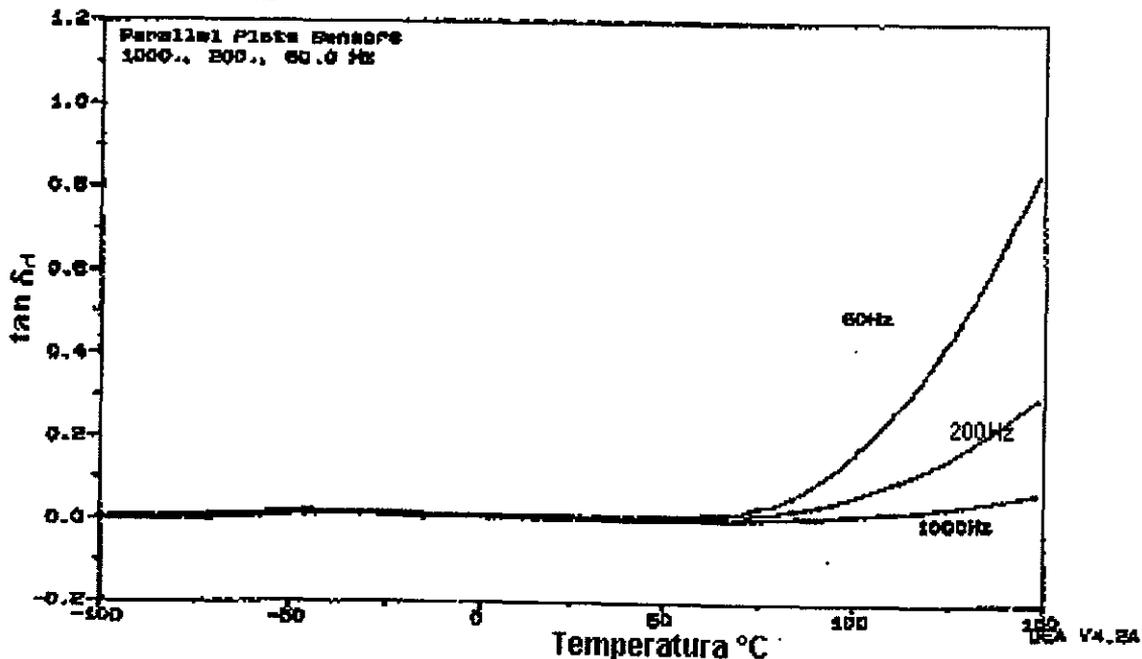


Fig. 4-36 Curvas de $\tan \delta_d$ para el hule sintético reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena a 60 Hz, 200 Hz y 1000 Hz.

4.4 Análisis termogravimétrico

Esta prueba se realizó sólo en un material compuesto por una matriz de hule sintético y 6% de fibra de vidrio. Se utilizó una rapidez de calentamiento de 10° C/min. y el rango de temperatura fue de 0° C a 600° C. La fig. 4-37 muestra el resultado obtenido.

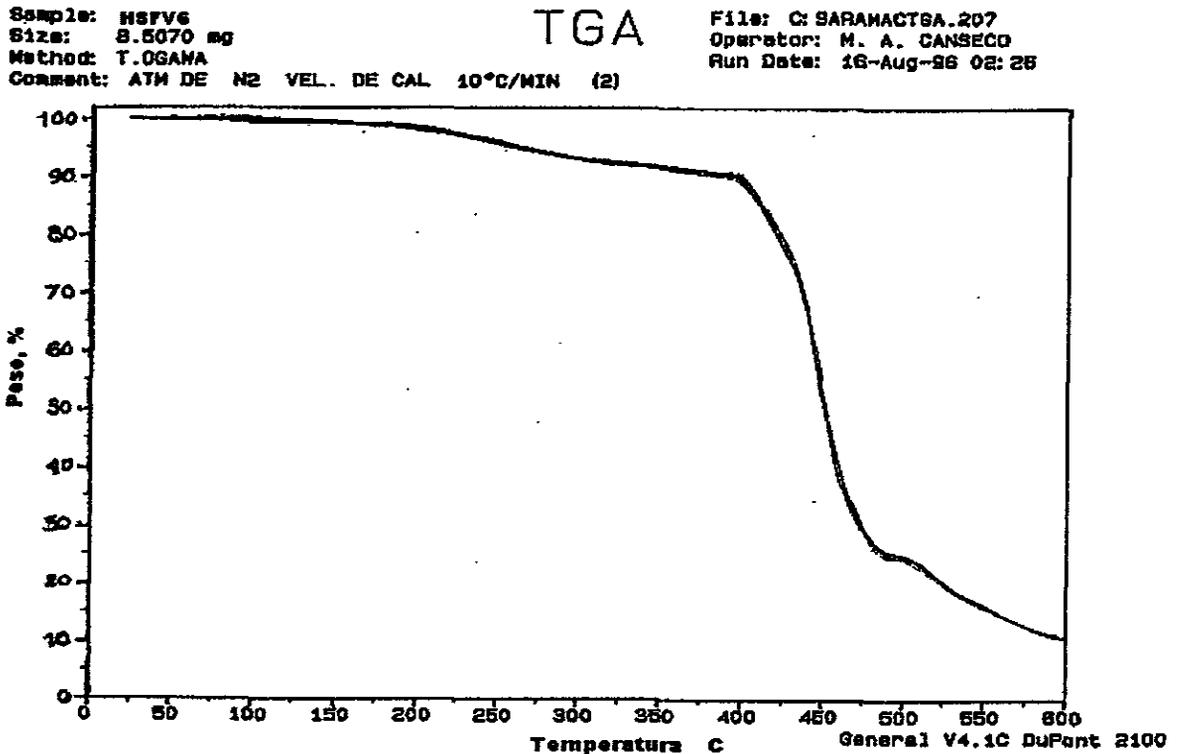


Fig. 4-37 Análisis termogravimétrico efectuado en el hule sintético reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena.

4.5 Prueba de tensión

Los resultados de esta prueba se presentan en las figuras 4-38 a 4-45 y en la tabla 4-1. Éstos se dividieron según el tipo de matriz con que se fabricaron los materiales compuestos; HN, HNS, HS, HSS, L y LS. En cada gráfica se especifica el tipo de matriz y de refuerzo que se usó y si éste fue impregnado con algún adhesivo. Las mediciones presentadas en estas gráficas presentaron poca dispersión obteniéndose una desviación estándar de hasta 1.51MPa.

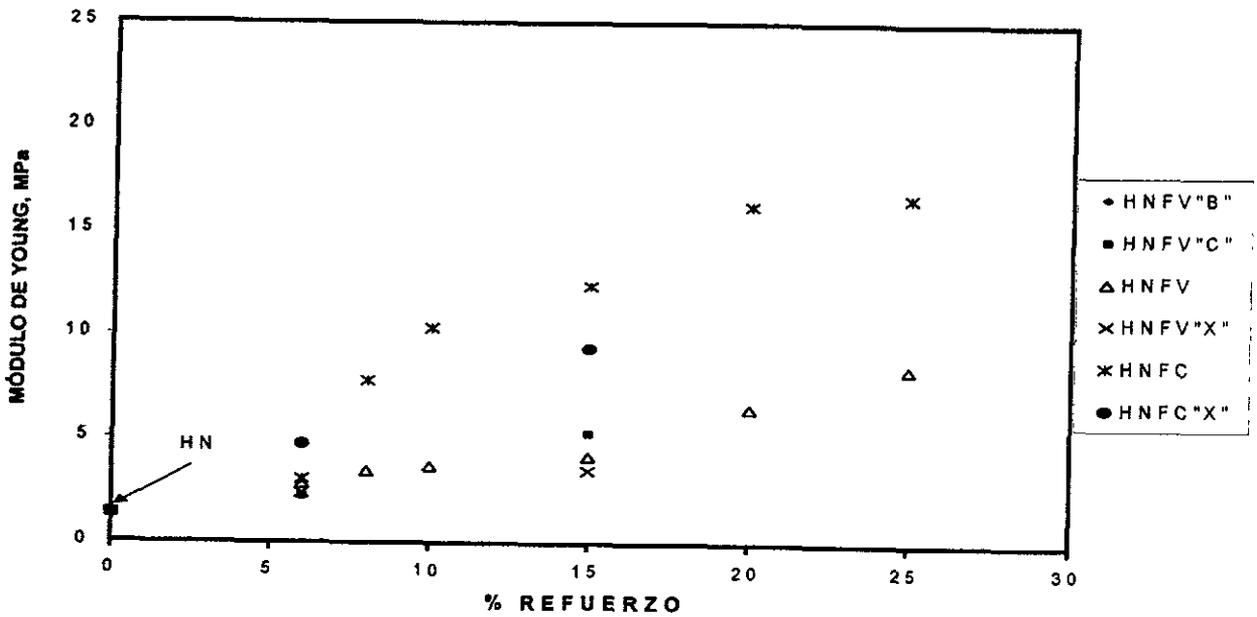


Fig. 4-38 Prueba de tensión en materiales compuestos cuya matriz es el hule natural. Los materiales de refuerzo utilizados son: fibra de vidrio y fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

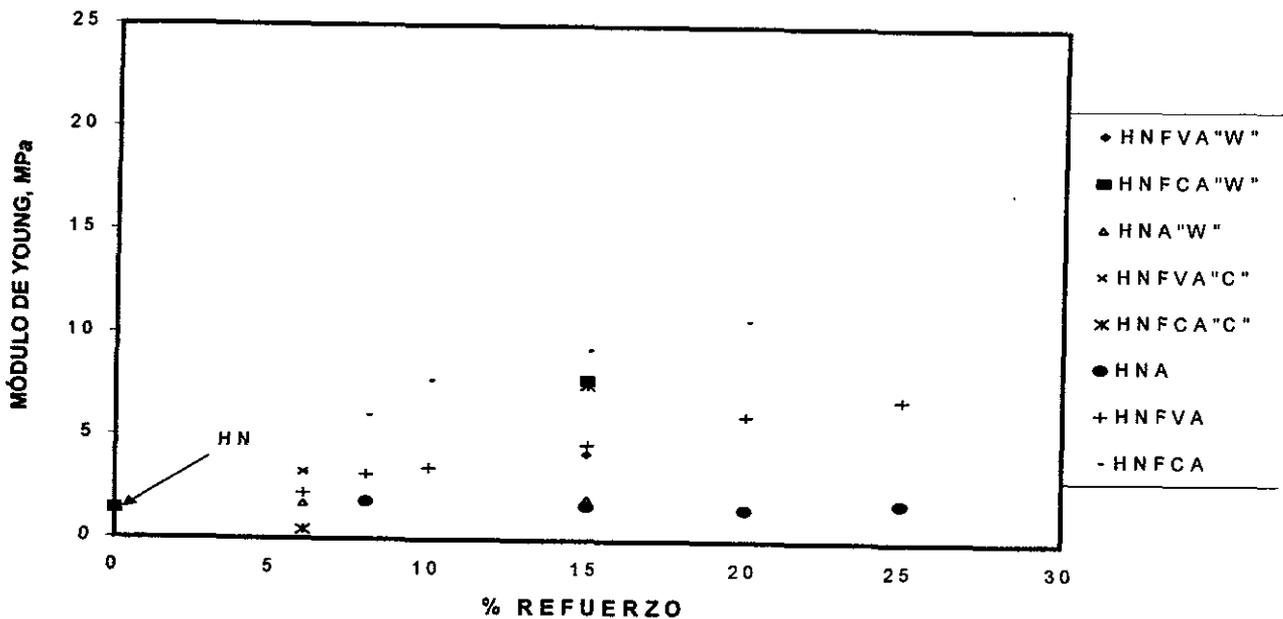


Fig. 4-39 Prueba de tensión en materiales que tienen una matriz de hule natural. El material de refuerzo se formó con arena, arena combinada con fibras de vidrio y arena combinada con fibras de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

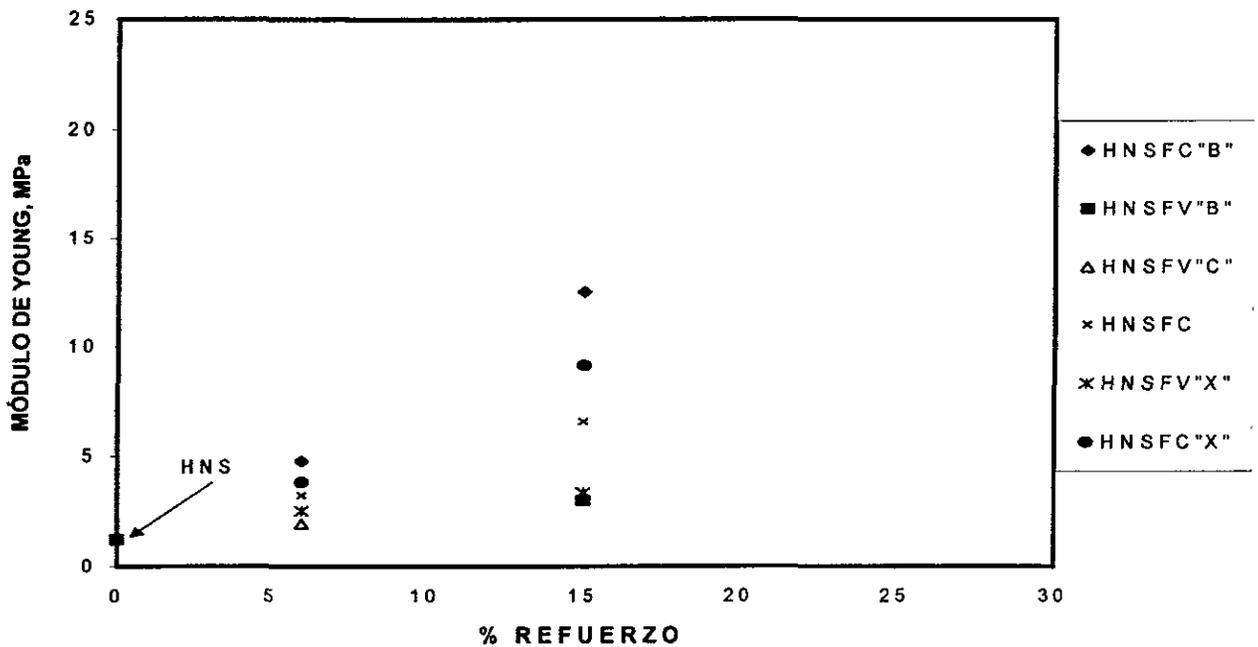


Fig. 4-40 Prueba de tensión en materiales que tienen una matriz de hule natural con una carga de sílica. Se utilizaron fibras de vidrio y fibras de carbono como material de refuerzo. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

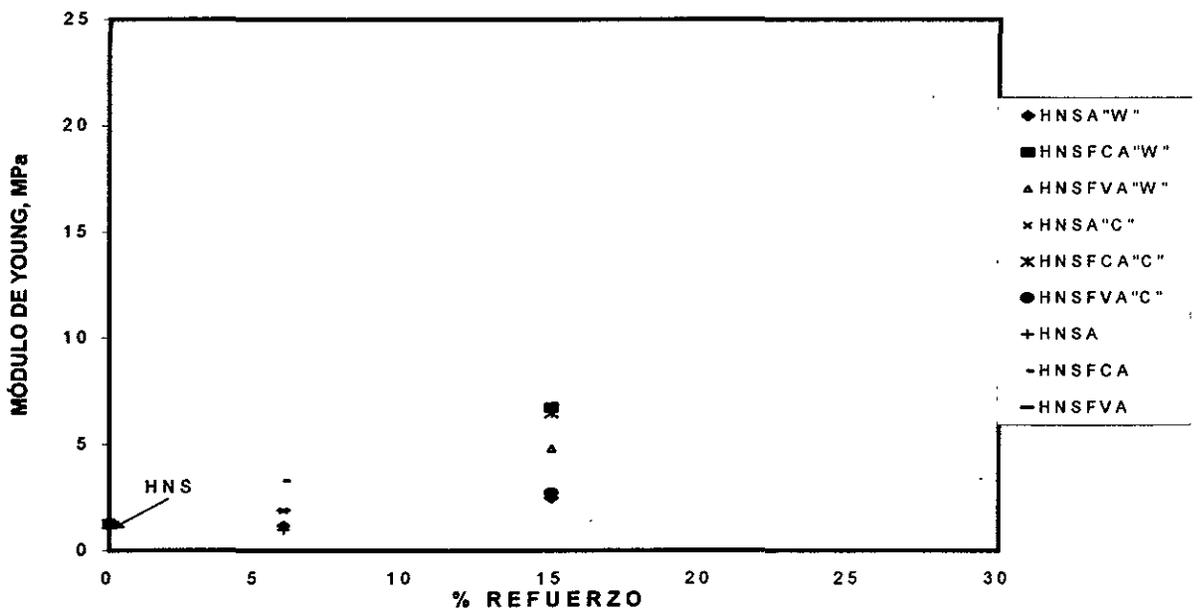


Fig. 4-41 Prueba de tensión en materiales compuestos cuya matriz es hule natural con una carga de sílica. Los materiales de refuerzo utilizados son arena, arena combinada con fibra de vidrio y arena combinada con fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

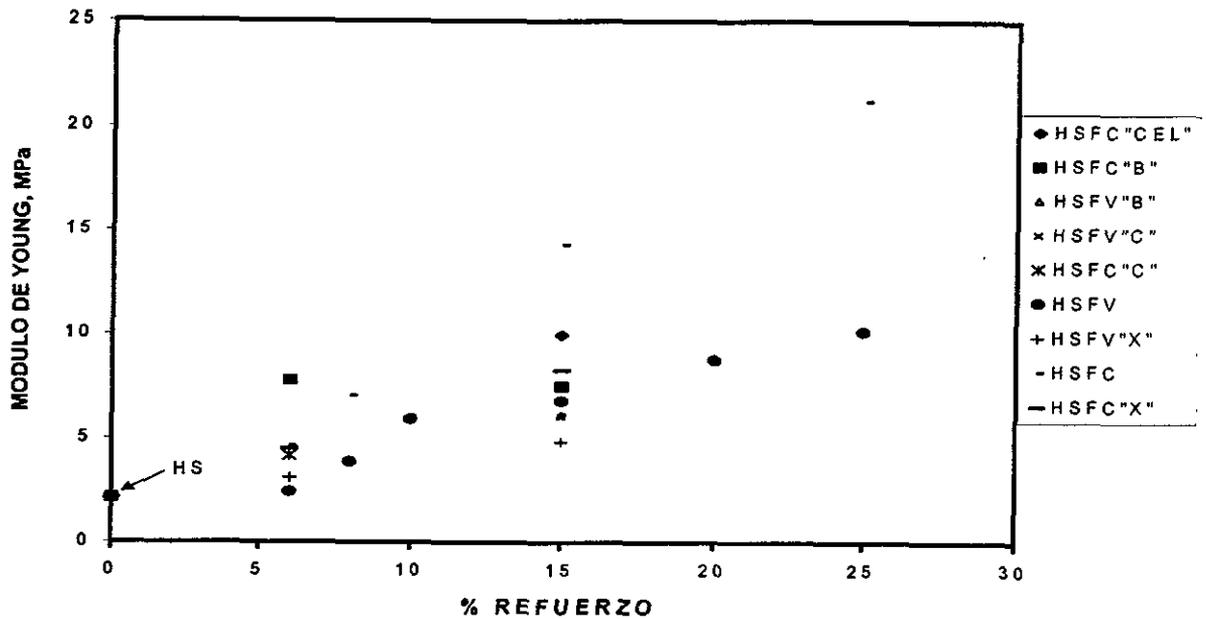


Fig. 4-42 Prueba de tensión en materiales compuestos cuya matriz es hule sintético. Los materiales de refuerzo utilizados son: fibra de vidrio y fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

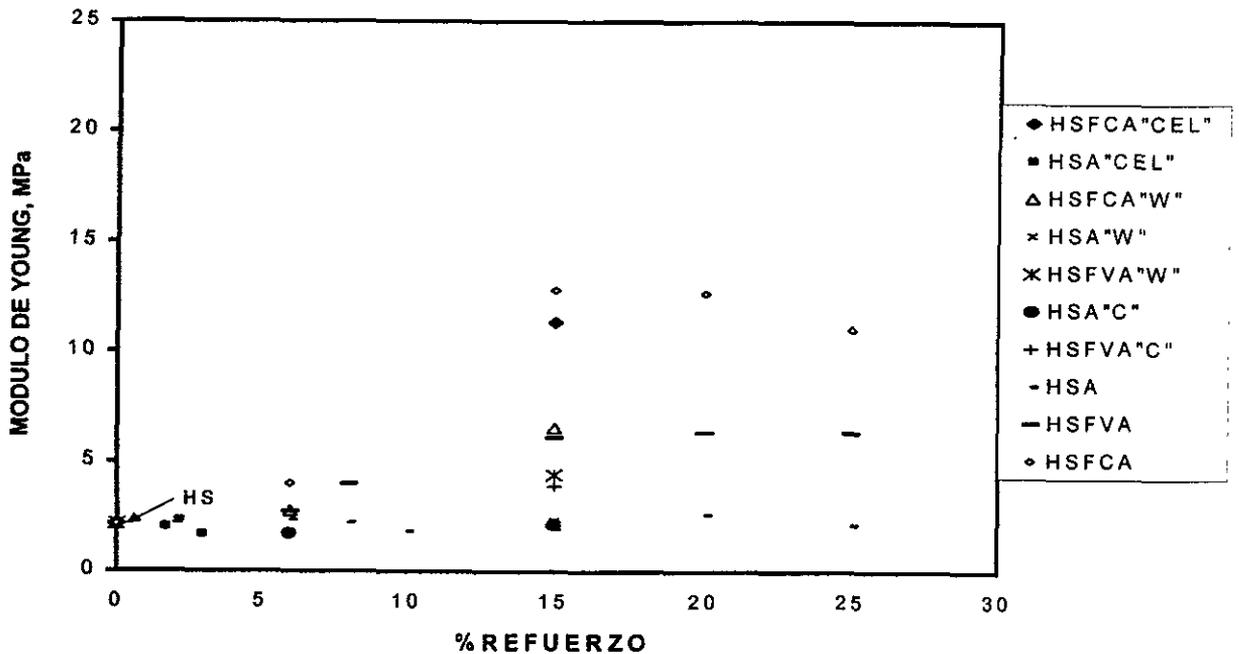


Fig. 4-43 Prueba de tensión en materiales que tienen una matriz de hule sintético. El material de refuerzo se formó con arena, arena combinada con fibras de vidrio y arena combinada con fibras de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

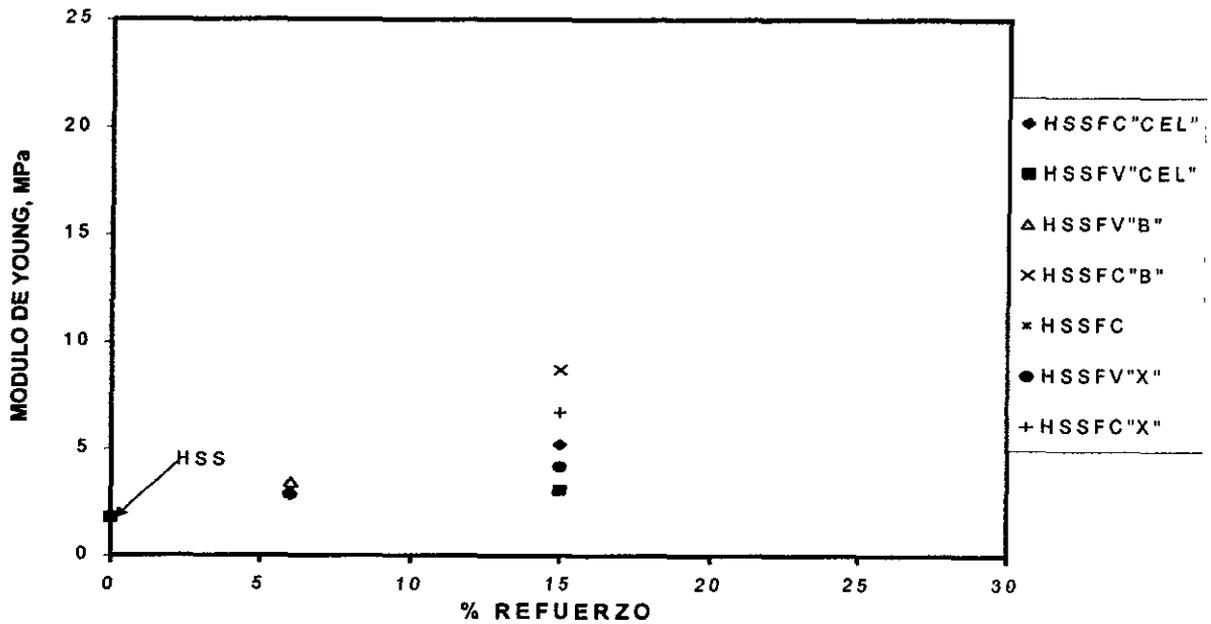


Fig. 4-44 Prueba de tensión en materiales compuestos cuya matriz es hule sintético con una carga de sílica. Los materiales de refuerzo utilizados fueron: fibra de vidrio y fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

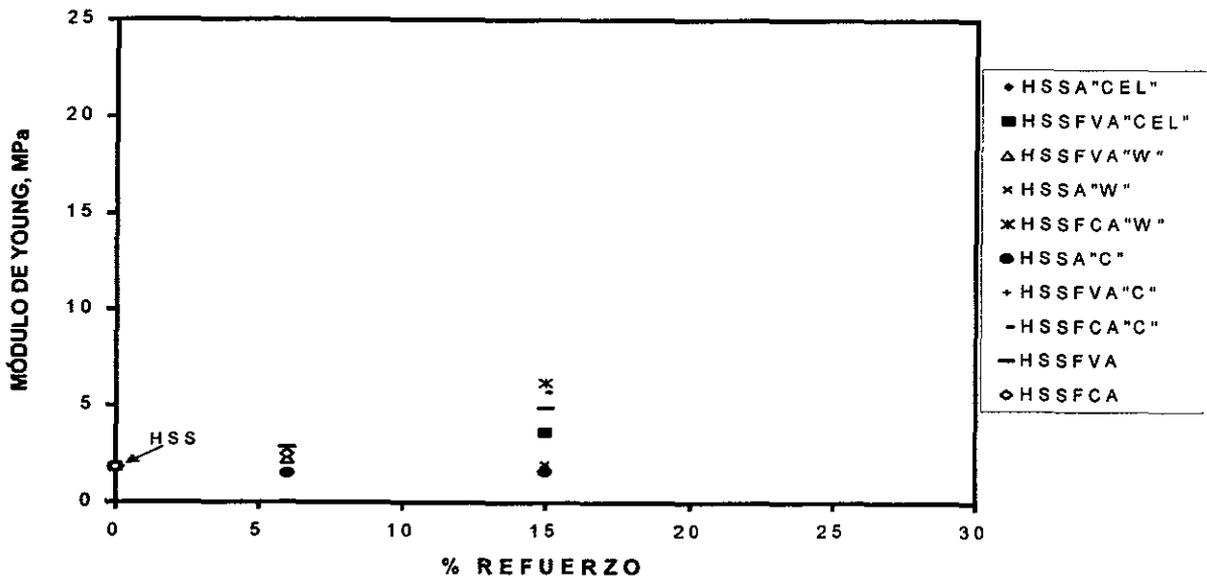


Fig. 4-45 Prueba de tensión en materiales que tienen una matriz de hule sintético con una carga de sílica. Se utilizaron como materiales de refuerzo arena, arena combinada con fibras de vidrio y arena combinada con fibras de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

Tabla 4-1 Datos obtenidos en la prueba de tensión con materiales con matriz de látex

MATERIAL	MÓDULO DE YOUNG, MPa	MATERIAL	MÓDULO DE YOUNG, MPa
LS	1.5	L	2.5
LSAa6	1.3	LA6	1.6
LSFVtA6	1.9	LFVtA6	2.8
LSFVst6	1.9	LFVst6	2.4
LSFVt6	2.2	LFVt6	2.8
LSFCst6	3.2		
LSFCt6	3.0	LFCt6	3.9
LSFCtAa	5.1		

Los nombres completos de los materiales mostrados en la tabla se pueden ver en la tabla 3-3,
 st Significa "sin tratar", a Significa que a la arena se le agregó un tratamiento de RFL,
 t Significa que la fibra fue tratada con tolueno.

4.6 Prueba de resiliencia

Esta prueba se realizó de dos maneras: tomando las mediciones en forma visual directamente, y con la ayuda de una cámara de alta velocidad. Los resultados se dividieron según el tipo de matriz con que se fabricaron los materiales reforzados. Las tablas 4-2 a 4-7 muestran resultados de pruebas en las que las lecturas fueron hechas en forma visual y las tablas 4-8 a 4-13 corresponden a pruebas en las que se empleó la cámara de alta velocidad. Las mediciones presentadas en estas tablas presentaron poca dispersión obteniéndose una desviación estándar de hasta 2.5%.

La tabla 4-2 muestra los resultados, para el caso de una matriz de hule natural reforzada con fibra de vidrio, fibra de carbono, arena, arena combinada con fibra de vidrio y arena combinada con fibra de carbono.

Tabla 4-2 Prueba de resiliencia en materiales con matriz de hule natural **

%REFUERZO	% RESILIENCIA													
	0	6	6C	6W	6X	6B	8	10	15	15C	15W	15X	20	25
HN	65.5													
HNFV	65.5	65.2	63.4		63.0	57.3	62.8	59.2	60.2	56.9		59.4	59.2	56.1
HNFC	65.5	62.7			63.9	59.5	59.8	56.7	58.7	48.8		57.1	52.7	56.1
HNA	65.5	64.3	73.5	68.6				65.3			67.9		68.7	68.5
HNAFV	65.5			69.2				65.2	63.3	60.4	60.1		60.5	61.4
HNAFC	65.5	65.1	60.6				64.1	57.4	59.1	61.6	56.8		53.7	

**Lecturas en forma visual.

La tabla 4-3 presenta los resultados de materiales reforzados con fibra de vidrio, fibra de carbono, arena, arena combinada con fibra de vidrio y arena combinada con fibra de carbono siendo la matriz de hule natural con una carga de sílica.

Tabla 4-3 Prueba de resiliencia en materiales con matriz de hule natural con sílica**

% RESILIENCIA											
%REFUERZO	0	6	6C	6W	6X	6B	15C	15W	15X	15CEL	15B
HNS	66.0										
HNSFV	66.0		62.6		64.4		57.5		60.5	62.0	62.3
HNSFC	66.0		58.3		62.5	59.9	63.1		55.6		
HNSA	66.0		66.4	66.9			67.8	65.2			
HNSAFV	66.0	67.1	62.7	61.1				65.5			
HNSAFC	66.0		63.1	64.0			51.1	58.1			

** Lecturas en forma visual.

La tabla 4-4 muestra los resultados de materiales con matriz de hule sintético reforzada con fibra de vidrio, fibra de carbono, arena, arena combinada con fibra de vidrio y arena combinada con fibra de carbono.

Tabla 4-4 Prueba de resiliencia en materiales cuya matriz es hule sintético**

% RESILIENCIA								
% REFUERZOS	0	6	6C	6W	6X	6B	8	10
HS	64.0							
HSFV	64.0		63.6		61.7	63.7	59.1	58.0
HSFC	64.0	61.7	61.0		60.0		60.2	58.7
HSA	64.0	56.6	65.0					58.8
HSAFV	64.0	62.1		59.8				60.4
HSAFC	64.0	64.5		50.2			58.8	

**Lecturas en forma visual.

.....continuación tabla 4-4

% RESILIENCIA							
% REFUERZOS	15	15C	15W	15X	15CEL	20	25
HS							
HSFV	57.4	56.7		55.5		56.2	55.7
HSFC	54.5			53.3	57.9	51.4	49.5
HSA	59.9	60.7	64.1		62.5	62.6	63.3
HSAFV	57.2	57.2	63.9			56.2	53.7
HSAFC	60.6	56.5				54.7	

La tabla 4-5 presenta los resultados de materiales con una matriz de hule sintético y carga de sílica con refuerzo de fibra de vidrio, fibra de carbono, arena, arena combinada con fibra de vidrio y arena combinada con fibra de carbono.

Tabla 4-5 Prueba de resiliencia en materiales con matriz de hule sintético con sílica**

% RESILIENCIA										
%REFUERZOS	0	6	6C	6W	6X	6B	15C	15W	15X	15B
HSS	63.9									
HSSFV	63.9		54.0		61.7	63.9	55.4		55.7	60.4
HSSFC	63.9		61.0				58.4		52.1	56.1
HSSA	63.9		59.6	63.8			58.9			
HSSAFV	63.9	64.4						59.8		
HSSAFC	63.9	66.2		62.3						

**Lecturas en forma visual

La tabla 4-6 muestra los resultados para el caso de una matriz de látex reforzado con fibra de vidrio sin tratar, fibra de vidrio tratada, arena y fibra de carbono tratada.

Tabla 4-6 Prueba de resiliencia con materiales cuya matriz es látex*

MATERIAL	% RESILIENCIA (promedios)
L	65.7
LFVst6***	62.1
LAFVt6**	66.2
LA6	63.9
LFCt6*	59.7

*Lecturas en forma visual, **t = tratada, *** st = sin tratar.

La tabla 4-7 presenta los resultados de los materiales reforzados con fibra de vidrio sin tratar, fibra de vidrio tratada combinada con arena, fibra de carbono sin tratar y fibra de carbono tratada, todos ellos con matriz de látex con una carga de sílica.

Tabla 4-7 Prueba de resiliencia con materiales cuya matriz es látex con de sílica*

MATERIAL	% RESILIENCIA, (promedios)
LS	66.9
LSFVst6***	68.7
LSAFVt6**	58.2
LSFCst6***	66.7
LSFCt6**	60.7

*Lecturas en forma visual, **t = tratada, ***st = sin tratar

La tabla 4-8 muestra los resultados de materiales que tienen una matriz de hule natural reforzada con arena en diferentes porcentajes. La arena se utilizó con y sin la impregnación de tres tipos de adhesivos.

Tabla 4-8 Prueba de resiliencia realizada con ayuda de una cámara de alta velocidad

MATERIAL	% RESILIENCIA (promedios)
HN	70.1
HNA6	73.4
HNA6W	73.1
HNA6C	74.7
HNA8	72.4
HNA10	70.7
HNA15	70.1
HNA15W	71.9
HNA15C	66.9
HNA15X	68.4
HNA20	73.2
HNA25	72.1

La tabla 4-9 muestra los resultados de materiales que tienen una matriz de hule natural con una carga de sílica reforzada con arena en diferentes porcentajes. La arena se impregnó con tres tipos de adhesivos.

Tabla 4-9 Prueba de resiliencia realizada con la ayuda de una cámara de alta velocidad

MATERIAL	% RESILIENCIA (promedios)
HNS	72.3
HNSA6W	72.4
HNSA6C	73.8
HNSA15W	70.2
HNSA15C	74.6
HNSA15CEL	73.1

La tabla 4-10 muestra los resultados de materiales que tienen una matriz de hule sintético reforzada con arena en diferentes porcentajes. La arena se utilizó con y sin la impregnación de tres adhesivos.

Tabla 4-10 Prueba de resiliencia realizada con ayuda de una cámara de alta velocidad

MATERIAL	% RESILIENCIA (promedios)
HS	66.9
HSA6C	69.1
HSA8	67.4
HSA10	67.4
HSA15	67.1
HSA15W	68.0
HSA15C	68.7
HSA15CEL	67.3
HSA20	67.2
HSA25	68.2

La tabla 4-11 muestra los resultados de materiales que tienen una matriz de hule sintético con una carga de sílica reforzada con arena en diferentes porcentajes. La arena se utilizó con y sin la impregnación de tres adhesivos.

Tabla 4-11 Prueba de resiliencia realizada con ayuda de una cámara de alta velocidad

MATERIAL	% RESILIENCIA (promedios)
HSS	67.2
HSSA6W	67.2
HSSA15W	69.1
HSSA6C	69.8
HSSA15C	67.6
HSSA15CEL	68.2

La tabla 4-12 muestra los resultados de materiales que tienen una matriz de látex reforzado con arena.

Tabla 4-12 Prueba de resiliencia realizada con ayuda de una cámara de alta velocidad

MATERIAL	% RESILIENCIA (promedios)
L	71.9
LA	70.2

La tabla 4-13 muestra los resultados de materiales presentados que tienen una matriz de látex con una carga de sílica reforzado con arena.

Tabla 4-13 Prueba de resiliencia con ayuda de una cámara de alta velocidad

MATERIAL	% RESILIENCIA (promedios)
LS	74.2
LSA	76.2

4.7 Prueba de compresión

Los resultados de esta prueba se presentan en las figs. 4-46 a 4-53 y las tablas 4-14 y 4-15. Los resultados se dividieron según el tipo de matriz con que se fabricaron los materiales compuestos. Así, hay cuatro gráficas correspondientes a hule natural como material base y cuatro correspondientes a hule sintético. Los resultados para los materiales a base de látex se presentan en la tabla 4-14. En las gráficas, las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el refuerzo. Las mediciones presentadas en estas gráficas presentaron poca dispersión obteniéndose una desviación estándar de hasta 0.92 MPa.

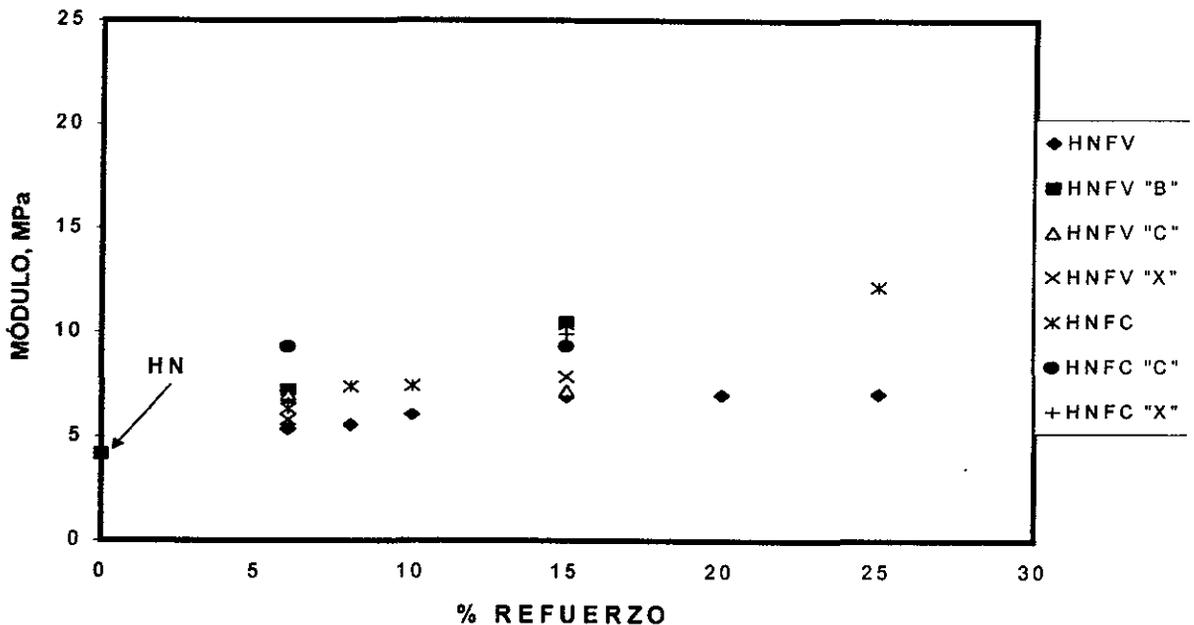


Fig. 4-46 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule natural reforzado con fibras de vidrio o de carbono, ambas impregnadas o no con algún tipo de adhesivo.

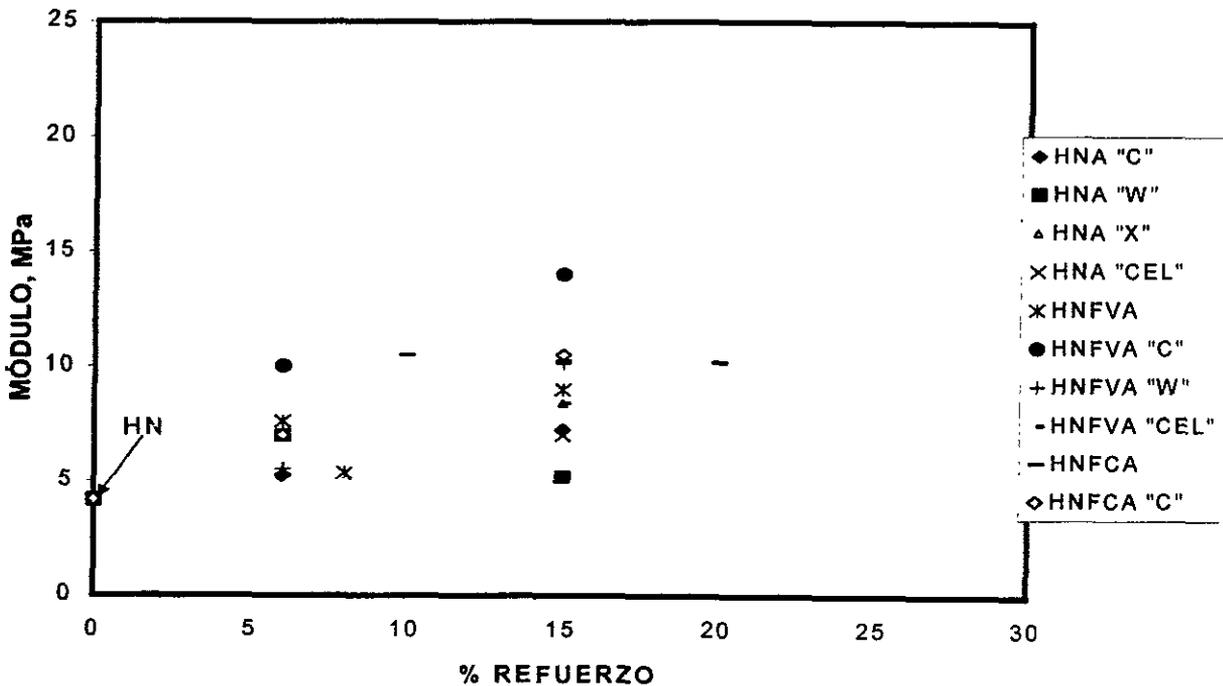


Fig. 4-47 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule natural reforzado con arena y/o con fibras de vidrio o de carbono combinadas con arena. En ocasiones los refuerzos fueron impregnados con algún tipo de adhesivo.

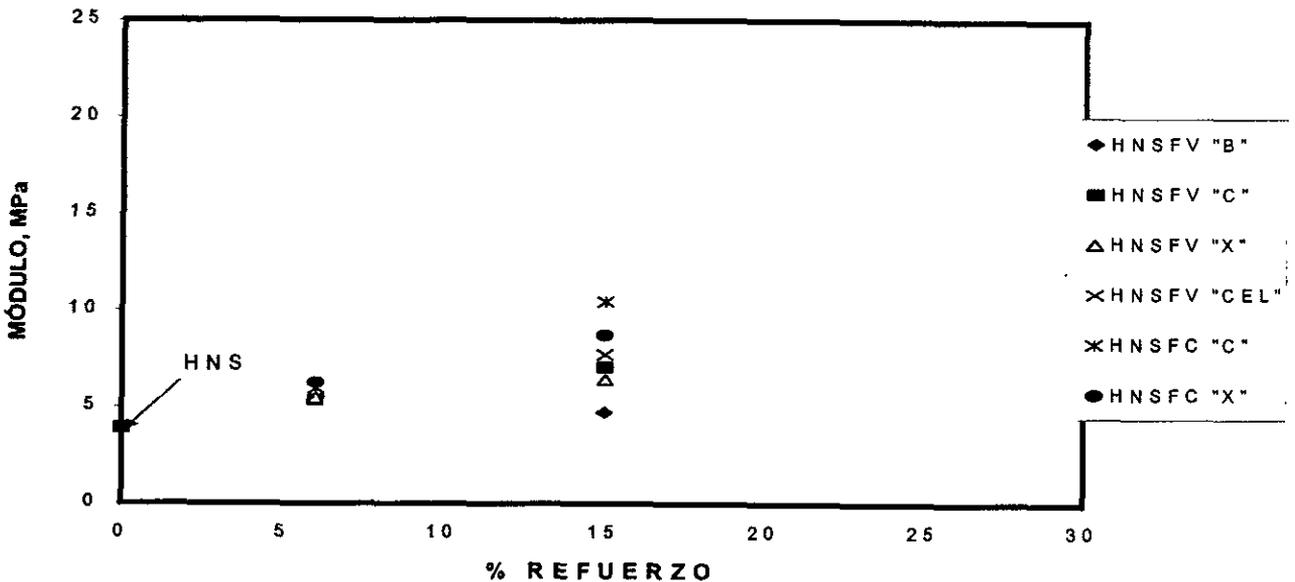


Fig. 4-48 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule natural con una carga de sílica reforzada con fibras de vidrio o de carbono. Las fibras fueron impregnadas con cuatro diferentes adhesivos.

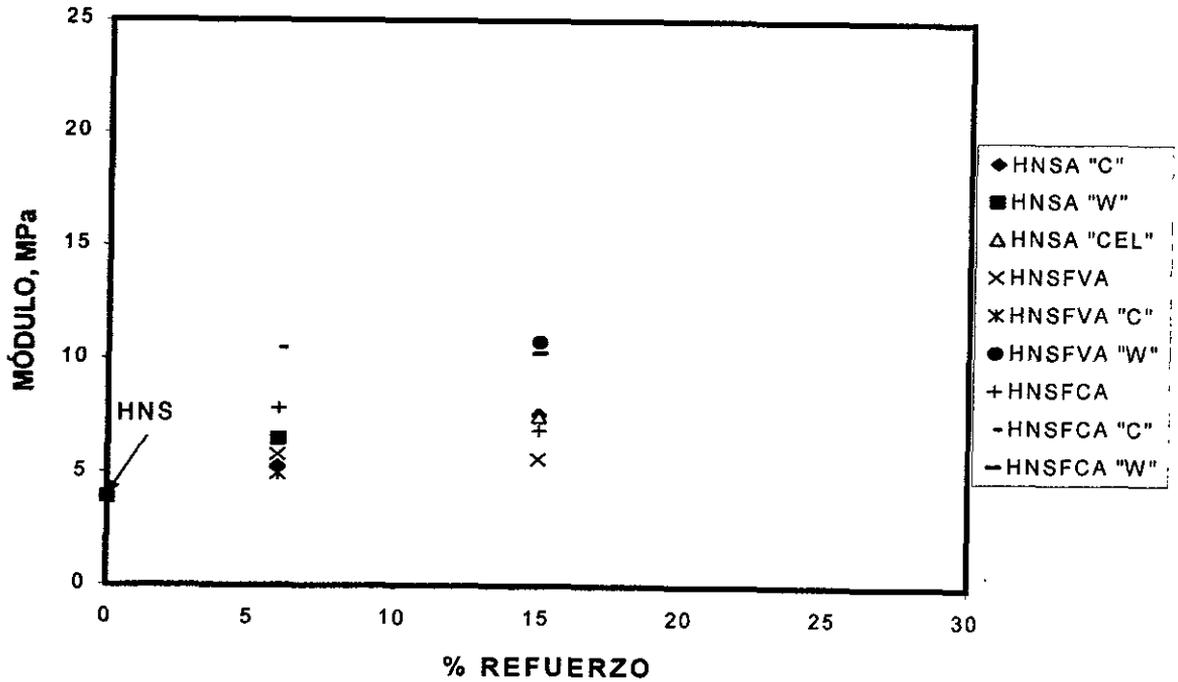


Fig. 4-49 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule natural con una carga de sílica reforzada con arena o con arena combinada con fibras de vidrio o de carbono. Se identifica el adhesivo con el que se impregnó el refuerzo en su caso.

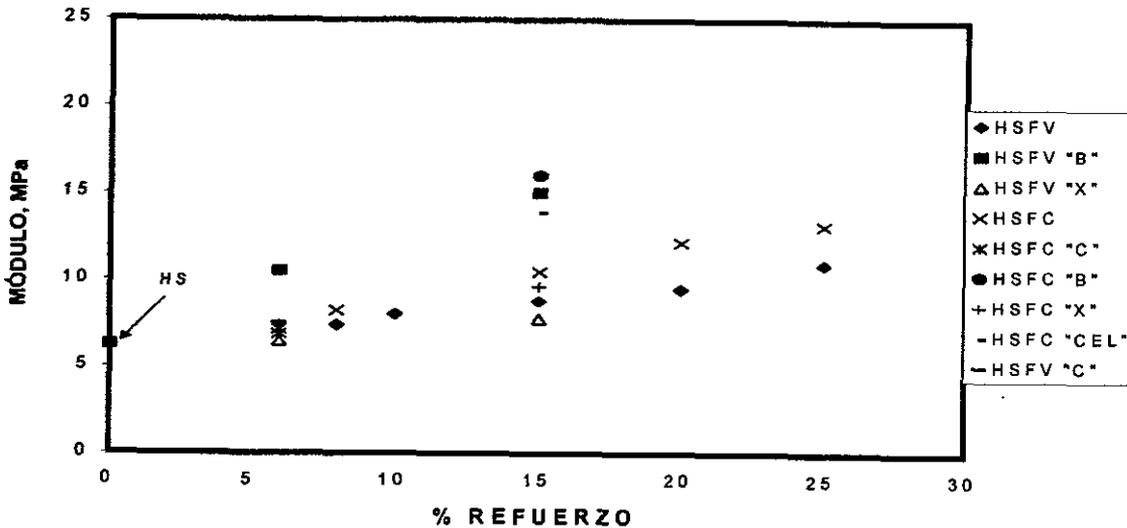


Fig. 4-50 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule sintético reforzado con fibras de vidrio o de carbono, ambas impregnadas o no con algún tipo de adhesivo.

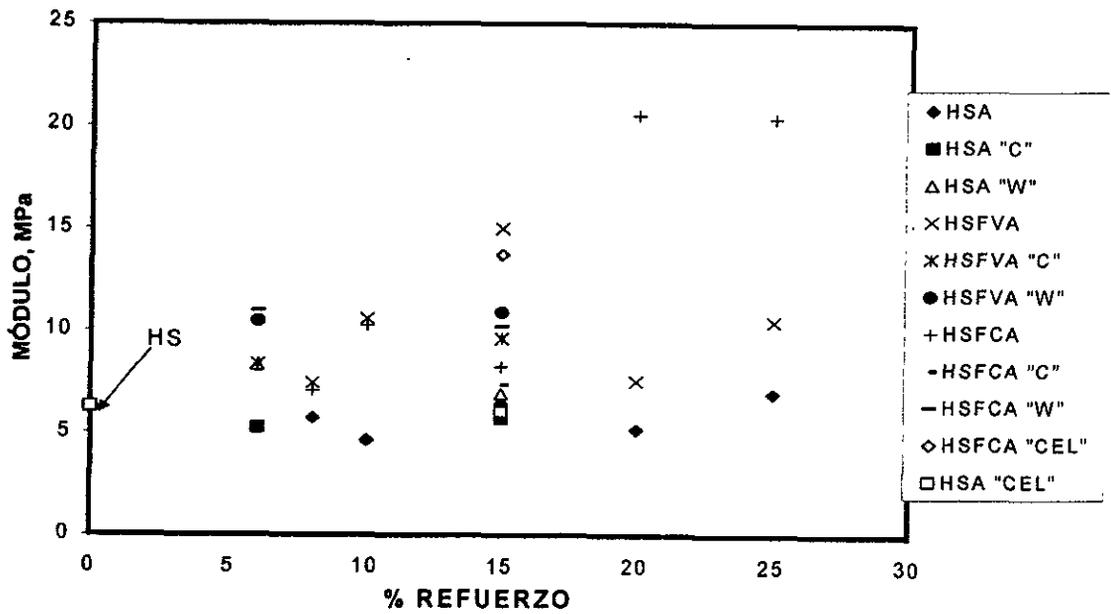


Fig. 4-51 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule sintético reforzado con arena o con fibras de vidrio o de carbono y arena. En ocasiones los refuerzos fueron impregnados con algún tipo de adhesivo.

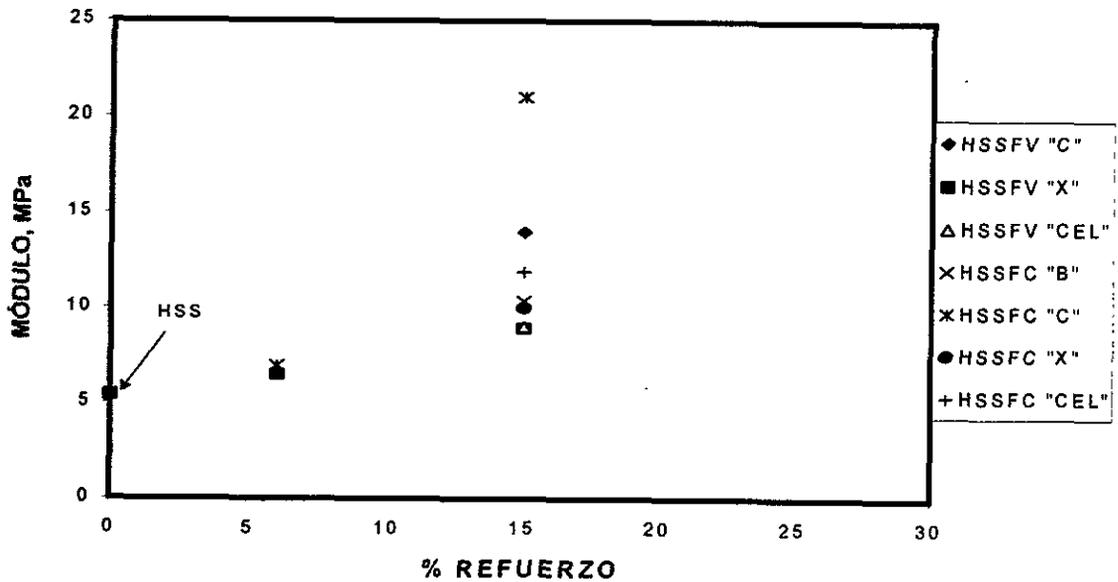


Fig. 4-52 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule sintético con una carga de sílica reforzada con fibras de vidrio o de carbono. Las fibras fueron impregnadas con cuatro diferentes adhesivos.

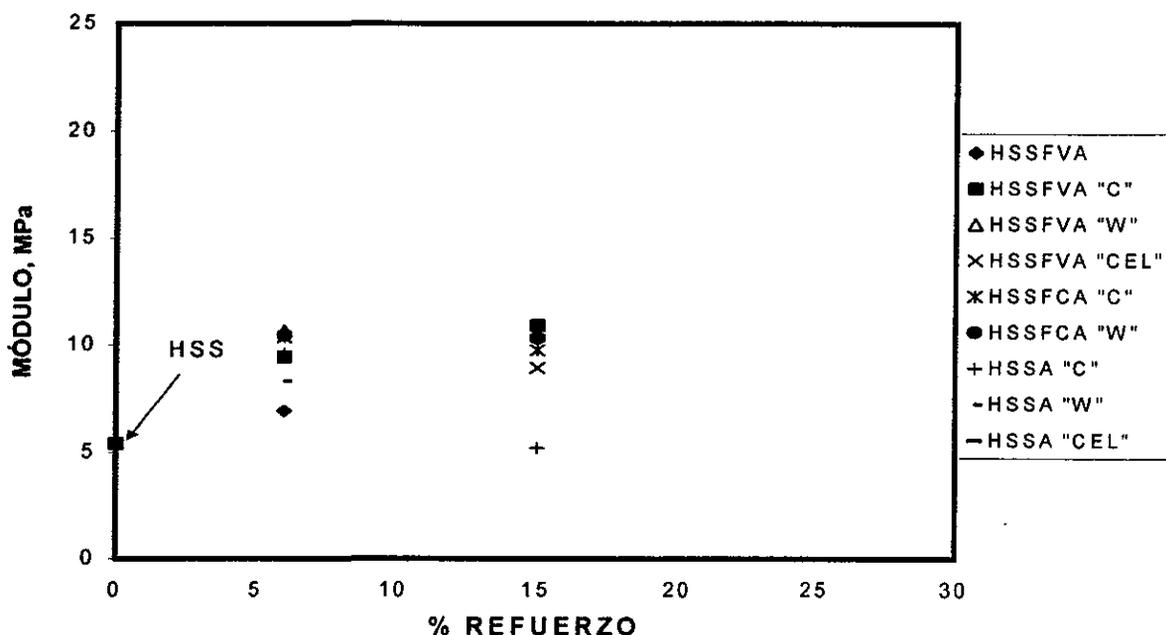


Fig. 4-53 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es hule sintético con una carga de sílica reforzada con arena o con arena combinada con fibras de vidrio o de carbono. Se identifica el adhesivo con el que se impregnó el refuerzo, en su caso.

La tabla 4-14 presenta los resultados obtenidos de la prueba de compresión de materiales compuestos cuya matriz es látex reforzado con arena y/o fibra de vidrio o carbono, ambas fibras con y sin un tratamiento para eliminar cualquier residuo que impidiera la correcta adhesión con la matriz.

Tabla 4-14 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es látex

MATERIAL	% REFUERZO	MÓDULO, MPa
L	0	6.59
LA	6	4.92
LFVt*	6	6.83
LFVst**	6	5.30
LFVtA*	6FV y 6A	6.99
LFct*	6	8.14
LFcSt*	6	4.78

*t = tratada, **st = sin tratar.

La tabla 4-15 es semejante a la 4-14 pero en este caso, la matriz de látex tiene una carga de sílica.

Tabla 4-15 Prueba de compresión en materiales cuya matriz es látex con sílica

MATERIAL	% REFUERZO	MÓDULO, MPa
LS	0	5.74
LSFVst*	6	5.30
LSFVtA*	6FV y 6A	4.90
LSFCSt*	6	6.16

*t = tratada, ** st = sin tratar

4.8 Prueba de dureza

Los resultados se presentan en las figuras. 4-54 a 4-61 y en la tabla 4-16. Éstos se dividieron según el tipo de matriz con que se fabricaron los materiales compuestos; HN, HNS, HS, HSS, L y LS. En cada gráfica se especifica el tipo de matriz y de refuerzo que se usó y si éste fue impregnado con algún adhesivo. Las mediciones presentadas en estas gráficas presentaron poca dispersión obteniéndose una desviación estándar de hasta 2.75 unidades de dureza shore A.

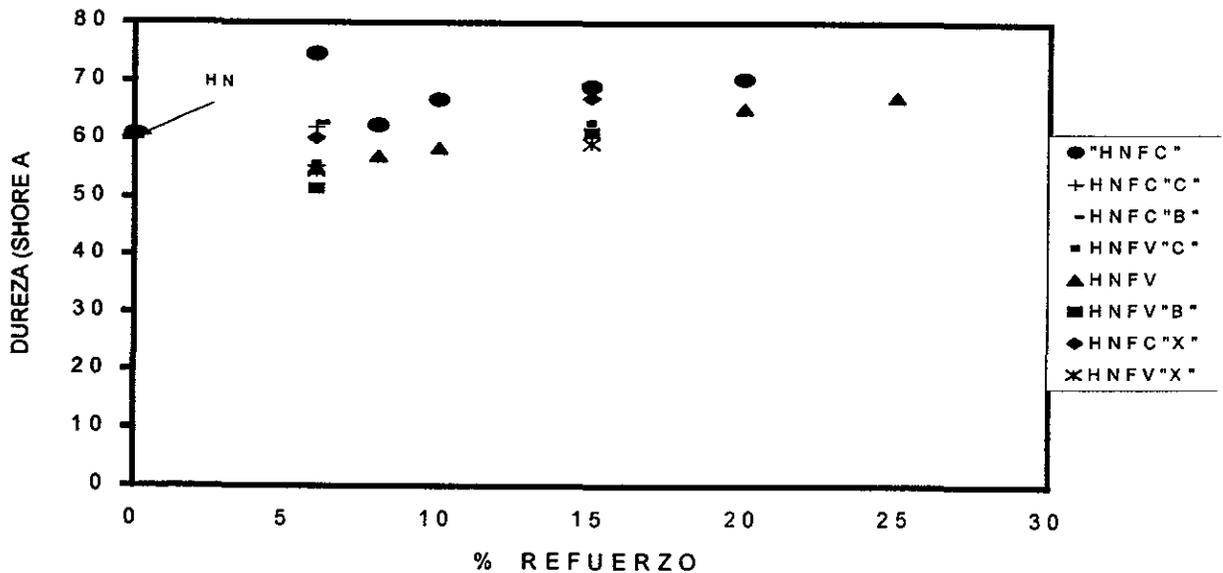


Fig. 4-54 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz es hule natural. Los materiales utilizados para reforzar la matriz elastomérica son la fibra de vidrio o la fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

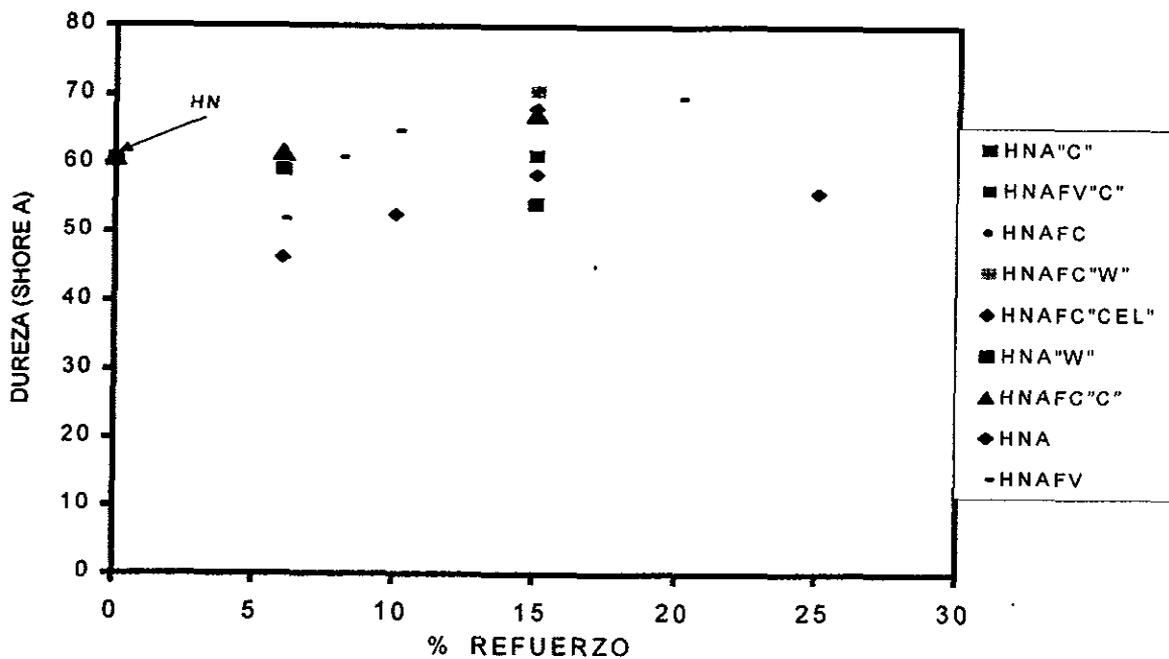


Fig. 4-55 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz es hule natural. Los materiales utilizados para reforzar la matriz elastomérica son arena, fibra de vidrio con arena o fibra de carbono con arena. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

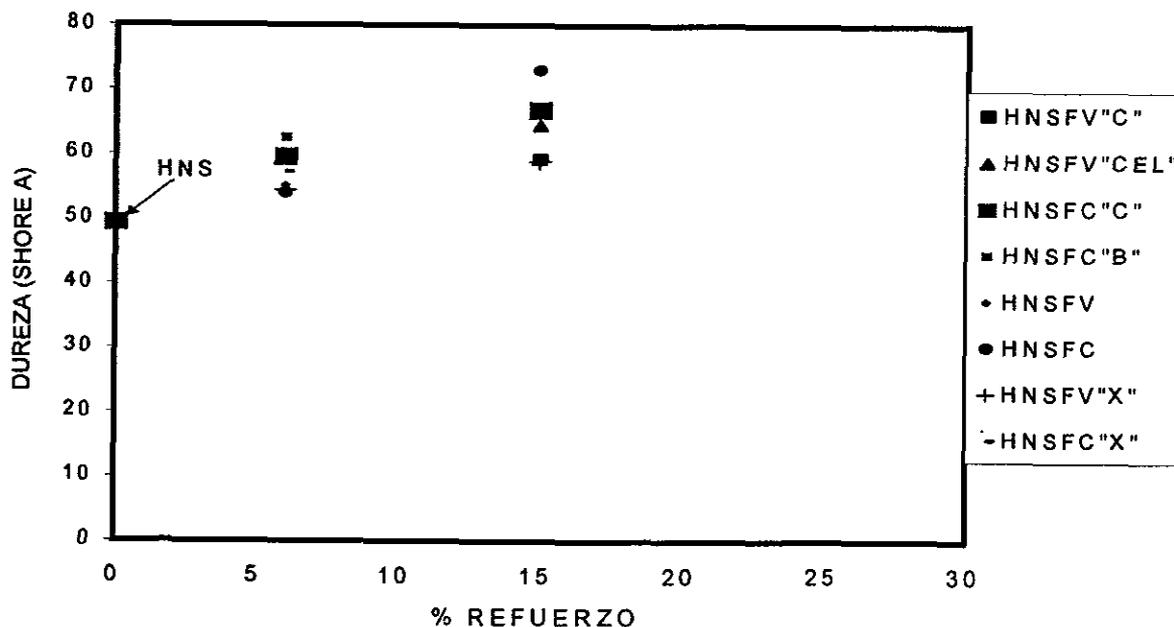


Fig. 4-56 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz es hule natural con una carga de sílica. Los materiales utilizados para reforzar la matriz elastomérica son fibra de vidrio o fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

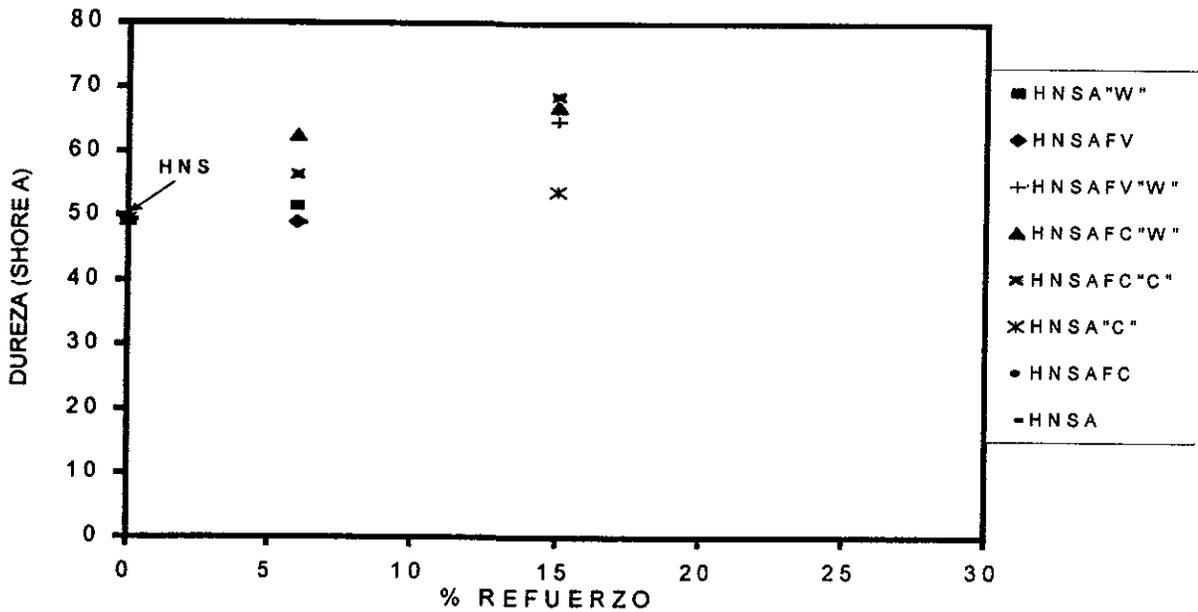


Fig. 4-57 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz está hecha de hule natural con una carga de silica. Los materiales utilizados para reforzar la matriz elastomérica son: arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

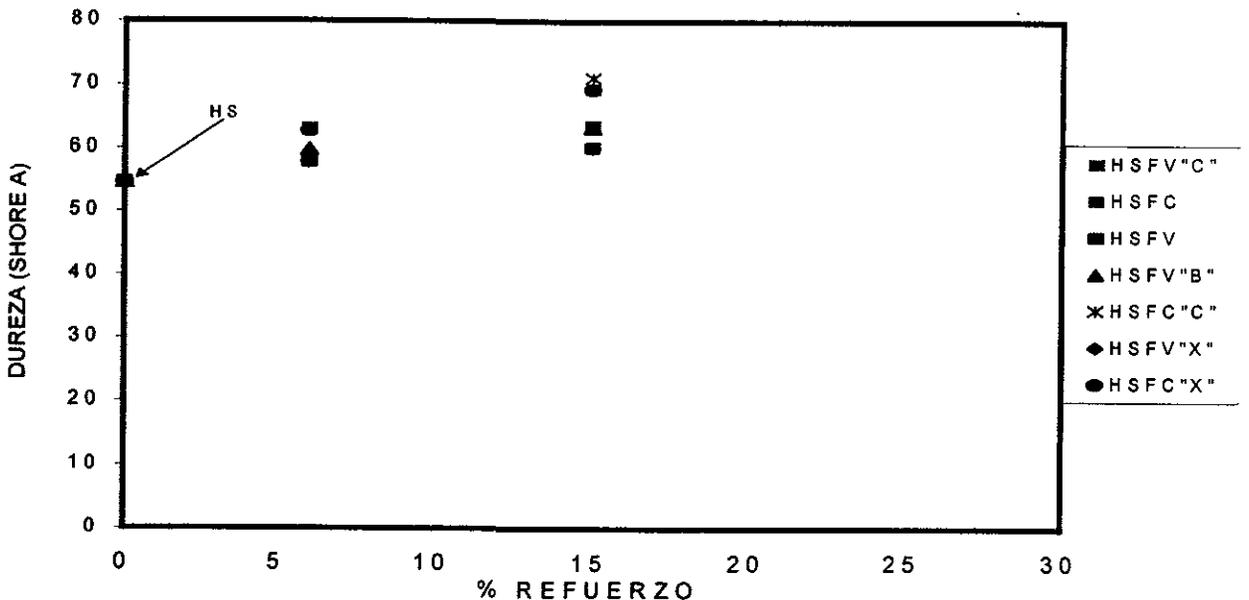


Fig. 4-58 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz esta hecha de hule sintético. Los materiales utilizados para reforzar la matriz elastomérica son: fibra de vidrio o fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

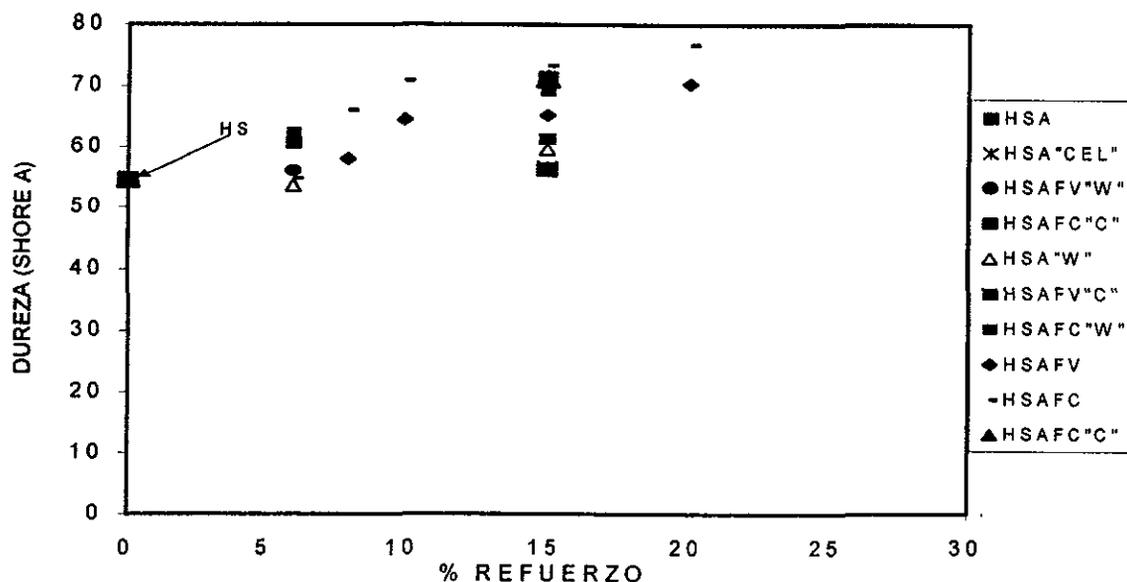


Fig. 4-59 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz es hule sintético. Los materiales utilizados para reforzar la matriz elastomérica son: arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.



Fig. 4-60 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz es hule sintético con una carga de sílica reforzada con: fibra de vidrio o fibra de carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

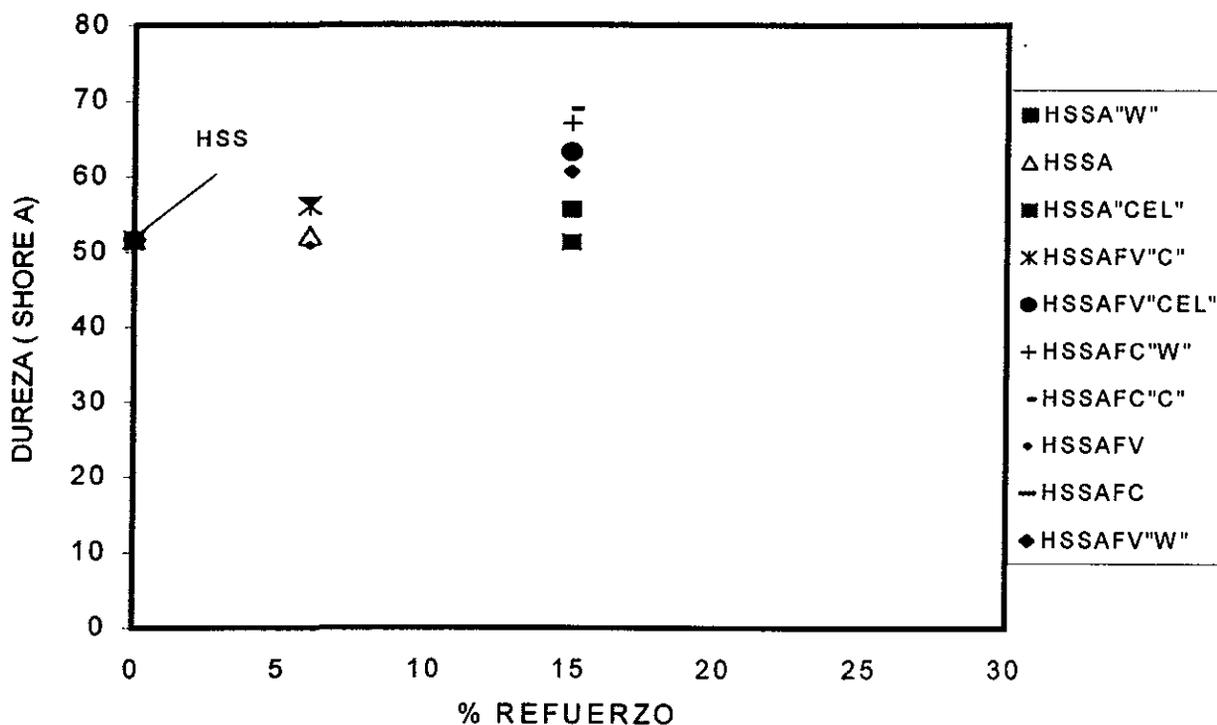


Fig. 4-61 Prueba de dureza en materiales compuestos cuya matriz está hecha de hule sintético con una carga de sílica. Los materiales utilizados como refuerzo son: arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

La tabla 4-16 presenta los resultados de la prueba de dureza realizada sobre materiales compuestos cuya matriz fue de látex reforzada con arena, fibra de vidrio, fibra de carbono y arena combinada con la fibra de vidrio o la de carbono. Las fibras se usaron con y sin un tratamiento para remover cualquier agregado que impidiera una buena adhesión entre los refuerzos y la matriz. La tabla 4-17 muestra los resultados obtenidos con materiales cuya matriz de látex contenía una carga de sílica además de los refuerzos antes mencionados.

Tabla 4-16 Resultados de la prueba de dureza realizada en materiales a base de látex

MATERIAL	DUREZA SHORE A
L	54.20
LA	56.41
LFVst	62.78
LFVt	61.69
LFVtA	62.15
LFC	42.16
LFct	58.73
LFctAa	63.67

Los nombres completos de los materiales se encuentran en la tabla 3-3.

La letra "t" significa que la fibra fue tratada.

La letra "a" significa que la arena fue impregnada con un adhesivo.

Tabla 4-17 Resultados de la prueba de dureza realizada en materiales a base de látex

MATERIAL	DUREZA SHORE A
LS	48.51
LSA	50.66
LSFV	52.99
LSFVt	57.83
LSFVtA	54.5
LSFC	50.92
LSFct	46.53
LSFctAa	71.91

4.9 Prueba de fricción

Los resultados se dividieron según las condiciones de operación de la prueba que se les aplicó a los diferentes materiales. En cada figura se presentan los ángulos de fricción obtenidos durante las pruebas estáticas y dinámicas. De la fig. 4-62 a la fig. 4-65 se presentan los resultados de la prueba de fricción a temperatura ambiente, de la fig. 4-66 a fig. 4-69 los de baja temperatura y de la fig. 4-70 a fig. 4-71 los de alta temperatura. La tabla 4-18 y 4-19 presentan los resultados de esta prueba obtenidos a las diferentes condiciones de operación de la prueba aplicada a látex. Las mediciones presentadas en

estas gráficas presentaron poca dispersión obteniéndose una desviación estándar de hasta 1.93 grados.

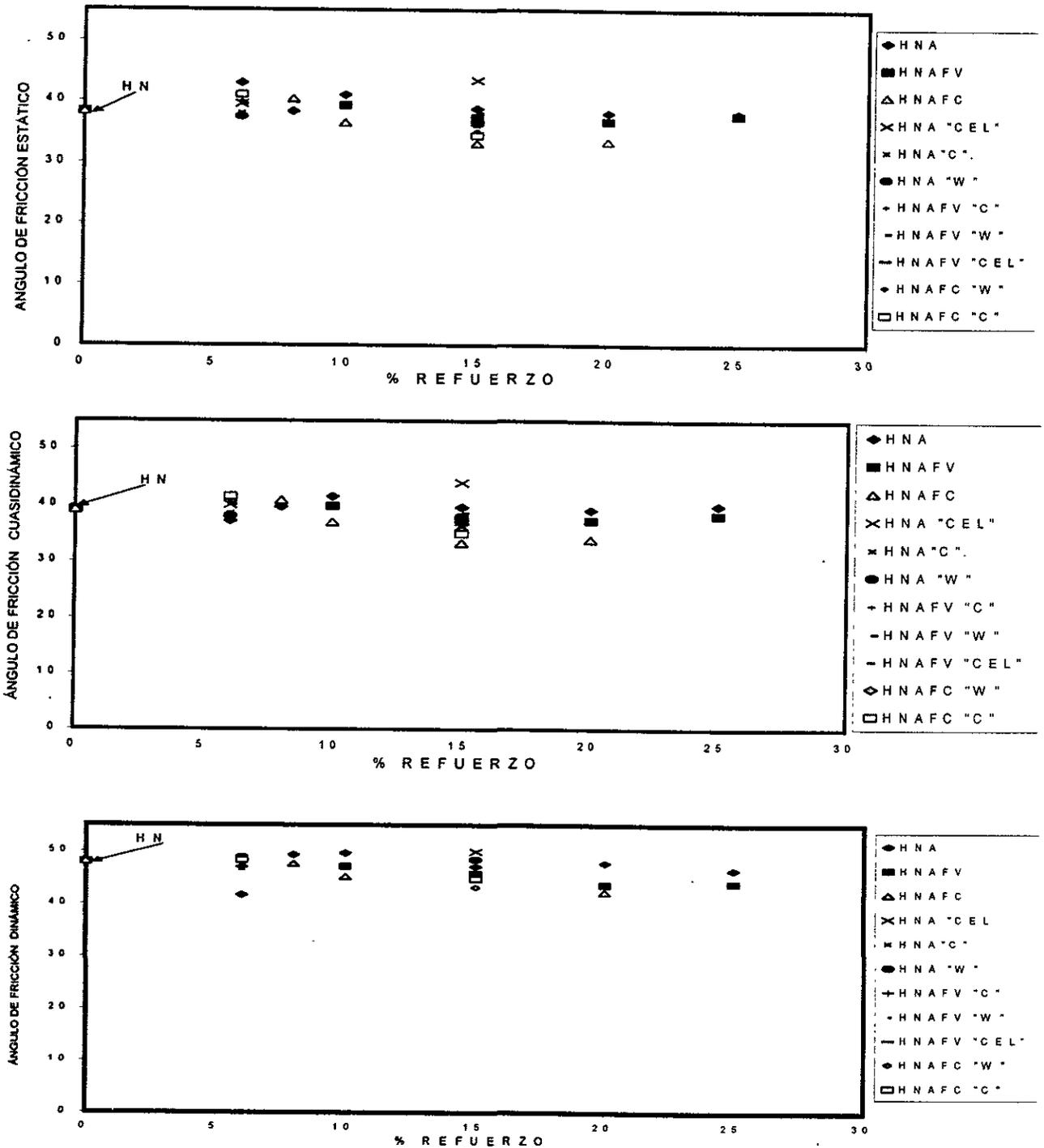


Fig. 4-62 Prueba de fricción a temperatura ambiente aplicada a materiales que tienen una matriz de hule natural reforzada con fibras de vidrio, carbono, arena, fibras de vidrio y/o carbono combinadas con arena. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que se impregnó el material de refuerzo.

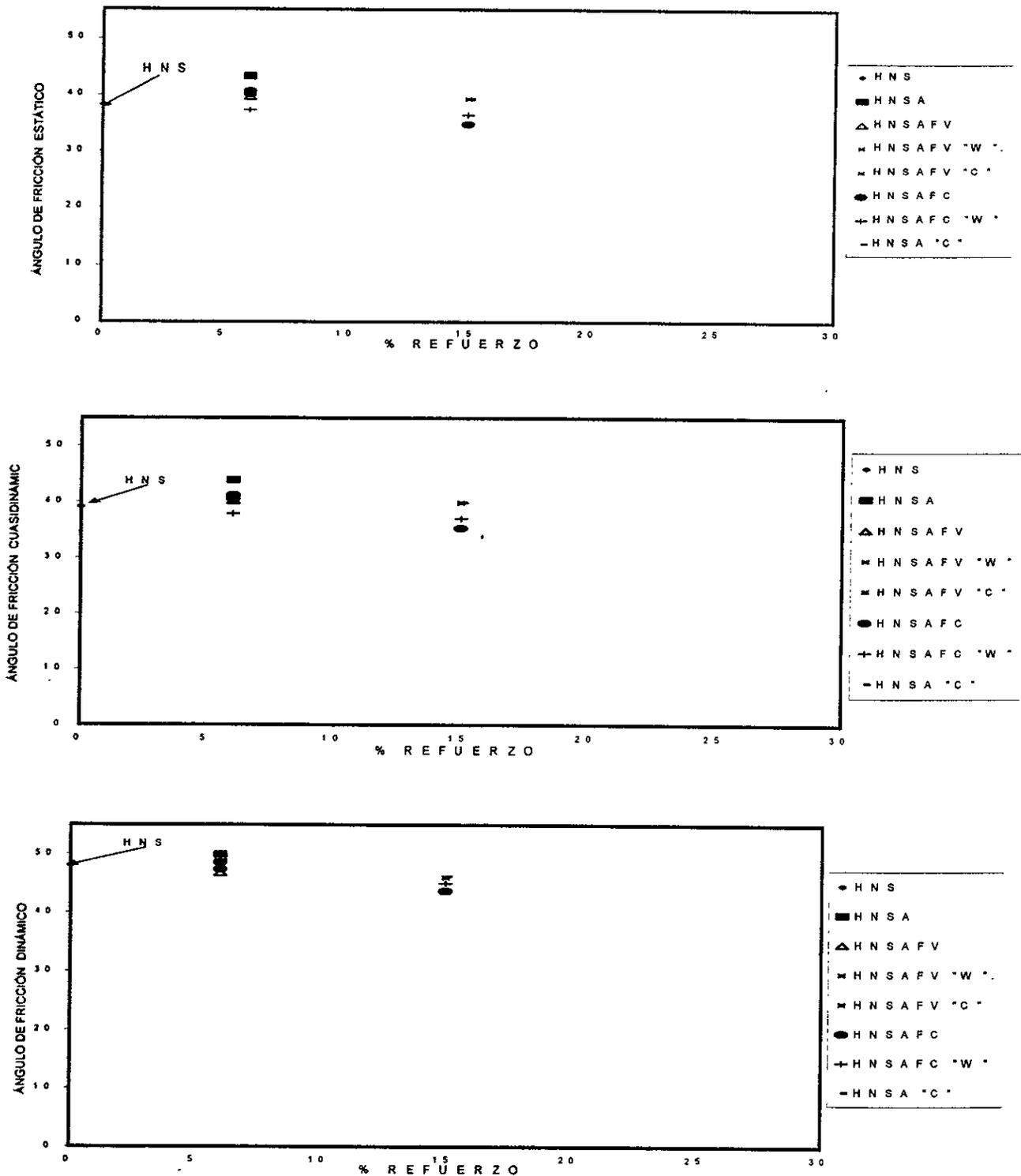


Fig. 4-63 Prueba de fricción a temperatura ambiente aplicada a materiales que tienen una matriz de hule natural con carga de sílica reforzada con fibras de vidrio, de carbono, arena, fibras de vidrio y/o carbono combinada con arena. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que se impregnó el material de refuerzo.

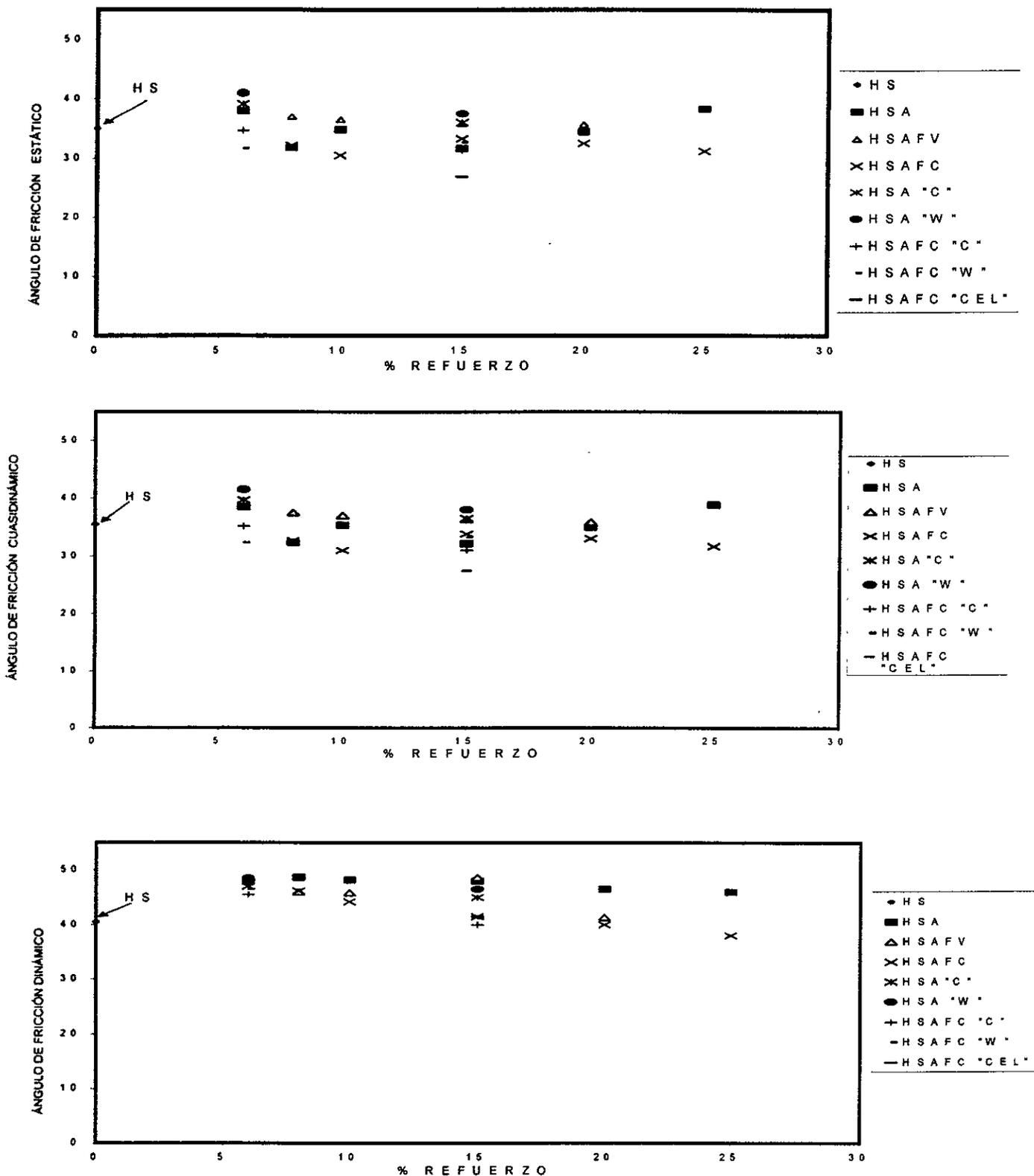


Fig. 4-64 Prueba de fricción a temperatura ambiente aplicada a materiales que tienen una matriz de hule sintético reforzado con fibras de vidrio, carbono, arena, fibras de vidrio y/o carbono combinadas con arena. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que se impregnó el material de refuerzo.

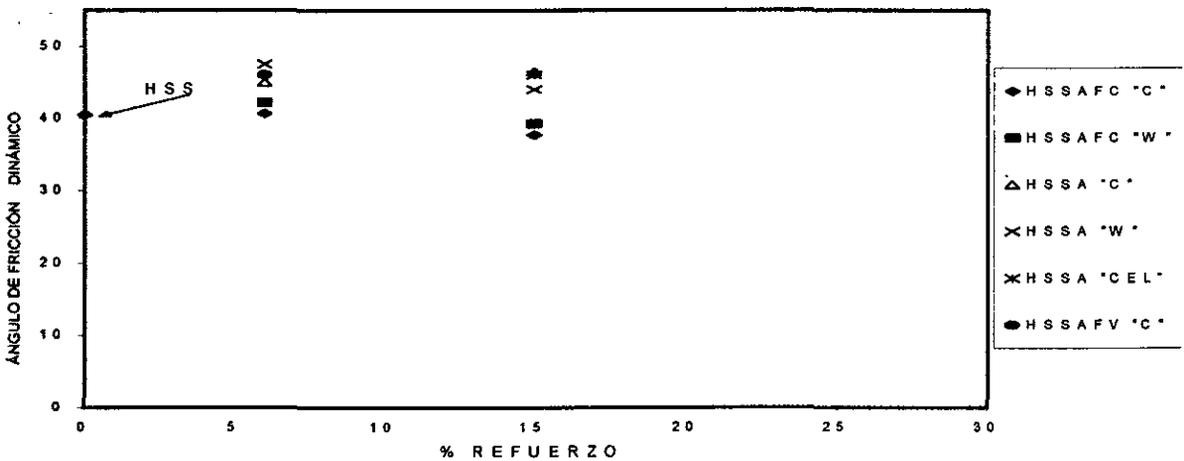
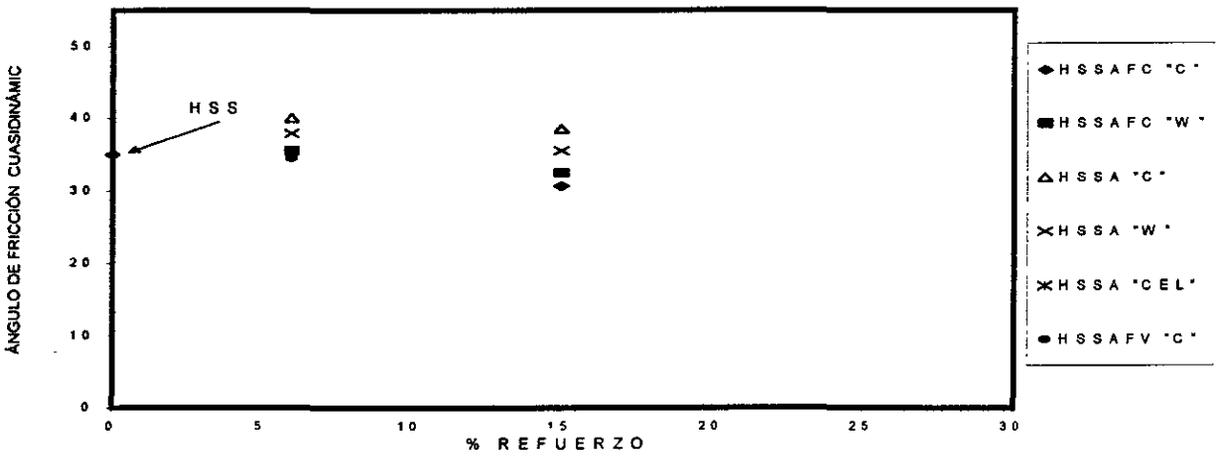
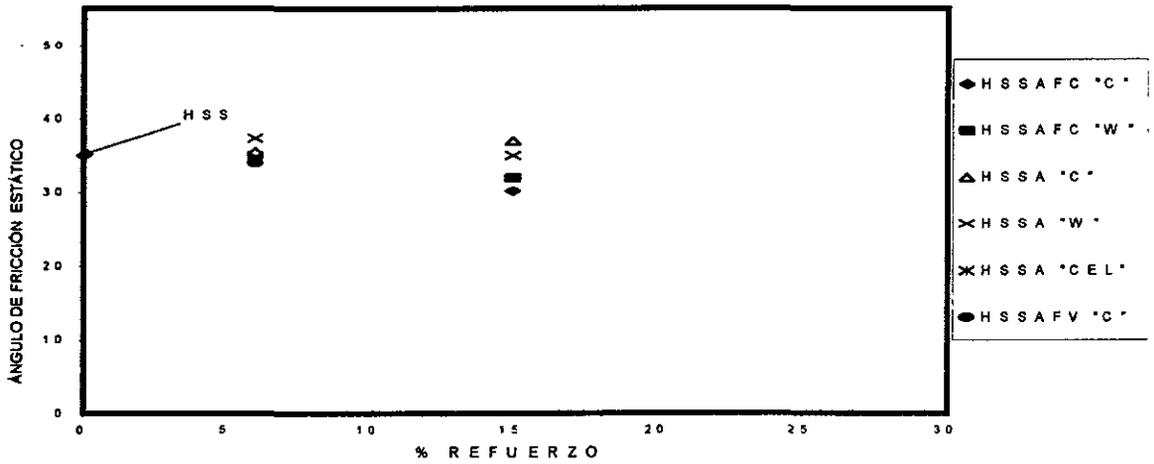


Fig. 4-65 Prueba de fricción a temperatura ambiente aplicada a materiales con una matriz de hule sintético con carga de sílica reforzada con arena o arena combinada con fibras de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

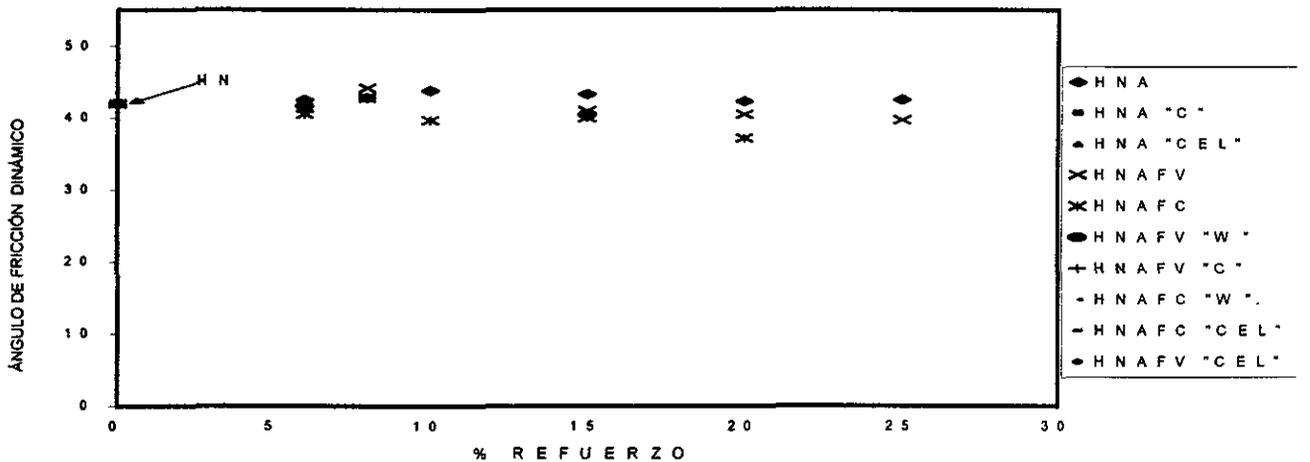
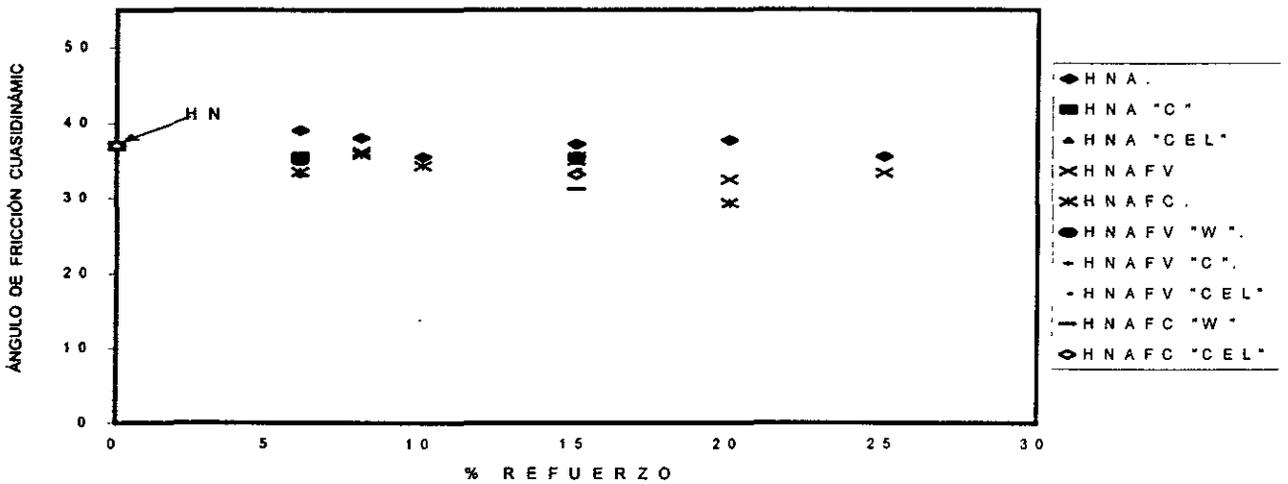
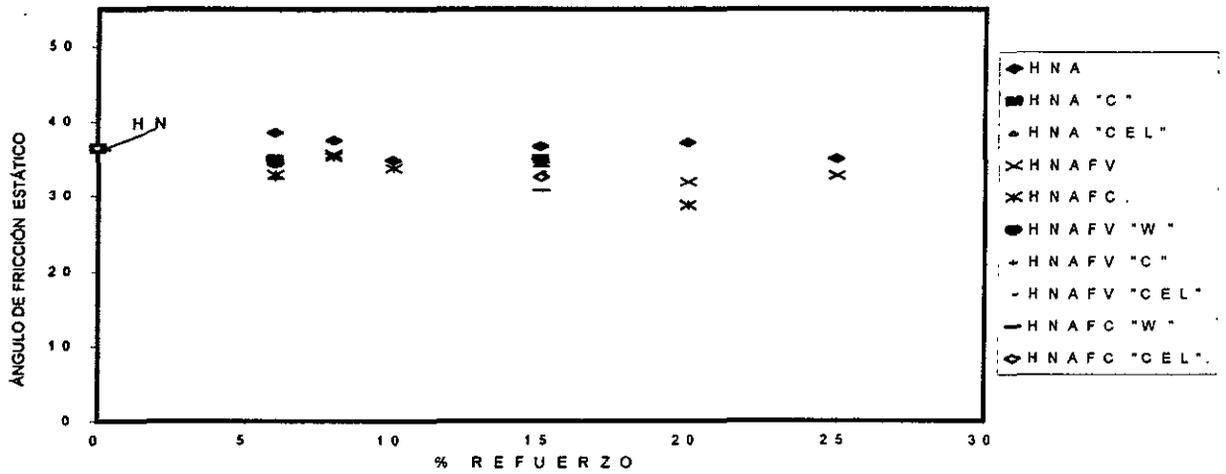


Fig. 4-66 Prueba de fricción a bajas temperaturas aplicada a materiales con matriz de hule natural reforzado con arena o arena combinada con fibras de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que se impregnó el material de refuerzo.

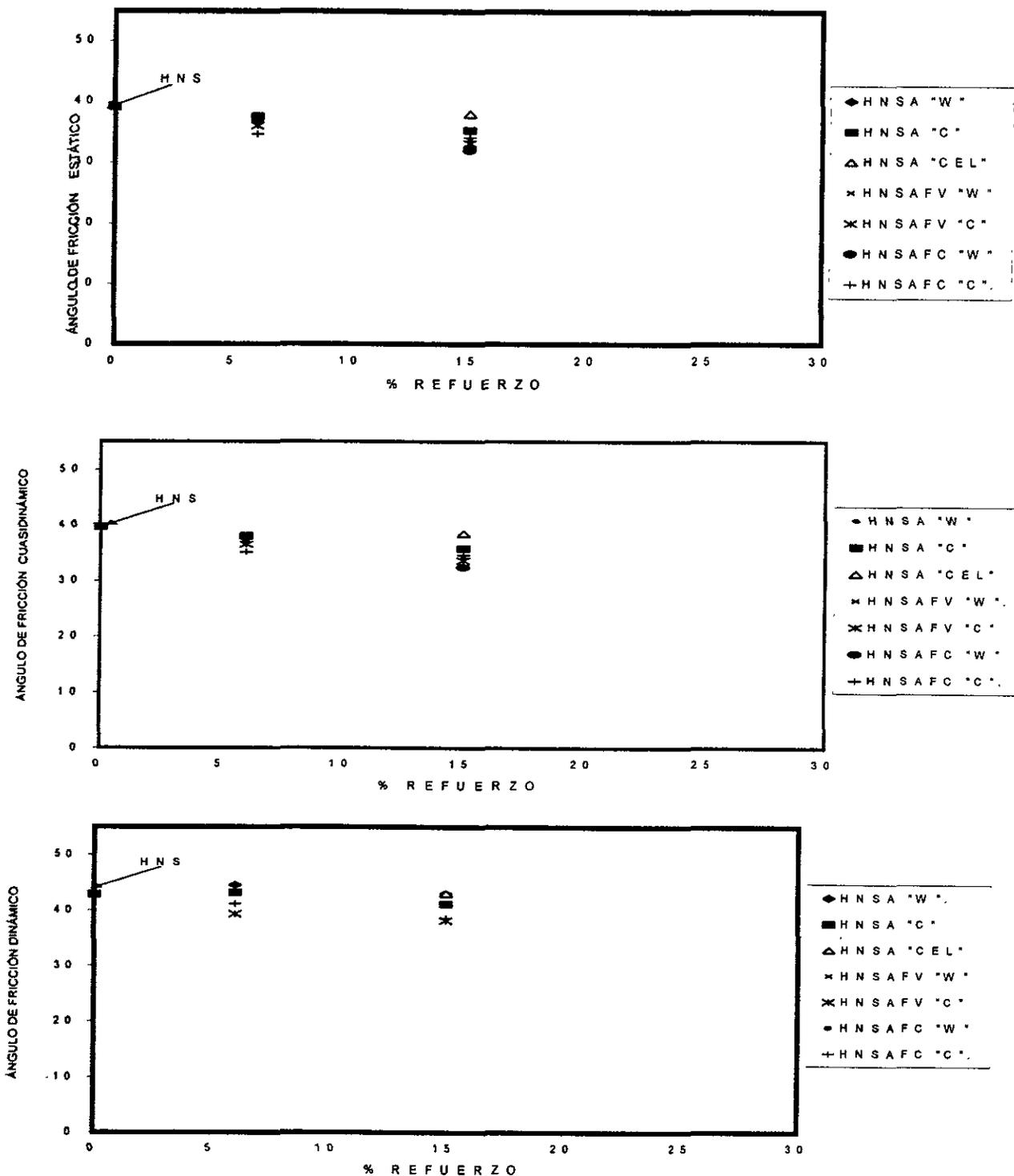


Fig. 4-67 Prueba de fricción a bajas temperaturas aplicada a materiales con matriz de hule natural con una carga de sílica reforzada con arena y arena combinada con fibra de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que el material de refuerzo fue impregnado.

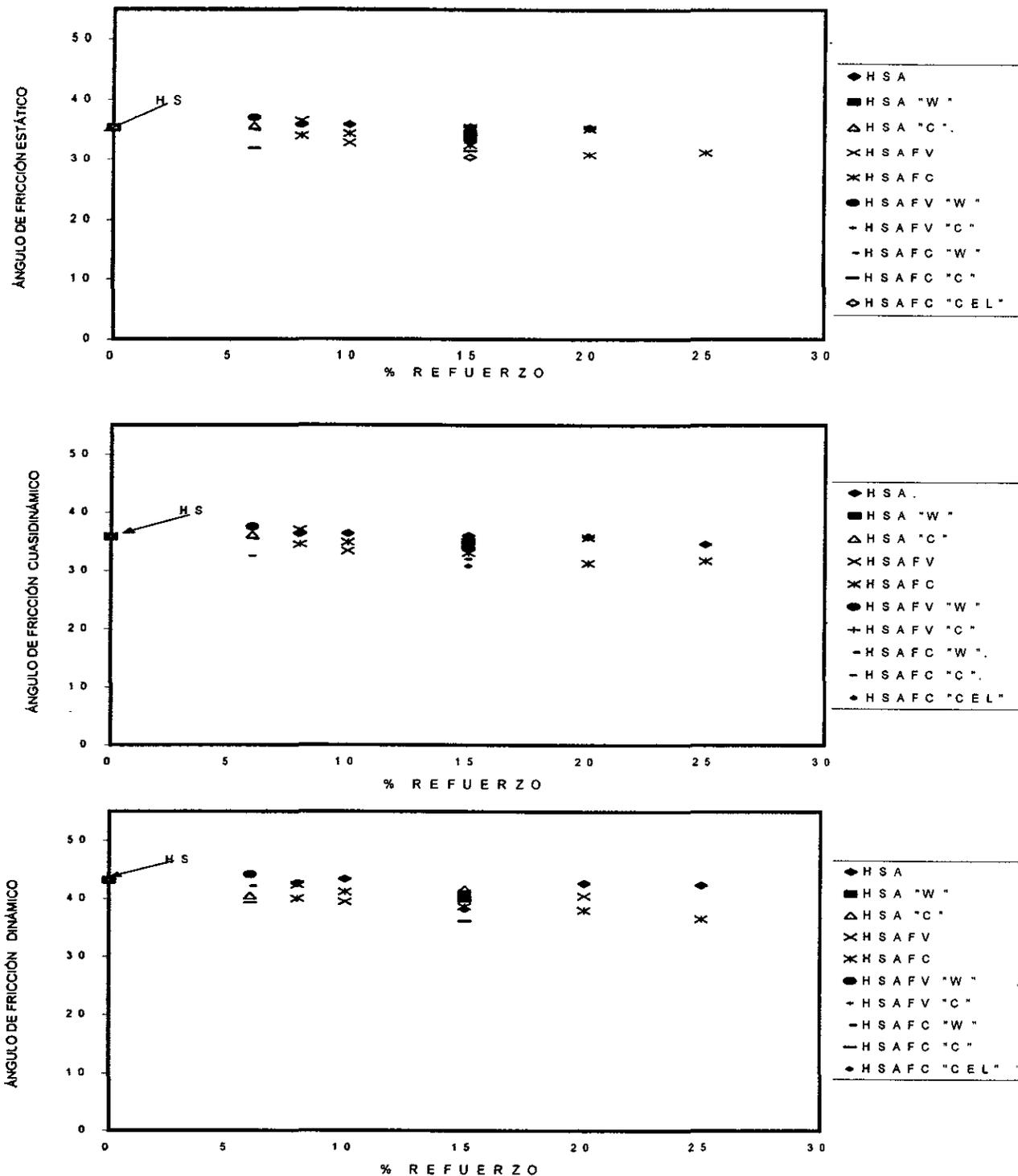


Fig. 4-68 Prueba de fricción a bajas temperaturas aplicada a materiales con matriz de hule sintético reforzado con arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que el material de refuerzo fue impregnado.

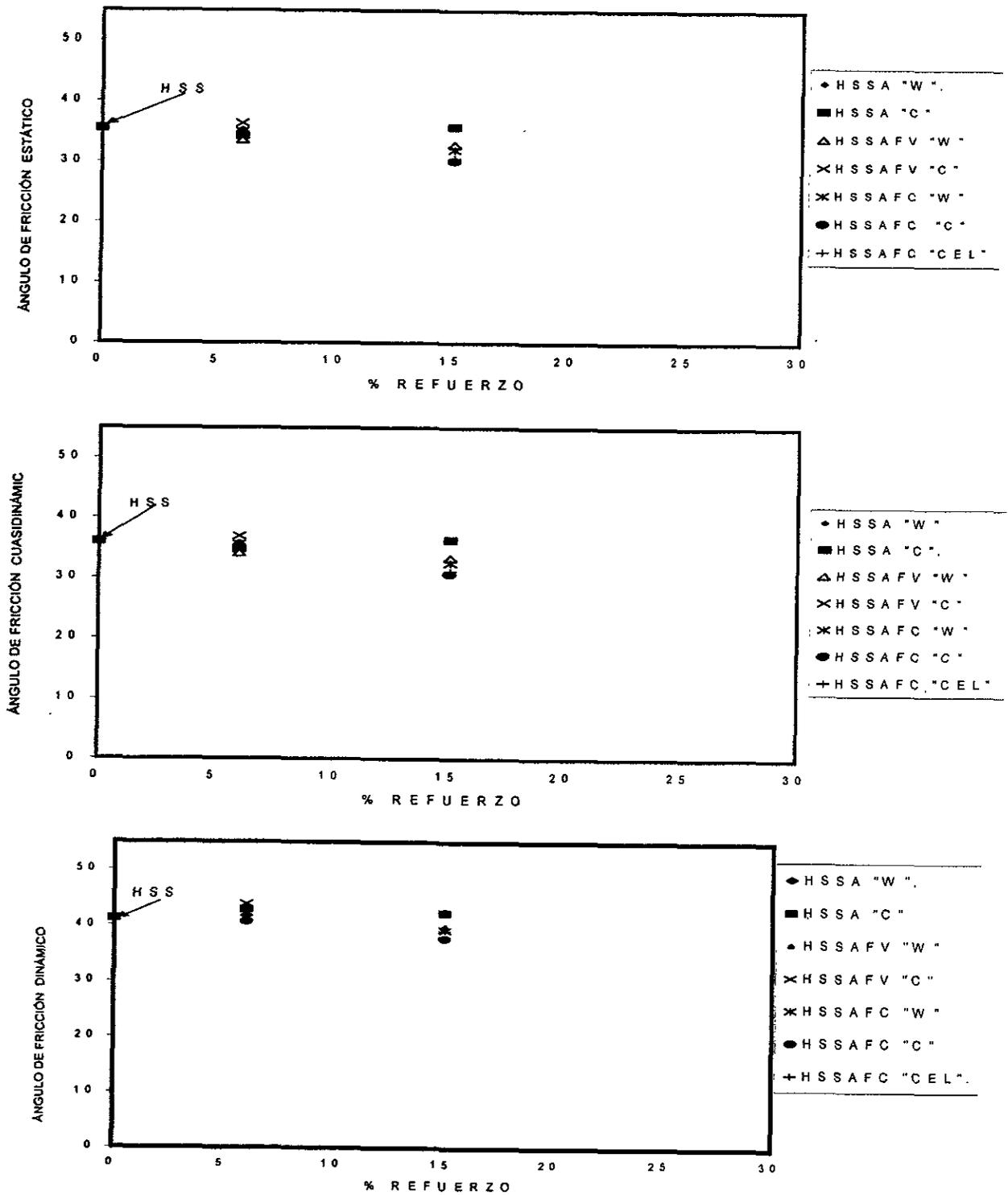


Fig. 4-69 Prueba de fricción a bajas temperaturas aplicada en materiales con matriz de hule sintético con una carga de sílica reforzado con arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que fue impregnado el material de refuerzo.

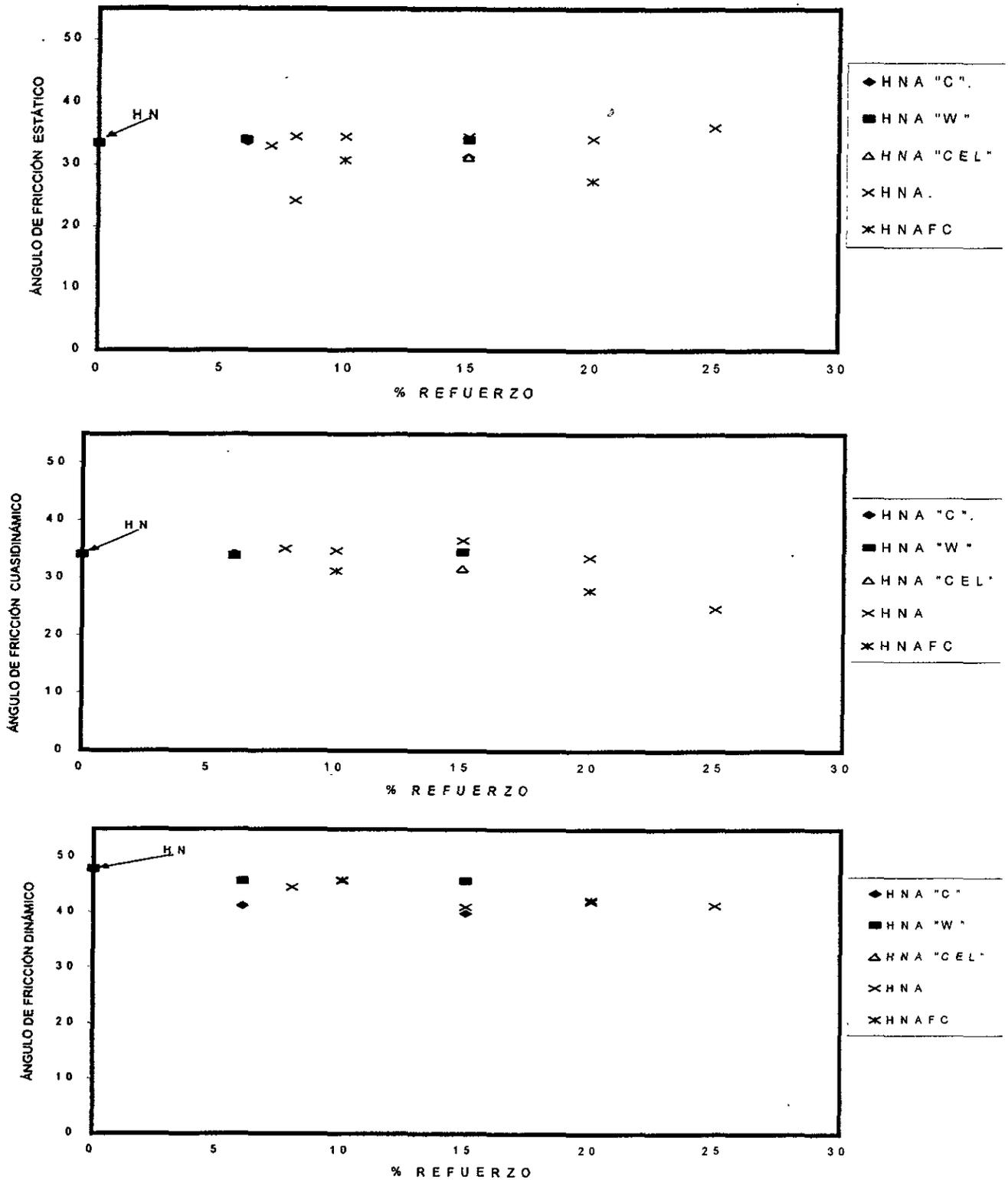


Fig. 4-70 Prueba de fricción a altas temperaturas aplicada a materiales con matriz de hule natural reforzada con arena impregnada con diferentes tipos de adhesivos. Las letras entre comillas representan los tipos de adhesivos.

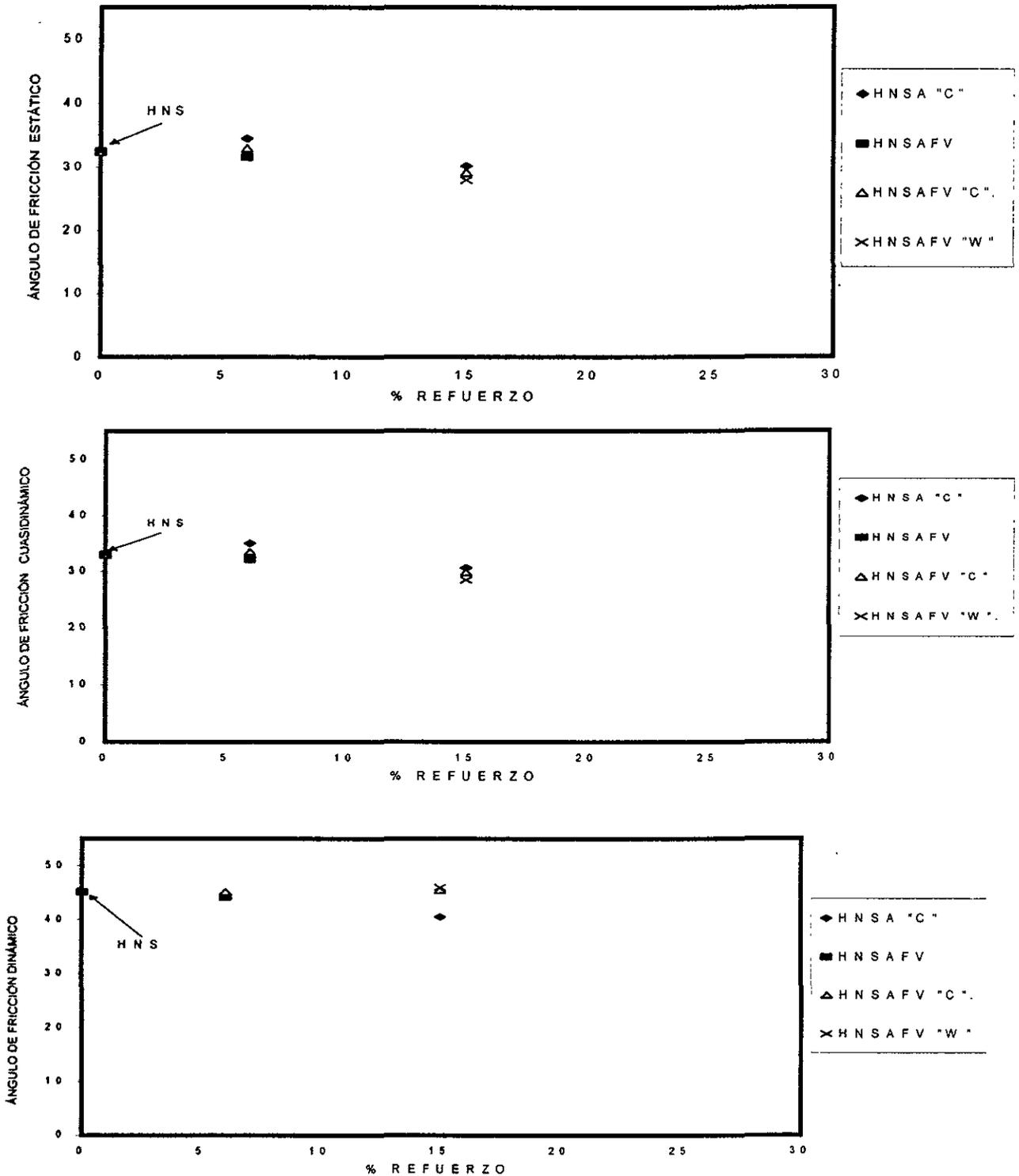


Fig. 4-71 Prueba de fricción a altas temperaturas aplicada en materiales con matriz de hule natural con una carga de sílica reforzada con arena o arena combinada con fibras de vidrio. Las letras entre comillas representan el tipo de adhesivo con que los materiales de refuerzo fueron impregnados.

Tabla 4-18 prueba de fricción a temperatura ambiente con materiales cuya matriz es látex, ángulos en grados

MATERIAL	ESTÁTICO	CUASIDINÁMICO	DINÁMICO
L	38.6	39.3	49.5
LFVst6*	35.8	36.3	48.8
LFVt6**	39.2	39.6	45.5
LFVtA6**	37.0	37.5	48.2
LFCst6*	38.6	39.2	48.0
LFCt**	35.8	36.3	48.2
LS	37.0	37.5	47.6
LSFVst6*	34.6	35.2	46.0
LSFVt6**	37.2	37.6	49.0
LSFCst6*	31.0	31.5	45.2
LSFCt6*	32.3	32.8	50.0
LSAa6***	36.8	37.3	47.6
LSFVtA6**	35.6	36.2	45.0
LSFCtAa6***	39.2	39.6	44.3

La designación completa de los materiales se encuentra en la tabla 3-3,

*st, significa que las fibras no fueron tratadas con tolueno, **t, significa que las fibras tienen un tratamiento de tolueno, ***a, significa que la arena está impregnada con un adhesivo.

Tabla 4-19 Prueba de fricción a temperaturas bajas con materiales cuya matriz es látex, ángulos en grados

MATERIAL	ESTÁTICO	CUASIDINÁMICO	DINÁMICO
L	37.6	38.2	43.5
LA6	28.5	29	42.6
LAFVt **	34.2	34.6	44.8
LS	32.5	33.0	44.0
LSAa6***	33.2	33.6	44.6
LSFVtA6**	33.6	34.2	41.6
LSFCtAa6***	34.8	34.6	39.8

La designación completa de los materiales se encuentra en la tabla 3-3,

t, significa que la fibra tiene un tratamiento de tolueno, *a, significa que la arena está impregnada con un adhesivo

4-10 Prueba de desgaste

Los resultados de esta prueba se presentan en las tablas 4-20 a 4-28. Los resultados se dividieron según el tipo de matriz con que se fabricaron los materiales compuestos. En cada tabla se especifica el tipo de matriz, de refuerzo y de adhesivo que se usaron. Las mediciones presentadas en estas gráficas muestran poca dispersión pues la desviación estándar es de hasta 0.09 %.

La tabla 20 muestra los resultados obtenidos de la prueba de desgaste usando materiales compuestos cuya matriz es de hule natural reforzado con fibras de vidrio o carbono. En ocasiones éstas fueron impregnadas con un adhesivo.

Tabla 4-20 Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA							
%REFUERZO	0	6	6C	6W	6X	8	10	15
HN	4.18							
HNFV	4.18	1.99		3.10	2.28	2.55	2.58	2.70
HNFC	4.18	2.60	5.50		2.08	2.57	4.58	2.02

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

...continúa tabla 4-20

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA					
%REFUERZO	15B	15W	15X	15 CEL	20	25
HN						
HNFV	3.10	2.94	3.09	1.71	2.86	3.54
HNFC		1.76	1.92		1.33	

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-21 presenta los resultados de materiales cuya matriz es hule natural reforzado con arena o arena combinada con alguna fibra de vidrio o carbono. Tanto la arena como las fibras ocasionalmente se impregnaron con algún adhesivo.

Tabla 4-21 Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA								
%REFUERZO	0	6C	6W	10	15	15C	15W	20	25
HNA	4.18		3.10	1.85	2.02	2.39	2.35	2.60	
HNAFV	4.18	5.32			2.52			2.72	2.78
HNAFC	4.18				4.03	1.98	2.04	5.64	

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-22 muestra los resultados de materiales cuya matriz es de hule natural con una carga de sílica reforzada con fibra de vidrio o carbono, las cuales en ocasiones se impregnaron con algún adhesivo.

Tabla 4-22 Prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural con sílica

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA				
	0	6C	6X	15B	15X
HNS	2.39				
HNSFV	2.39		3.22		2.90
HNSFC	2.39	5.70	2.10	1.50	1.92

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-23 presenta los resultados de materiales cuya matriz es de hule natural con una carga de sílica reforzada con arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono. La arena y las fibras en ocasiones se impregnaron con algún adhesivo.

Tabla 4-23 Prueba de desgaste en probetas de matriz de hule natural con sílica

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA							
	0	6C	6W	8	10	15	15C	15W
HNSA	2.39	4.94		2.07	4.58	3.10		
HNSAFV	2.39	3.10					1.58	
HNSAFC	2.39	1.36	0.74				7.13	2.04

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-24 muestra los resultados de materiales cuya matriz es de hule sintético reforzado con fibra de vidrio o carbono, las cuales en ocasiones se impregnaron con algún adhesivo.

Tabla 4-24 Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA						
	0	6	6B	6C	6X	8	10
HS	3.10						
HSFV	3.10	1.18	2.06	4.31	2.10	4.16	2.77
HSFC	3.10			1.27	2.40	2.24	

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

...continúa tabla 4-24

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA							
	15	15B	15C	15X	15CEL	20	25	60
HS								
HSFV	4.03	1.99	1.53	2.88		3.99	4.06	
HSFC	2.25	2.33	3.06	1.83	3.86	2.46	2.50	0.86

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-25 muestra los resultados de materiales cuya matriz es de hule sintético reforzado con arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono. Los refuerzos en ocasiones se impregnaron con algún adhesivo.

Tabla 4-25 Resultados de la prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA					
% REFUERZO	0	6	6C	6W	8	10
HSA	3.10	3.50		2.74		3.86
HSAFV	3.10				1.54	2.85
HSAFC	3.10		3.11			

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

...continúa tabla 4-25

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA					
% REFUERZO	15	15C	15W	15CEL	20	25
HSA	1.01	2.41	1.82		6.95	
HSAFV		3.93			2.61	
HSAFC	6.31			4.89		4.95

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-26 muestra los resultados de materiales cuya matriz es de hule sintético con una carga de sílica reforzada con fibra de vidrio o carbono, las cuales en ocasiones se impregnaron con algún adhesivo.

Tabla 4-26 Prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético con sílica

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA					
% REFUERZO	0	6	6B	6C	6X	15
HSS	2.77					
HSSFV	2.77	1.20	1.57		3.66	1.47
HSSFC	2.77		1.28	1.26		2.56

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

...continúa tabla 4-26

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA				
% REFUERZO	15B	15C	15X	15CEL	60
HSS					
HSSFV		2.97	2.86		1.83
HSSFC	2.33	2.10	2.52	2.56	

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-27 muestra los resultados de materiales cuya matriz es de hule sintético con una carga de sílica reforzada con arena o arena combinada con fibra de vidrio o carbono, los refuerzos en ocasiones se impregnaron con algún adhesivo.

Tabla 4-27 Prueba de desgaste en probetas de matriz de hule sintético con sílica

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA						
	0	6C	6W	15	15C	15W	15 CEL
HSSA	2.77		3.25	5.69			2.41
HSSAFV	2.77	1.60	1.10		2.21	2.26	1.34
HSSAFC	2.77	1.60	0.75		1.28	1.15	1.21

Las letras que acompañan a los porcentajes de los refuerzos significan el tipo de adhesivo que se utilizó

La tabla 4-28 muestra los resultados de materiales cuya matriz es de látex con y sin una carga de sílica reforzada en ambos casos con arena, fibra de vidrio con y sin el tratamiento de tolueno. Las probetas se fabricaron solamente al 6% de refuerzo.

Tabla 4-28 Prueba de desgaste en probetas de látex con y sin sílica

MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA	MATERIAL	% PÉRDIDA DE MASA
L	3.87	LS	3.55
LA	1.12	LSA	6.66
LFVst	1.73	LSFVst	3.45
LFVt	1.41	LSFVt	2.52

%p.m =porcentaje de pérdida de masa

4.11 Pruebas utilizando el microscopio electrónico

De la fig. 4-72 a 4-74 se muestran las fotografías obtenidas en el microscopio electrónico. Aunque se tomaron varias de cada material, sólo se presentan las más representativas.

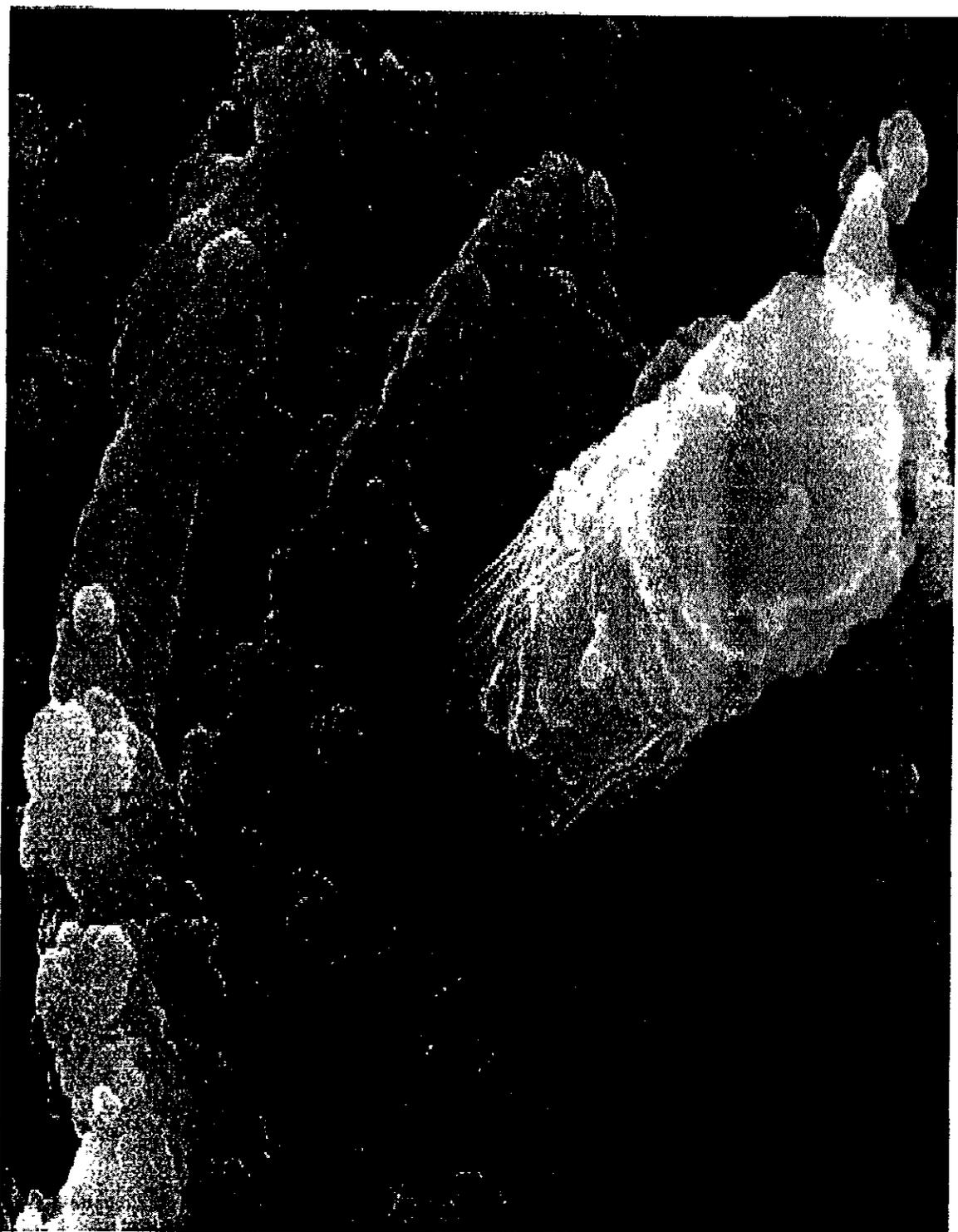


Fig. 4-72 Fotografía obtenida del microscopio electrónico (amplificación: 4857) cuando se observó una probeta de hule natural reforzado con 15% de fibras de vidrio impregnadas con el adhesivo "W" y 15% de arena.

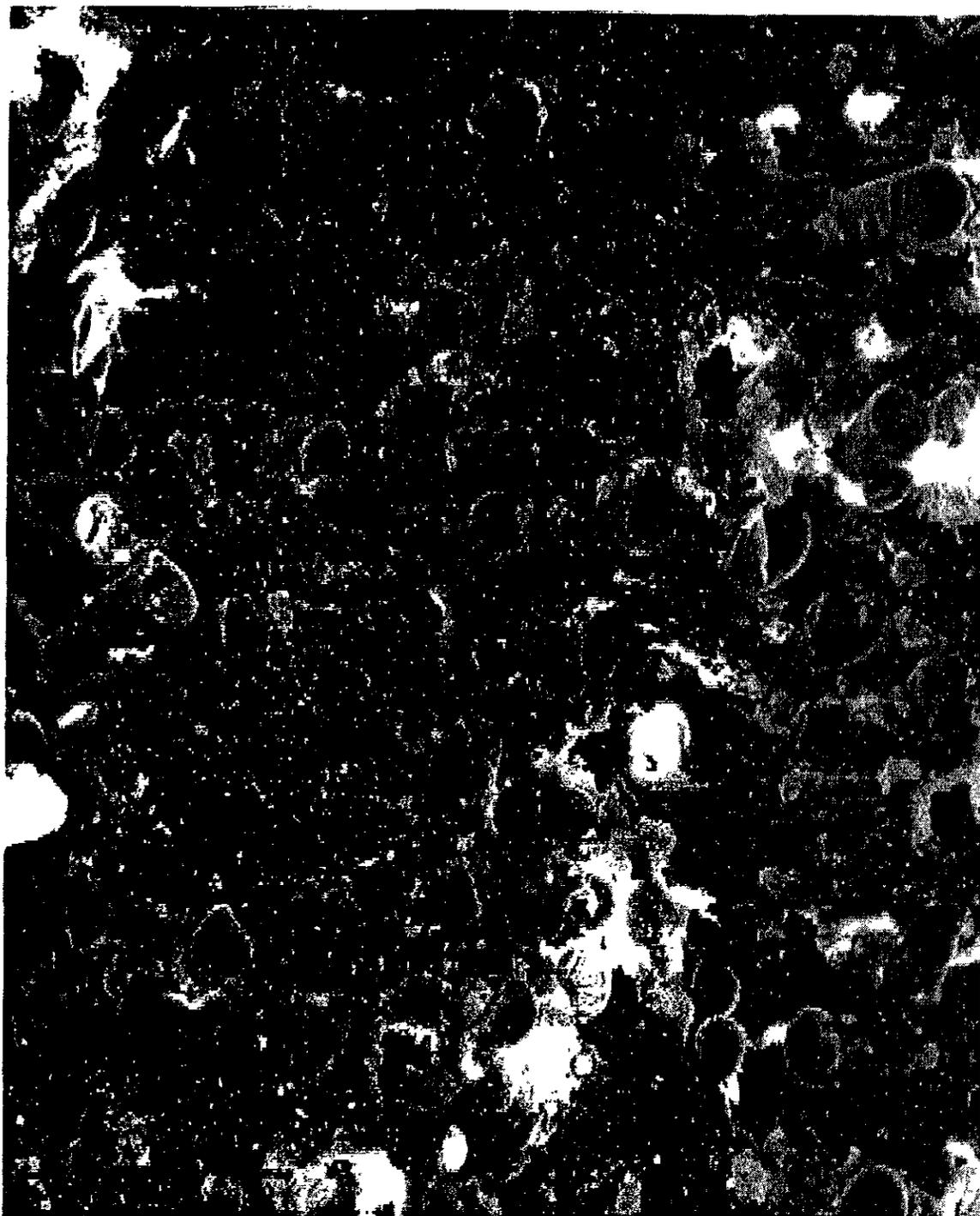


Fig. 4-73 Fotografía obtenida del microscopio electrónico (amplificación: 2445) cuando se observó una probeta de hule natural reforzado con 60% de fibra de vidrio con adhesivo "X" .

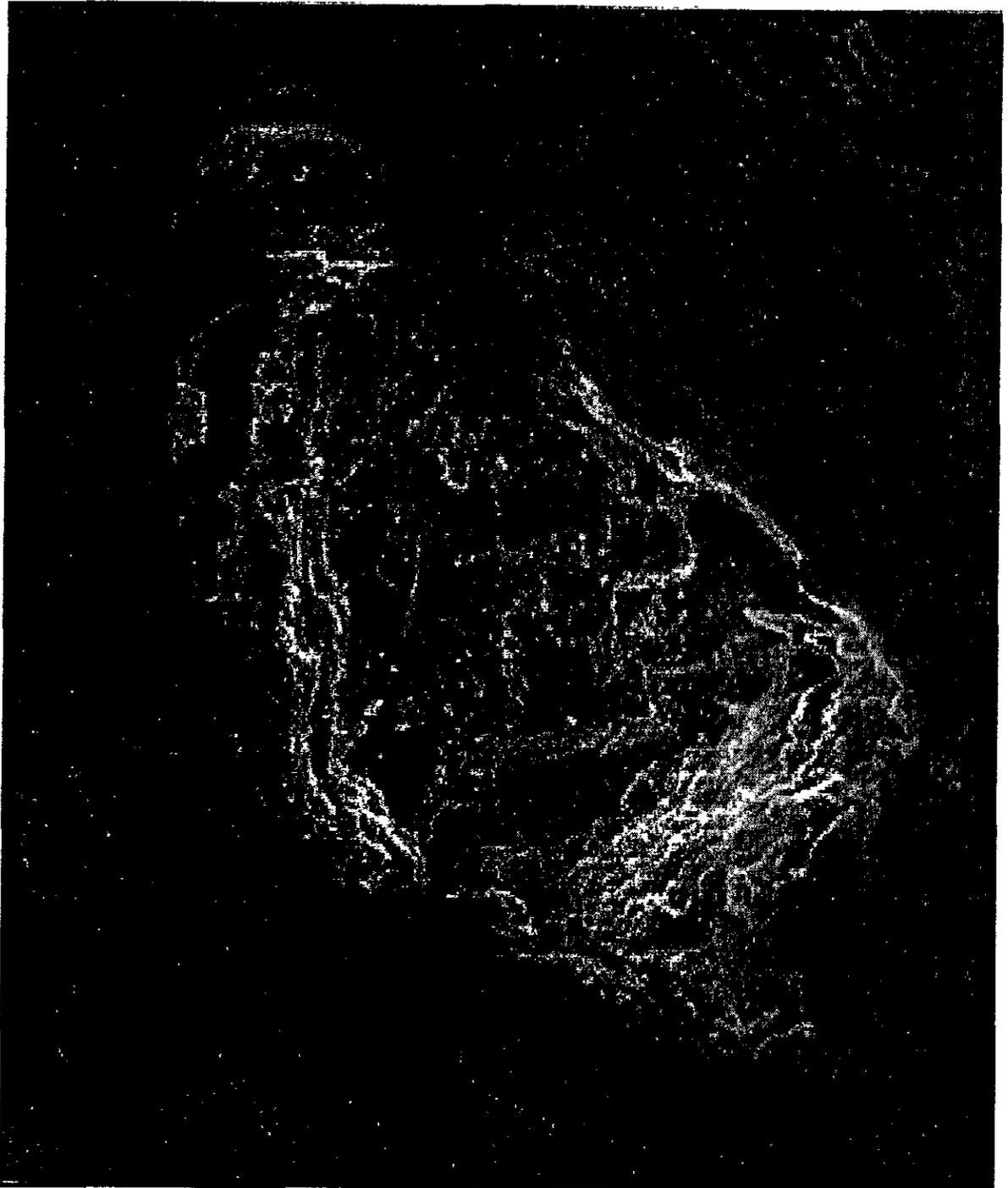


Fig. 4-74 Fotografía obtenida del microscopio electrónico (amplificación: de 3629 aumentos) mostrando un grano de arena de una probeta de hule natural reforzado con 15% de arena impregnada con adhesivo "W" .

4.12 Pruebas utilizando el microscopio óptico



Fig. 4-75 Fotografía obtenida con el microscopio óptico de una muestra de látex reforzado con fibra de carbono. Se utilizó una lente de IC50 que corresponde a una amplificación de 3189.

4.13 Prueba de adhesión de una sola fibra

Esta prueba se llevó a cabo en fibras de vidrio y fibras de carbono con y sin haber sido impregnadas con un adhesivo. Los resultados se presentan en la tabla 4-29.

Tabla 4-29 Adhesión de una sola fibra

	FIBRA DE VIDRIO SIN ADHESIVO	FIBRA DE VIDRIO CON ADHESIVO	FIBRA DE CARBONO SIN ADHESIVO	FIBRA DE CARBONO CON ADHESIVO
Resistencia interfacial τ , MPa	14.07± 2.77	15.06±2.94	18.14± 0.38	1.95±0.25

4.14 Relación entre la histéresis y el módulo de pérdida

La fig. 4-76 muestra una gráfica de la relación entre datos de histéresis y de módulo de pérdida. Los datos de histéresis se obtuvieron de la relación: $H = 100 - \%R$, donde R representa el cociente entre la altura de rebote y la altura de la caída en la prueba de rebote. Los datos de módulo de pérdida se tomaron de los resultados de la prueba realizada con el DMA Dupont (Figs.4-10 a 4-13).

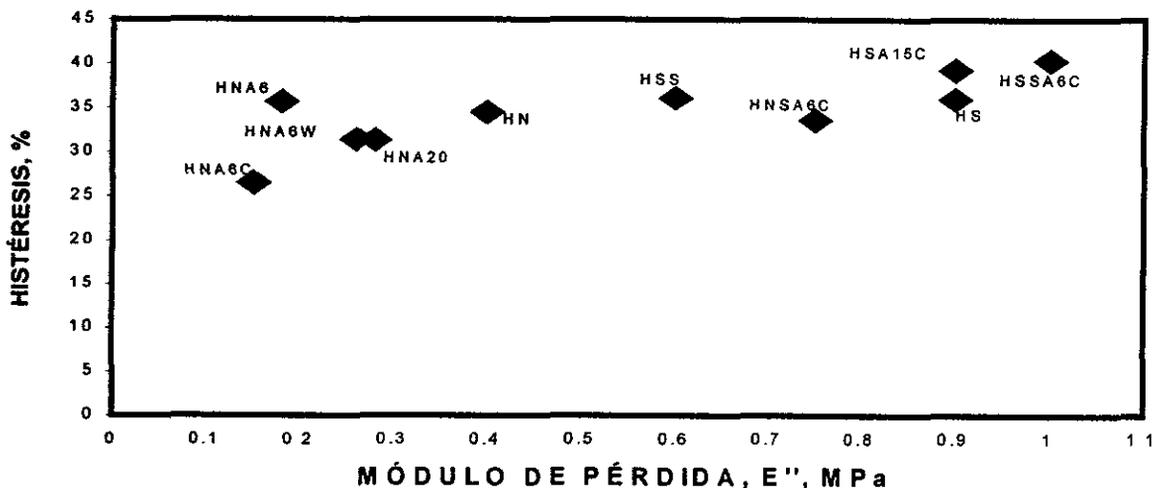


Fig. 4-76 Relación entre la histéresis, obtenida a partir de la prueba de resiliencia, y el módulo de pérdida, obtenido de la prueba del DMA, para diez materiales compuestos diferentes con base elastomérica reforzada con arena impregnada o no con un adhesivo.

4.15 Efecto de la concentración y tipo de refuerzo en el comportamiento mecánico del hule natural y sintético

En las figs. 4-77 y 4-78 se muestran la relación entre el módulo del material compuesto y la fracción del volumen obtenidos después de aplicar la fórmula (1) del capítulo 2 con los datos experimentales y se comparan con los resultados experimentales de la prueba de tensión. La fig. 4-77 corresponde a resultados de probetas reforzadas con fibras de vidrio y la fig. 4-78 a fibras de carbono.

De las observaciones hechas en el microscopio electrónico se obtuvieron los diámetros de las fibras de vidrio y de carbono. Usando estos valores fue posible calcular las longitudes finales en que quedan las fibras después del proceso de mezclado a partir de las fotografías obtenidas en el microscopio óptico. Así se obtuvo el factor L/D .

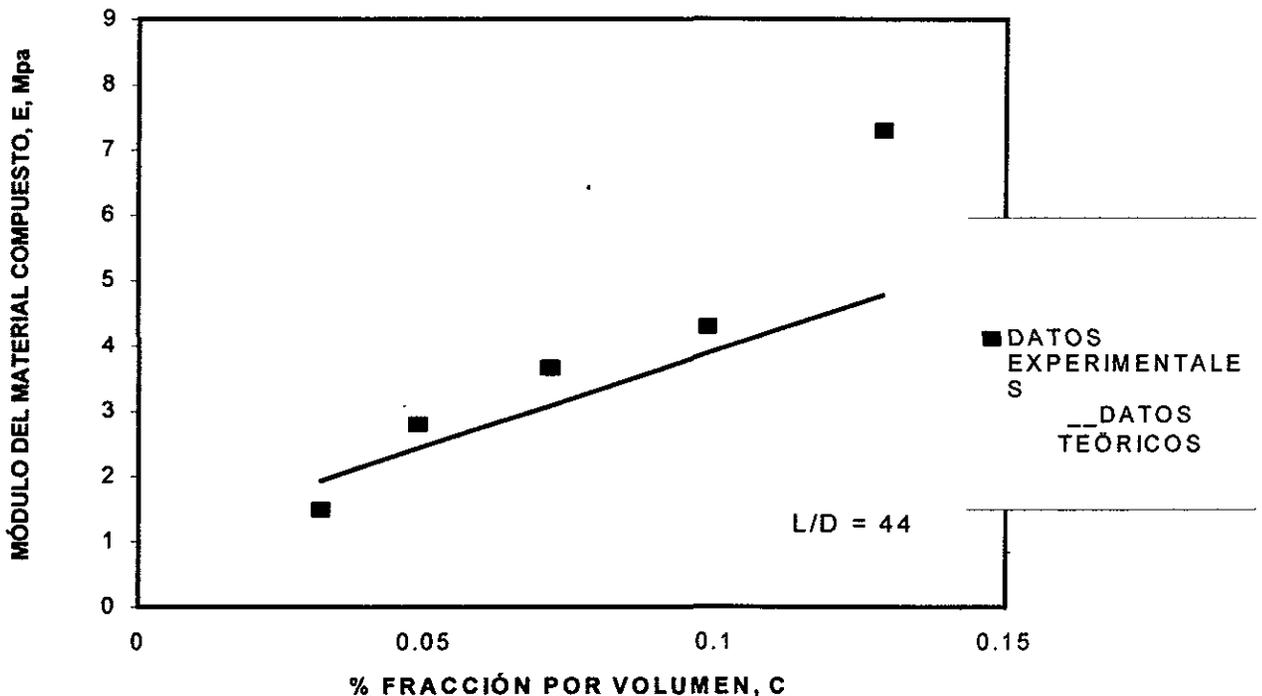


Fig. 4-77 Comparación entre módulos elásticos teóricos y los obtenidos experimentalmente, para probetas reforzadas con fibras de vidrio.

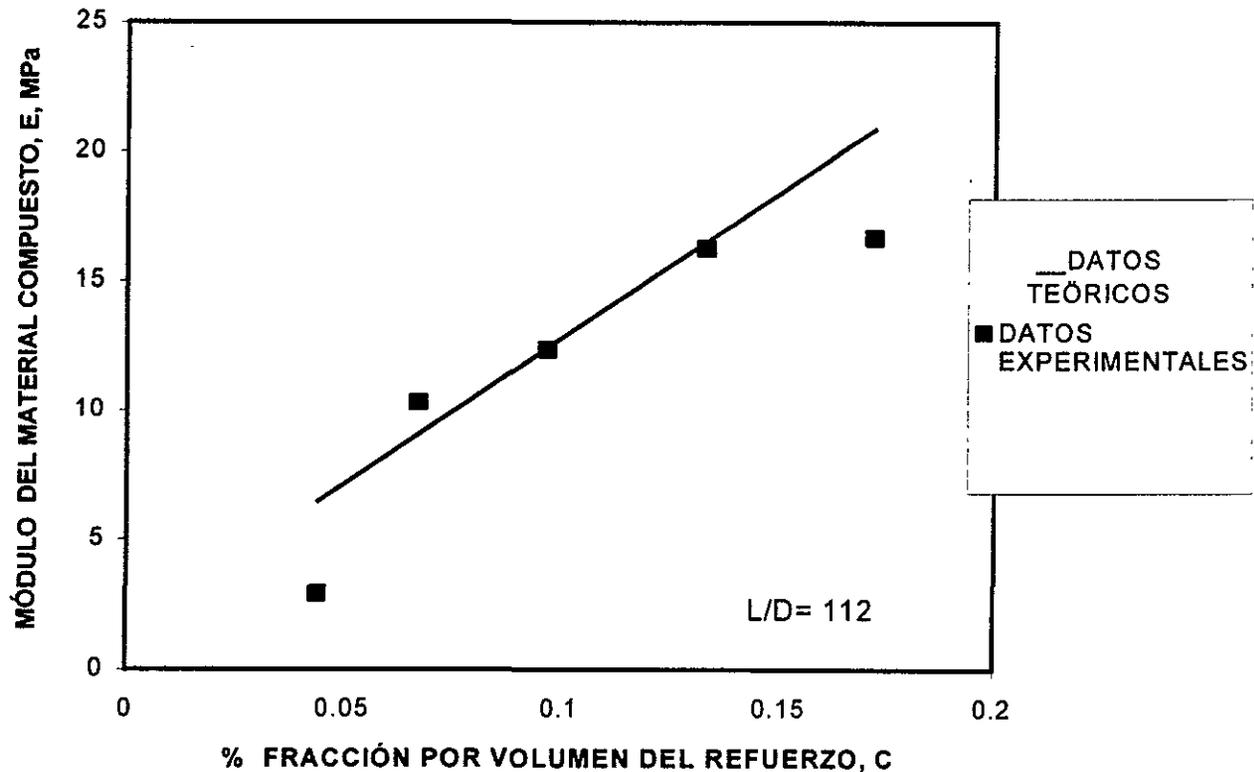


Fig. 4-78 Comparación entre módulos elásticos teóricos y los obtenidos para probetas reforzadas con fibras de carbono

4.16 Relación de la prueba de dureza con las otras pruebas

La figura 4-79 muestra en forma comparativa los resultados obtenidos por Powell (1990) y los obtenidos en esta investigación. En ambos casos las propiedades se obtuvieron a temperatura ambiente. Los materiales utilizados tienen en común la matriz de hule natural.

La fig. 4-80 muestra la relación entre los resultados de la prueba de dureza y los de resiliencia. Los materiales tienen en común la matriz de hule natural y que los refuerzos, aunque diferentes, todos están en una proporción de 20%.

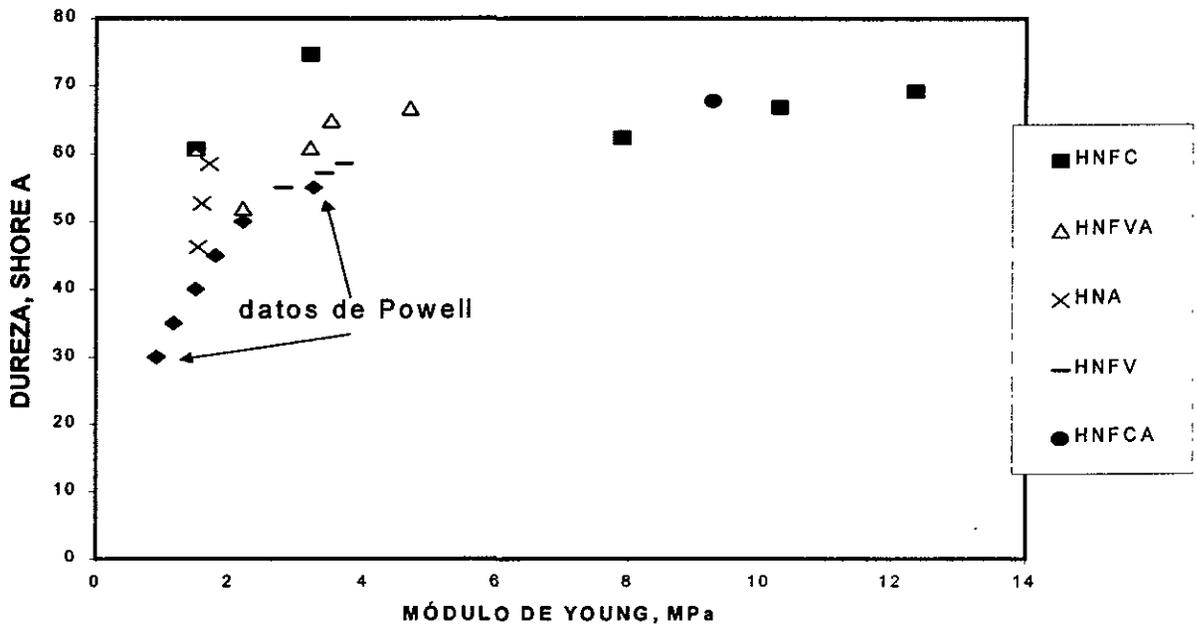


Fig. 4-79 Relación dureza contra módulo de Young a partir de las pruebas realizadas en esta investigación y datos de Powell (1990).

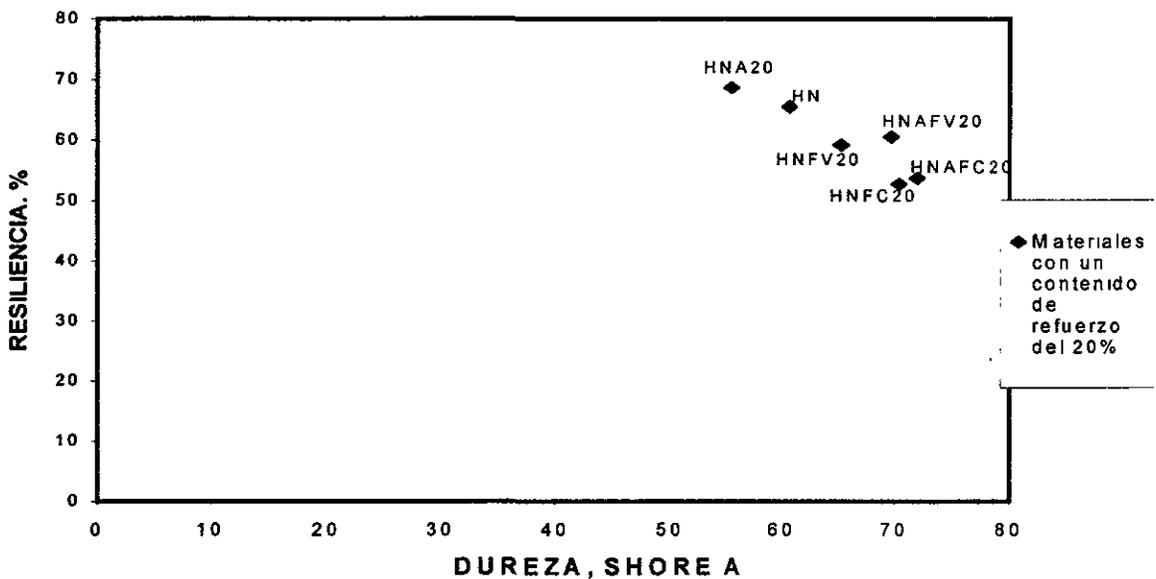


Fig. 4-80 Relación entre los valores obtenidos de las pruebas de resiliencia y dureza, entre materiales con matriz de hule natural y diversos refuerzos. Éstos con un contenido del 20% (los nombres completos de los materiales se pueden ver en la tabla 3-3).

CAPÍTULO 5

Interpretación de Resultados

5.1.1 Análisis dinámico mecánico

De las figs. 4-1 a 4-5 se tomaron los datos más relevantes de la prueba DMA realizada en el equipo 2980 TA Instruments y se presentan en la tabla 5-1.

Tabla 5-1 Datos generados en el DMA 2980 TA Instruments correspondientes a las figs. 4-1 a 4-5

Material	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\tan\delta,$ a la T_g	Valores a temperaturas de operación de las llantas (20-70° C)		
			$\tan\delta$	Módulo de almacenamiento, MPa	Módulo de Pérdida, MPa
HN	-33.71	1.97	0.0303	2.275	0.07
HNA6	-33.27 ↑	1.97 —	0.0400 ↑	2.262 ↓	0.09 ↑
HNFV6	-33.88 ↓	1.85 ↓	0.0480 ↑	3.120 ↑	0.15 ↑
HNS					
HNSFVA6	-31.92	1.80	0.0180	4.282	0.08

Los nombres completos de los materiales se encuentran en la tabla 3-3.

En esta tabla 5-1 se presentan algunos resultados de materiales que tienen en común una matriz de hule natural y diferentes tipos de refuerzos. Para facilitar la apreciación del comportamiento de éstos, en la tabla se colocaron flechas indicadoras de las tendencias de los valores correspondientes (la flecha indica hacia arriba si el valor aumenta y hacia abajo si el valor disminuye). Para resaltar los resultados de la matriz de hule sin refuerzos, el renglón se sombreó ligeramente.

Se aprecia que el HNSFVA6 presenta una $\tan\delta$ menor que la del hule natural en todo el rango de temperatura. La combinación de ingredientes con que se elaboró este material compuesto hizo posible también reducir la temperatura de transición en 1.79°C en comparación con el hule natural. A las temperaturas de operación de las llantas, el módulo de almacenamiento (representante de la rigidez del material) del HNSFVA6 es 88.2% mayor que el del hule natural y este es un efecto debido al contenido de fibra de vidrio. Se confirma que la fibra de vidrio tiene un efecto positivo en el incremento del módulo de almacenamiento porque al analizar los resultados en el material HNFV6 se nota que el módulo de almacenamiento resultó 37.14% mayor que el del hule natural. El HNA6 fue el material que mostró algunos efectos negativos en comparación con el hule natural. El valor de la $\tan\delta$ (a temperaturas arriba de 0°C) resultó 58.5% mayor que el obtenido en el hule natural.

Comparando únicamente las matrices HN, HNS, HS y HSS se aprecia que, a la T_g , el HS es el material que presenta la menor $\tan\delta$ y el HN la mayor. Se observa que al disminuir la $\tan\delta$ el efecto de la sílica en el HN es favorable y a la inversa en el HS. El HSSFC15"X" y el HSFC15"X" presentaron la T_g más alta entre todos los materiales de las gráficas, aunque la $\tan\delta$ del primero de éstos, solo fue 10.5% menor que su matriz el HSS. El segundo en cambio resultó 30.7% mayor que su matriz correspondiente el HS. El HSFC6 presentó los valores más bajos tanto en T_g como en $\tan\delta$. De los resultados obtenidos en estos tres materiales se aprecia que tanto la fibra de carbono como el adhesivo en que ésta está impregnada tienen un efecto positivo en la reducción de la $\tan\delta$ y en el aumento de la T_g respectivamente.

También se hace evidente que la fibra de carbono incrementa el módulo de almacenamiento principalmente en los materiales que contienen una carga de sílica.

En la tabla 5-2 se muestran los resultados obtenidos de las gráficas de las figs. 4-6 a 4-9 correspondientes a la prueba de DMA en el equipo Dupont. Para una mejor identificación, en la tabla se colocaron flechas indicadoras de la tendencia del aumento o disminución de los valores representados y para resaltar los resultados de la matriz sola, éstos se sombreadon ligeramente.

Tabla 5-2 Datos generados en el DMA Dupont correspondientes a las figs. 4-6 a 4-9

Material	$T_g, ^\circ\text{C}$	VALORES OBTENIDOS A LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN T_g		
		$\tan\delta$	MÓDULO DE ALMACENAMIENTO MPa	MÓDULO DE PÉRDIDA MPa
HN	-40	2.00	2.7	5.40
HNFC6	-48 ↓	1.65 ↓	4.1 ↑	6.76 ↑
HNFV15"X"	-39 ↑	1.40 ↓	1.4 ↓	1.96 ↓
HNS	-41	1.77	1.2	2.12
HNSFC6	-41	1.70 ↓	3.7 ↑	6.29 ↑
HS	-42	1.35	0.7	0.95
HSFC6	-52 ↓	0.85 ↓	1.1 ↑	0.94 ↓
HSFC15"X"	-36 ↑	1.70 ↑	1.3 ↑	2.21 ↑
HSS	-42	1.90	3.5	6.65
HSSFC15"X"	-36 ↑	1.70 ↓	4.3 ↑	7.31 ↑

Los nombres completos de los materiales se encuentran en la tabla 3-3.

De la tabla 5-2 A la temperatura de transición se aprecia que la matriz de HSS, comparando con las otras matrices, posee el módulo de almacenamiento más alto (3.5 MPa) y la de HS el más bajo (0.7 MPa). El efecto de la carga de sílica en el hule sintético es más fuerte e inverso que en el hule natural, ya que en el HN el módulo de almacenamiento disminuye de 2.7 MPa a 1.2 MPa. En cuanto a los

materiales con refuerzos de fibras, es evidente que la fibra de carbono ejerce un efecto positivo en todas las matrices. El efecto más notable fue para la matriz de HNS pues al ser reforzada con 6% de fibra de carbono su módulo aumentó 308%. El efecto de la fibra de vidrio en el hule natural fue negativo pues tuvo una disminución del 48.15% con respecto al módulo de su matriz, aunque este decremento se puede deber también al hecho de que la fibra fue impregnada con el adhesivo "X" que en este caso presenta un comportamiento de plastificante, el cual en lugar de aumentar la rigidez del material la disminuye.

Comparando únicamente las matrices HN, HNS, HS y HSS se aprecia que, a la T_g , el HS es el material que presenta la menor $\tan\delta$ y el HN la mayor. Se observa que al disminuir la $\tan\delta$ el efecto de la sílica en el HN es favorable ya que disminuye la $\tan\delta$ y a la inversa en el HS. Un resultado inesperado fue que el módulo de almacenamiento de la matriz de HSS fue mucho mayor que la del HS sólo (lo cual requiere de una verificación posterior). En el caso del HN el efecto de la sílica fue inverso.

De las gráficas de las figs. 4-6 a 4-9 no se puede establecer con claridad los valores exactos de $\tan\delta$ a las temperaturas de operación de las llantas, sin embargo se puede determinar el lugar que ocupan las curvas de los diferentes materiales y con eso concluir cual material posee la menor $\tan\delta$ y como consecuencia la menor disipación de energía. Con respecto al valor de la $\tan\delta$, a las temperaturas de operación de las llantas (entre 20° C y 70° C), se observa que en la fig. 4-6 el valor más alto le corresponde al HNFV15"x" y en orden descendente el más bajo le corresponde HSSFC6. En la fig. 4-8, la curva del HSS es la que tiene el valor más bajo y en orden creciente el más alto le corresponde al HSFC6.

Comparando los resultados presentados en las tablas 5-1 y 5-2, se aprecia que los valores de T_g de las matrices resultaron distintos y esto se puede deber a las diferencias en los aparatos con que se realizaron las pruebas y a la diferencia en el tamaño de las muestras utilizadas en cada uno de ellos.

Algunos resultados de las figs. 4-10 a 4-13 se presentan en la tabla 5-3. Los valores de T_g de las matrices que se presentan en la tabla 5-2 son diferentes a los de la tabla 5-3 a pesar de que esta vez las pruebas se llevaron a cabo en el mismo equipo. Esto se puede deber a algunas diferencias en las condiciones de operación en que se realizaron las pruebas. Los valores de T_g obtenidos en la prueba de TMA, en la mayoría, coinciden con los valores de T_g presentados en la tabla 5-3. Para una mejor identificación, en la tabla se colocaron flechas indicadoras de la tendencia del aumento o disminución de los valores representados y para resaltar los resultados de la matriz sola, éstos se sombrearon ligeramente.

En la tabla 5-3 se observa que la T_g resultó uniforme para todos los materiales (-50° C) con excepción del HN y HNSA15"W" en que la temperatura disminuyó en cinco unidades con respecto a los otros materiales. Los resultados de T_g de las matrices que se presentan en la tabla 5-2 son diferentes a los de la tabla 5-3 a pesar de que esta vez las pruebas se llevaron a cabo en el mismo equipo. Esto puede variar debido a algunas diferencias en las condiciones de operación en que se realizaron las pruebas. De la tabla 5-3 se aprecia que para los valores de $\tan\delta$, a la temperatura de transición, el HNA8 presentó el mayor valor (2.45) y el más bajo (1.1) correspondió al HSSA6"C" y al HSSA15"W". A las temperaturas de operación de las llantas, la matriz de HS obtuvo el valor más alto de $\tan\delta$ (0.3) sin embargo cuando ésta fue reforzada con 15% de arena impregnada del adhesivo "C", la $\tan\delta$ disminuyó en un 60% (0.18). Es evidente que la arena produce una reducción de la histéresis, desafortunadamente, no se cuenta con una prueba de este material sin haber sido impregnado por un adhesivo para poder evaluar el efecto del mismo. La $\tan\delta$ del hule natural en el mismo rango de temperaturas fue de 0.2. Se observa que cuando éste fue reforzado con arena, en cualquiera de sus casos, hubo un efecto positivo, siendo el más notable cuando se reforzó con 6% de arena impregnada con adhesivo "C", pues hubo una disminución de $\tan\delta$ de un 75% de la cual el 10% corresponde al efecto del adhesivo.

Tabla 5-3 Datos generados en el DMA Dupont correspondientes a las figs. 4-10 a 4-13

Material	$T_g, ^\circ\text{C}$	tan δ	Valores a las temperaturas de operación de las llantas (20-70° C)		
			tan δ	MÓDULO DE ALMACENAMIENTO, MPa	MÓDULO DE PÉRDIDA, MPa
HN	-55	2.0	0.20	2.0	0.40
HNA6	-50 ↑	2.25 ↑	0.07 ↓	2.5 ↑	0.18 ↓
HNA6W	-50 ↑	2.25 ↑	0.07 ↓	3.7 ↑	0.26 ↓
HNA6C	-50 ↑	2.25 ↑	0.05 ↓	3.0 ↑	0.15 ↓
HNA8	-50 ↑	2.45 ↑	0.10 ↓	2.6 ↑	0.26 ↓
HNA20	-50 ↑	2.25 ↑	0.08 ↓	3.5 ↑	0.28 ↓
HNS					
HNSA6C	-50	2.25	0.25	3.0	0.75
HNSA15W	-55	2.25	---	3.0	
HS	-50	1.25	0.30	3.0	0.90
HSA15C	-50	1.0 ↓	0.18 ↓	5.0 ↑	0.90
HSS	-50	1.25	0.20	3.0	0.60
HSSA6C	-50	1.1 ↓	0.25 ↑	4.0 ↑	1.00 ↑
HSSA15W	-50	1.1 ↓	0.1 ↑	4.0 ↑	0.40 ↓

Los nombres completos de los materiales se encuentran en la tabla 3-3.

No se cuenta con el valor de tan δ para la matriz de HNS, por lo que no se puede establecer claramente el efecto del material cuando se refuerza con la arena. Con el HSS la tan δ resultó igual que para el HN. Cuando esta matriz fue reforzada con 15% de arena impregnada con el adhesivo "W", hubo un efecto positivo representado en una reducción del 50% en la tan δ , sin embargo el efecto fue inverso cuando la matriz se reforzó con 6% de arena impregnada por el adhesivo "C". En general, se puede decir que, la arena es un material de refuerzo que contribuye a reducir considerablemente la histéresis de las matrices elastoméricas.

5.1.2 Análisis termomecánico

Los resultados de esta prueba se presentan en las figs. 4-14 a la 4-21. La T_g se identifica en las gráficas por el cambio de pendiente positiva a negativa de la curva de cambio de dimensión. Aproximando el segmento inicial como una recta, se extiende ésta hasta interceptar la extensión del segmento, también aproximadamente recto, correspondiente al descenso rápido de la curva, la T_g es el valor de la abscisa de dicha intersección (fig. 4-14).

En la fig. 4-14 se aprecia que la T_g para el HN se encuentra a -50°C y se observa que la probeta mantiene sus dimensiones esencialmente constantes desde el inicio de la prueba (-100°C) hasta -59.6°C , a partir de donde cede a la fuerza aplicada de 1N deformándose $78\ \mu\text{m}$. Al incrementarse la temperatura el material tiende a recuperarse de la deformación. Esto ocurre porque las cadenas poliméricas del elastómero almacenan cierta energía que les permite un poco de movilidad necesaria para lograr acomodarse. Al rebasar la T_g , el material cambia de su estado vítreo al viscoelástico o "rubbery state". El pico máximo de la curva de la derivada del cambio de dimensión proporciona el punto donde ocurre la máxima deformación. Pasando el pico no se observan grandes cambios, lo cual es indicativo de un material sin refuerzo.

La fig. 4-15 presenta el comportamiento del HN reforzado con 6% de arena. La T_g de este material también se encuentra a los -50°C . El cambio de dimensión comienza a los -57.93°C , temperatura menor que la correspondiente al HN. La deformación resultó mayor que la del HN y aunque, con el aumento de temperatura este material compuesto inicia su recuperación, ésta no se mantiene y posteriormente, vuelve a caer la curva. El efecto de la arena en apariencia resultó negativo, quizás debido a una pobre adhesión entre ésta y la matriz. También se aprecia que la curva de la derivada presenta ligeras perturbaciones que indican la presencia de la arena.

La fig. 4-16 muestra el comportamiento del HN reforzado con 6% de arena y 6% de fibra de vidrio. La T_g de este material también se encuentra a los -50°C y el cambio de dimensión da inicio a los -59.13°C . En esta gráfica se aprecia de inmediato que la deformación del material compuesto ($60\ \mu\text{m}$) es menor que la de la matriz de HN ($78\ \mu\text{m}$). También resulta evidente que el efecto de la fibra de vidrio contrarresta el efecto de la arena. Este material compuesto, después de lograr su máxima deformación al igual que el HN, se recupera conforme la temperatura aumenta aunque al llegar a los 150°C vuelve a caer.

La figura 4-17 presenta los resultados del HN reforzado con 6% de fibra de carbono y 6% de arena. La T_g se encuentra a -50°C . Este material compuesto cede a los -58.33°C (un grado más que el HN y que el HNFVA6) desarrollando una deformación de $50\ \mu\text{m}$, la cual es menor que la de cualquiera de los materiales antes mencionados. De la gráfica se aprecia una mayor recuperación en comparación con el HNFVA6. Es evidente que el efecto de la fibra de carbono contrarresta el efecto de la arena y le proporciona al material compuesto una mayor rigidez. La curva de la derivada del cambio de dimensión muestra una protuberancia a los 80°C , atribuible probablemente a la heterogeneidad resultante de la presencia de los refuerzos.

La fig. 4-18 muestra el comportamiento de la matriz de HS. La T_g se encuentra a los -44.4°C (5.6°C más alta que los materiales que tienen matriz de HN). El cambio de dimensión ocurre a los -53.3°C obteniendo una deformación de $60\ \mu\text{m}$ seguida por una recuperación que llega a su máximo a los 50°C manteniéndose constante hasta los 125°C donde comienza a decrecer nuevamente. Entre este hule y el hule natural hay una diferencia de $18\ \mu\text{m}$ lo cual demuestra que el hule sintético se deforma menos que el HN aunque su recuperación resulta ser menos pronunciada. De la curva de la derivada del cambio de dimensión, se nota que justo en las temperaturas de operación de la llanta aparecen varias irregularidades difíciles de explicar.

La fig. 4-19 presenta el comportamiento del HS reforzado con 6% de arena. La T_g de este material compuesto se encuentra a los -50°C . Uno de los efectos de la arena en la matriz de HS fue el de disminuir la T_g en 5.6°C . Se aprecia que el cambio de dimensión comienza a los -54.5°C con una deformación máxima de $75\mu\text{m}$. Otros efectos son la supresión de la zona de recuperación, y la reducción de la rigidez de la matriz. La curva de la derivada del cambio de dimensión muestra que a lo largo de todo el rango de temperatura ocurren cambios que se pueden deber a que entre la matriz y la arena no existe una unión perfecta.

La fig. 4-20 muestra el comportamiento del HS reforzado con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena. La T_g de este material compuesto se encuentra a los -45.7°C o sea 4.3°C más alta que su matriz de HS. El cambio de dimensión comienza a los -59.13°C con una deformación de $50\mu\text{m}$, ésta se detiene y se mantiene constante a partir de ahí. Si bien la deformación de este material resultó menor que la de su matriz en $10\mu\text{m}$ y en $28\mu\text{m}$ con respecto al hule natural, su recuperación no es tan notable como lo es en los materiales que tienen una matriz de hule natural. Esto se puede relacionar con la dureza del material compuesto. El efecto más sobresaliente de la presencia de la fibra de vidrio es la restitución de la fase de recuperación suprimida por la arena. La curva de la derivada del cambio de dimensión muestra diversos cambios a lo largo del rango de temperaturas que probablemente se debe a la falta de homogeneidad del material.

La fig. 4-21 muestra el efecto causado a la matriz de hule sintético al ser reforzado con 6% de fibra de carbono y 6% de arena. En esta gráfica se aprecia que la T_g se encuentra a los -47.2°C . Se observa claramente el efecto de la fibra de carbono la cual aumenta la T_g con respecto a la de la matriz de HS en 2.8°C . En este material compuesto, el cambio de dimensión comienza a los -56.5°C con una deformación total de $44\mu\text{m}$, o sea, $6\mu\text{m}$ menos que el HSFVA6 y $16\mu\text{m}$ menos que la matriz de HS. Estos valores indican que este material es más rígido. Cuando la deformación se detiene, ésta permanece sin exhibir una recuperación posterior. También la fibra de carbono restituye la fase de recuperación suprimida

por la arena. La curva de la derivada del cambio de dimensión presenta diversos cambios a lo largo del rango de temperatura lo cual es un indicador de la heterogeneidad del material.

5.1.3 Análisis dieléctrico

De esta prueba se obtuvieron resultados de $\tan\delta_d$, y datos de permitividad y de factor de pérdida.

De la fig. 4-22 se aprecia que la curva de $\tan\delta_d$ parece como una recta constante sobre la línea cero hasta los 50° C. A partir de ahí se nota un incremento que es mayor a menor frecuencia.

La fig. 4-23 muestra en detalle la curva de la fig. 4-22 donde se observa que existe una transición que ocurre entre -60° C y -50° C.

La fig. 4-24 presenta el comportamiento de la matriz de hule natural reforzada con 6% de fibra de vidrio y 6% de arena. Desafortunadamente, no se cuenta con una curva generada con HN reforzado sólo con arena, por lo que no se podrá establecer con claridad el efecto ejercido por la fibra de vidrio independientemente de la arena. De la gráfica se observa que el comportamiento es muy parecido al del HN con excepción de una leve caída antes de iniciar una zona de rápido ascenso.

La fig. 4-25 muestra en detalle las mismas curvas de la fig. 4-24. Al igual que en las curvas del hule natural sin refuerzos, las curvas de $\tan\delta_d$, de este material, también presentan una transición, entre el rango de -60° C y -50° C, aunque la $\tan\delta_d$, al final de dicha transición no regresa a su valor inicial. Esto se debe a que los refuerzos de fibras de vidrio y de arena no permiten que las cadenas poliméricas del material compuesto se acomoden como estaban en la matriz de hule cuando ésta no contaba con ningún refuerzo.

En la fig. 4-26 se aprecia que en comparación con las curvas a bajas frecuencias (fig. 4-22), éstas se mantienen constantes sobre la línea cero hasta la los 100° C donde se inicia una zona de rápido ascenso.

En la fig. 4-27 se muestra un detalle de las mismas curvas de la fig. 4-26. Se aprecia una transición de mayor magnitud a altas frecuencias que a bajas frecuencias (figs. 4-22 a 4-25). En la curva de 60 Hz se observan alteraciones a todo lo largo de la curva, las cuales se deben a la coincidencia con la frecuencia del suministro del voltaje de la energía eléctrica.

Comparando la fig. 4-28 con la fig. 4-26 se observa que son muy similares en los valores de $\tan\delta_d$, lo cual es indicativo de que cuando la prueba se realiza a altas frecuencias el efecto de los refuerzos no es aparente.

La fig. 4-29 muestra un detalle de las curvas de la fig. 4-28. Se aprecia que en comparación con las curvas a bajas frecuencias, la transición vítrea ocurre a temperaturas más altas (entre -35° C y -40° C).

En la fig. 4-30 se aprecia que la curva de $\tan\delta_d$ permanece constante aproximando a una recta hasta los 75° C. A partir de ahí se nota un incremento que es mayor a menor frecuencia. En comparación con el hule natural (fig. 4-22), a las mismas frecuencias, el incremento es mucho mayor.

La fig. 4-31 muestra un detalle de las curvas de la fig. 4-30. Se aprecia una transición la cual tiene su máximo a los -50° C a diferencia del HN donde este valor varió con las frecuencias.

En la fig. 4-32 se observa que las curvas permanecen constantes hasta los 75° C, a partir de donde incrementan su valor. En comparación con el HNFVA6 bajo las mismas condiciones, el incremento resultó mucho mayor.

La fig. 4-33 muestra en detalle las curvas de la fig. 4-32. Se observa que en esta curva aparecen dos transiciones, la primera a -50°C y la segunda a -10°C aproximadamente.

En la fig. 4-34 se aprecia que las curvas a cualquier frecuencia se mantienen constantes hasta los 75°C . A partir de ahí se nota un incremento que es mayor a menor frecuencia.

La fig. 4-35 muestra un detalle de las curvas de la fig. 4-34. Se observa que hay una transición entre -35°C y -40°C .

En la fig. 4-36 se observa que la curva permanece constante hasta los 75°C . Al igual que sucede con el hule sintético sin refuerzos; a partir de ahí se nota un incremento que es mayor a menor frecuencia.

5.1.4 Análisis termogravimétrico

La fig. 4-37 presenta la gráfica obtenida en esta prueba aplicada a un hule sintético reforzado con 6% de fibra de vidrio. Se aprecia que el material mantiene constantes sus dimensiones hasta los 125°C donde comienza su degradación siendo ésta más evidente a los 200°C donde aparece la primera disminución importante de peso. A los 400°C el peso del material decae precipitadamente mostrando que a esa temperatura ocurre una degradación completa. Al no tener más datos comparativos con otros hules sin refuerzos es difícil dar una conclusión sin embargo sí queda claro que este material se mantiene estable a temperaturas superiores a las que ocurren en una llanta en servicio.

5.1.5 Prueba de tensión

Los resultados de esta prueba se presentan de la fig. 4-38 a fig. 4-45 y en la tabla 4-1. Las cuatro primeras corresponden a materiales con matriz de hule natural y las restantes a hule sintético. En la tabla se presentan los resultados del látex.

De la fig. 4-38 se aprecia que el módulo de Young del hule natural reforzado con fibras se incrementa al aumentar el contenido de los refuerzos. El mayor aumento correspondió al material que contiene la fibra de carbono sin ningún tipo de adhesivo. Una excepción fue el caso en el que se usó el adhesivo tipo "X", observándose una reducción del módulo. Aparentemente dicho adhesivo actuó como plastificante según se pudo observar durante la preparación de la mezcla al ser vulcanizada.

De la fig. 4-39 se aprecia claramente que la arena parece tener un efecto ligeramente negativo sobre el módulo de Young.

En la fig. 4-40 se observa que la sílica reduce considerablemente la rigidez del material. Los adhesivos aplicados a la fibra de carbono funcionaron eficientemente ya que, lograron contrarrestar el efecto de la sílica recuperándose el módulo de Young. Parece ser que la adición de la sílica en la matriz elastomérica evita que los adhesivos impregnados en las fibras presenten comportamiento de plastificantes.

De la fig. 4-41 se observa que para este tipo de materiales, el efecto de la arena en el módulo de Young no es significativo.

De la fig. 4-42 se aprecia que el módulo del hule sintético se incrementa al aumentar el contenido de cualquier fibra. El módulo de Young de la matriz de hule sintético es ligeramente mayor que el de la matriz de hule natural. El incremento del módulo de Young con ambas fibras resultó más significativo con el hule sintético que con el hule natural (fig.4-38). Para las probetas con fibra de carbono y adhesivo tipo "B", el mayor módulo de Young se obtuvo al 6%.

De la fig. 4-43 se observa que la arena no mostró ningún efecto en el módulo de Young del hule sintético.

De la fig. 4-44 se aprecia que el módulo de Young se incrementa con el aumento del contenido de los refuerzos, aunque en general, dicho incremento es menor que en el caso de los materiales con matriz de hule natural y sílica. El mayor módulo de este grupo de materiales se obtuvo con las fibras de carbono impregnadas con el adhesivo "B".

Con la fig. 4-45 se confirma que la arena no ejerce ningún efecto reforzante, por el contrario, al combinarse con alguna de las fibras reduce el módulo de Young que se había logrado usando las fibras solas.

De la tabla 4-1 se aprecia que el módulo de Young de la matriz de látex es mayor que el de la matriz de látex con una carga de sílica. La adición de arena en la matriz de látex con sílica redujo aún más el módulo de Young.

Cuando se usaron fibras de vidrio tratadas con tolueno, el módulo de Young aumentó en ambas matrices en comparación con el material que fue reforzado con fibras de vidrio sin tratar. Cuando se utilizaron fibras de carbono con la matriz de látex y sílica el resultado fue opuesto, pues el módulo resultó más alto cuando la fibra no se trató. En el caso del material reforzado con fibras de carbono tratadas con tolueno y arena impregnada con un adhesivo el módulo de Young aumentó considerablemente. Desafortunadamente no se tienen datos comparativos de arena sin adhesivo y fibra de carbono sin tratar.

5.1.6 Prueba de resiliencia

Los resultados de esta prueba tomados en forma visual se presentan en las tablas 4-2 a 4-7 y los tomados con una cámara de alta velocidad de la tabla 4-8 a la 4-13.

De la tabla 4-2 se aprecia que la resiliencia del material disminuye con el aumento del contenido de fibra en la matriz de hule natural. El efecto de las fibras, ya sea con o sin adhesivo, fue negativo. En cambio, con la arena se consiguió aumentar

la resiliencia del material especialmente cuando ésta se usó en una proporción del 6% impregnada con los adhesivos tipo "C" y "W".

De la tabla 4-3 se observa que la resiliencia de la matriz del hule natural con sílica resultó ligeramente mayor que la del hule natural sin sílica. La resiliencia de todos los materiales disminuyó con el contenido de refuerzos con excepción del hule natural con una carga de sílica y reforzado con arena. De nuevo se hizo presente el efecto positivo de la arena.

De la tabla 4-4 se observa que la resiliencia del hule sintético es menor que la del hule natural (tabla 4-2). Y como aquél, su resiliencia disminuye con el contenido de fibras. La arena también tuvo un efecto positivo en este caso. Los valores más altos de la resiliencia se obtuvieron con 6% de arena impregnada con el adhesivo tipo "C" y con el 15% de arena impregnada con el adhesivo "W".

De la tabla 4-5 se encontró que la resiliencia de la matriz de hule sintético con una carga de sílica resultó levemente menor que la de la matriz de hule sintético sin sílica.

De la tabla 4-6 se aprecia que únicamente el látex reforzado con la combinación de arena y fibra de vidrio tratada alcanzó una resiliencia mayor que su matriz.

En la tabla 4-7 se observa que la resiliencia del látex con una carga de sílica resultó mayor que la del látex sin sílica y aún más alta que la del hule natural con sílica. Se aprecia que cuando la matriz se reforzó con fibra de vidrio sin tratar alcanzó una resiliencia mayor que la de la matriz. Resulta evidente de los resultados que el tratamiento del tolueno en las fibras no rindió un efecto positivo en la resiliencia de los materiales que lo contenían.

Los resultados de las tablas 4-8 a 4-12 se obtuvieron bajo un control estricto de temperatura y sin la posibilidad de caer en el error humano ya que se utilizó una

cámara de alta velocidad. Para estas pruebas se utilizaron sólo los materiales que habían dado los resultados sobresalientes con el fin de confirmar los datos obtenidos. En general todos los resultados antes obtenidos se confirmaron. En estas tablas todos los valores aparecen más altos debido a que las pruebas se realizaron a 30° C en lugar de aproximadamente 20° C de temperatura. Definitivamente se puede afirmar que la arena es un material que les proporciona a los hules natural y sintético y al látex una mayor resiliencia. Los materiales que sobresalen son el hule natural reforzado con 6% de arena impregnada del adhesivo "C" y el hule natural con una carga de sílica reforzado con 15% de arena impregnada con el adhesivo "C". Resulta evidente que el adhesivo tipo "C" fue muy positivo en su efecto de adhesión entre la arena y el hule.

5.1.7 Prueba de compresión

Los resultados de esta prueba se encuentran en las figs. 4-46 a 4-53. Las gráficas se dividieron según la matriz elastomérica que se usó.

De la fig. 4-46 se observa que en general, el módulo de estos materiales aumenta con el incremento del contenido de las fibras. La excepción fue el caso de la fibra de carbono impregnada con el adhesivo tipo "C" en que, para contenidos superiores al 6%, el módulo disminuyó debido a que el adhesivo impregnado en esta fibra actuó como plastificante. El módulo más alto de este grupo de materiales se obtuvo con las fibras de vidrio impregnadas con el adhesivo "B". Los adhesivos, en esta prueba, mostraron haber logrado una unión eficiente entre la matriz de hule natural y las fibras.

De la fig. 4-47 se observa que el módulo más alto lo obtuvo el material cuya matriz de hule natural fue reforzada con una combinación de arena y fibras de vidrio impregnadas con el adhesivo "C". El efecto de la arena fue positivo, lo cual contrasta con los resultados de las pruebas de tensión en las que, en general, el efecto fue ligeramente negativo. Los granos de arena ocupan un lugar en la matriz

de hule lo cual reduce la posibilidad de movilidad de las cadenas poliméricas. De este modo el nuevo material se vuelve más rígido.

De la fig. 4-48 se observa que el módulo se incrementa con el contenido de las fibras de manera más pronunciada que con los materiales que poseen una matriz de hule natural sin la carga de sílica. El efecto reforzante de la sílica en este caso se disminuye debido a alguna reacción química entre ella y los adhesivos impregnados en los refuerzos.

De la fig. 4-49 se aprecia nuevamente que los materiales con la matriz de hule natural con una carga de sílica al combinarse con los diferentes refuerzos impregnados con algún adhesivo dan como resultado módulos menores que los materiales que no contienen sílica.

De la fig. 4-50 se aprecia claramente el incremento del módulo con el contenido de las fibras. El material que mostró el mayor módulo fue el reforzado con fibras de carbono impregnadas con el adhesivo tipo "B", seguido por el reforzado con la fibra de vidrio impregnada con el mismo adhesivo.

De la fig. 4-51 se aprecia que la arena sola como refuerzo de la matriz de hule sintético no presenta ningún efecto significativo en el módulo del material, sin embargo, cuando se combinó con la fibra de carbono, se logró el módulo más alto de todos los materiales sometidos a esta prueba. El segundo módulo más alto correspondió al material reforzado con arena y fibra de vidrio, aunque éste disminuyó con contenidos superiores al 15%. La arena combinada con alguna fibra aumenta la rigidez del material que las contiene porque los dos refuerzos juntos reducen considerablemente el espacio que tenían las cadenas poliméricas, lo que hace al material más rígido.

De la fig. 4-52 se observa que el efecto de la sílica en la matriz de hule sintético no es aparente como con el hule natural en donde se manifiesta una disminución del módulo (fig. 4-48). El hule sintético con una carga de sílica reforzado con fibra

de carbono impregnado con adhesivo "C" fue el material que presentó el módulo más alto seguido por el reforzado con fibra de vidrio impregnada con el mismo adhesivo.

De la fig. 4-53 se aprecia que, con la matriz de hule sintético con una carga de sílica, el efecto de la arena sola no es reforzante. Pero combinada con alguna fibra si lo es.

De la tabla 4-14 se observa que el látex reforzado con fibras de carbono tratadas con tolueno logró el mayor módulo, seguido por el látex reforzado con fibras de vidrio tratadas con tolueno. El efecto de la arena resultó negativo ya que sola o combinada con la fibra de vidrio reduce la magnitud del módulo material.

De la tabla 4-15 se observa que la matriz de látex con carga de sílica obtuvo un módulo menor en comparación con la que no tenía. La fibra de carbono sin tratar fue la que proporcionó el mayor módulo de este grupo de materiales.

5.1.8 Prueba de dureza

Los resultados de esta prueba se presentan de la fig. 4-54 a la fig. 4-62 y en la tabla 4-15. Los resultados se dividieron según el tipo de matriz con que las probetas fueron fabricadas.

De la fig. 4-54 se aprecia que cuando se usaron fibras de carbono como refuerzo, la dureza del material se incrementó, aunque de una manera irregular, ya que para bajas concentraciones (6%), dicho incremento es muy pronunciado, pero al seguir aumentando el contenido de los refuerzos, su pendiente decrece un poco. Con la fibra de vidrio a bajas concentraciones (6%), la dureza del material decrece pero luego, con el aumento del contenido de fibras, ésta se incrementa consistentemente aunque nunca logra alcanzar los valores que se logran con la fibra de carbono. Los adhesivos no funcionaron eficientemente.

De la fig. 4-55 se observa que a bajas concentraciones (6%), la arena sola impregnada o no con algún adhesivo o combinada con alguna fibra disminuye sustancialmente la dureza del hule natural, sin embargo, al aumentar el contenido del refuerzo, la dureza del material se recupera, pero sólo en los casos en que la arena se combinó con las fibras de vidrio o carbono alcanzó un valor superior al de la matriz. Para concentraciones superiores al 15% la dureza ya no se incrementó.

De la fig. 4-56 se observa que la dureza de la matriz de hule natural con una carga de sílica es menor que la de la misma matriz sin sílica. Con los refuerzos, la dureza del material se incrementa linealmente con el aumento de su contenido. El valor más alto de dureza se obtuvo en el material reforzado con fibras de carbono. Los adhesivos impregnados en las fibras no tuvieron un efecto positivo.

De la fig. 4-57 se aprecia que la arena como refuerzo del hule natural con una carga de sílica casi no modifica la dureza de la matriz. Combinada con las fibras, hay un incremento constante de la dureza con el contenido del refuerzo. El valor más alto se obtuvo con el refuerzo de la arena con la fibra de carbono impregnada con el adhesivo "C". El mismo material, pero impregnado con el adhesivo "W", proporcionó el siguiente valor más alto. Este adhesivo también proporcionó un buen efecto en la fibra de vidrio.

De la fig. 4-58 se observa que la dureza del hule sintético resultó mayor que la del hule natural con una carga de sílica pero menor que la del hule natural sin esa carga. Se aprecia que la dureza del material se incrementa de manera constante con el contenido de fibras. El valor más alto se obtuvo con la probeta de hule sintético reforzado con fibra de carbono impregnada con el adhesivo "C". El siguiente valor más alto fue para el mismo material pero con las fibras sin haber sido impregnadas por ningún adhesivo.

De la fig. 4-59 se aprecia que la arena sola sin la impregnación de un adhesivo parece no tener ningún efecto significativo en la dureza del material, sin embargo, impregnada con el adhesivo "W" con contenidos superiores a 6%, presentó un

efecto leve. Combinada con las fibras, también para contenidos superiores al 6%, ayudó a incrementar significativamente la dureza del hule. El valor más alto de dureza se obtuvo con arena combinada con fibras de carbono sin adhesivos.

De la fig. 4-60 se observa que el comportamiento de los materiales de esta gráfica es similar al los de la fig.4-56 a pesar de que los hules de las matrices son diferentes. Ambas contienen una carga de sílica.

De la fig. 4-61 se observa que la arena tanto en la matriz de hule sintético, como en la de hule natural (fig. 4-57), confiere un comportamiento similar.

De la tabla 4-16 se observa que con la matriz de látex, el mayor valor de dureza se obtuvo con un refuerzo de arena impregnada con un adhesivo y fibra de carbono tratada. *La fibra de vidrio funcionó mejor sin el tratamiento de tolueno.*

De la tabla 4-17 se observa que la matriz de látex con carga de sílica presentó el valor más bajo de dureza con respecto a las otras matrices que se usaron en esta prueba, sin embargo, con el refuerzo formado con la combinación de arena impregnada con un adhesivo y de fibra de carbono tratada, se logró una dureza casi tan alta como las obtenidas con el hule sintético.

5.1.9 Prueba de fricción

Los resultados de esta prueba se dividieron según la condición bajo la cual fue realizada. De la fig. 4-62 a la fig. 4-65 se presentan los ángulos de fricción estáticos, caracterizados como cuasidinámicos y dinámicos obtenidos a temperatura ambiente, de la fig. 4-66 a la fig. 4-69 los obtenidos a baja temperatura y de la fig. 4-70 a la fig. 4-71 los obtenidos a alta temperatura. Las tablas 4-18 y 4-19 presentan los resultados de la prueba de los materiales con matriz de látex. La primera contiene los obtenidos a temperatura ambiente y la segunda los de temperaturas bajas. No se realizaron pruebas a altas temperaturas en materiales con esta matriz.

En la fig. 4-62 se observa que la cantidad y los refuerzos utilizados en la matriz de hule natural no tuvieron ningún efecto en los ángulos de fricción, con la excepción del hule natural con arena impregnada con el adhesivo "Celanese" que requirió un ángulo de fricción estático, cuasidinámico y dinámico ligeramente mayor que los otros materiales. En las pruebas a bajas (fig. 4-66) y altas (fig. 4-70) temperaturas, los refuerzos tampoco mostraron tener ningún efecto en la obtención de ninguno de los ángulos.

En la fig. 4-63 se aprecia que tanto el ángulo estático como el cuasidinámico y el dinámico tienden a disminuir al aumentar el contenido de refuerzo. El ángulo más alto en las tres pruebas se observó con el hule natural con una carga de sílica reforzado con arena. A bajas (fig. 4-67) y a altas (fig. 4-71) temperaturas, el comportamiento de los materiales fue semejante.

En la fig. 4-64 se observa que en general, los ángulos estáticos y cuasidinámicos, aumentan levemente con el contenido de refuerzo hasta el 6% para luego disminuir hasta un valor que se mantiene constante al seguir incrementando el contenido del refuerzo. En el caso del ángulo dinámico, también hay un leve incremento hasta el 6% de contenido de refuerzo. Para el caso del material reforzado con arena sola, el ángulo se mantiene prácticamente constante. Con el resto de los materiales, el ángulo disminuye con el incremento del contenido del refuerzo. Los ángulos correspondientes a la matriz de hule sintético fueron menores que los correspondientes a la matriz de hule natural. A temperaturas bajas (fig. 4-68), se observó que los refuerzos no tuvieron efecto sobre ninguno de los tres ángulos. No se llevó a cabo la prueba a altas temperaturas.

En la fig. 4-65 se observa que para la matriz de hule sintético con sílica los refuerzos parecen no tener ningún efecto sobre el ángulo estático. Hubo un efecto positivo sobre los ángulos cuasidinámico y dinámico para el caso de un refuerzo de arena impregnada con el adhesivo "W" y el "C". A bajas temperaturas (fig. 4-69), los refuerzos no presentaron ningún efecto sobre ninguno de los tres ángulos.

La tabla 4-18 muestra que los materiales con matriz de látex con una carga de sílica, en general requirieron de ángulos menores que los materiales con matriz de látex sin la sílica. Los tres ángulos característicos disminuyeron con los refuerzos. A bajas temperaturas (tabla 4-19), los materiales con matriz de látex y carga de sílica, presentaron ángulos mayores a los requeridos por la matriz sin refuerzo.

5.1.10 Prueba de desgaste

Los resultados de esta prueba se muestran en las tablas 4-20 a 4-27 y se presentan según el tipo de matriz que se utilizó.

La tabla 4-20 muestra que la pérdida de masa de la matriz de hule natural sin ningún refuerzo resultó considerablemente mayor que la de la mayoría de los materiales reforzados mostrados en la tabla. Las menores pérdidas de masa de este grupo de materiales se consiguieron cuando se utilizó como refuerzo fibras de carbono con contenidos del 15% (con y sin la impregnación de los adhesivos "W" y "X") y 20%.

La tabla 4-21 muestra que la menor pérdida de masa se obtuvo con el hule natural reforzado con 10% de arena sin adhesivo. Cuando la arena se combinó con fibra de vidrio o carbono, el desgaste fue mayor.

La tabla 4-22 muestra que la pérdida de masa de la matriz de hule natural con sílica en comparación con la del hule natural sin sílica resultó casi 50% menor. El efecto de la sílica es evidentemente positivo. Con la fibra de vidrio y la de carbono como refuerzo, sin embargo, la pérdida resultó menor cuando las probetas tenían matriz de hule natural sin sílica.

La tabla 4-23 muestra que el hule natural con una carga de sílica reforzado con una combinación de arena y fibra de carbono al 6% con adhesivo "C" y "W" presentaron una pérdida de masa entre el 40 y 70% menor que la matriz sola sin refuerzo. Casi

todos los otros materiales presentados en esta tabla tuvieron pérdidas de masa mayores al de la matriz.

La tabla 4-24 muestra que la pérdida de masa de la matriz de hule sintético fue menor que la de hule natural pero mayor que la del hule natural con una carga de sílica. El hule sintético reforzado con fibra de carbono fue el material que presentó la menor pérdida de masa, sobresaliendo el HSFC60, HSFC6"C" y HSFC15"X". El hule sintético reforzado con fibra de vidrio también mostró pérdidas de masa menores que las de la matriz de hule sintético.

La tabla 4-25 muestra que de este grupo de materiales, el hule sintético reforzado con arena al 15% sin adhesivo y con los adhesivos "C" y "W", rindió la menor pérdida.

La tabla 4-26 muestra que esta matriz presentó una pérdida menor que la matriz de hule sintético sin sílica, aunque fue mayor de la de hule natural con sílica. Definitivamente, la sílica ayuda a reducir la pérdida de masa tanto en el hule sintético como en el natural siendo más efectivo con este último.

La tabla 4-27 indica, como era de esperarse, que la matriz de látex sin sílica tuvo una pérdida de masa superior a la que contenía sílica. También resultó mayor que la de hule sintético sólo pero menor, que la de hule natural sólo. Cuando la matriz de látex sin sílica se reforzó, disminuyó notablemente la pérdida de masa, en particular con el refuerzo de la fibra de vidrio tratada con tolueno. Cuando la matriz de látex contenía sílica la disminución de la pérdida de masa no se manifestó tan claramente con el uso de las fibras.

5.1.11 Pruebas utilizando el microscopio electrónico

Las figs. 4-72 a 4-74 muestran tres fotografías representativas de las que se tomaron en el microscopio electrónico.

En la fig. 4-72 se aprecian a lo largo de la fibra de vidrio (el cuerpo más claro del lado derecho de la fotografía), pequeñas protuberancias semejando escamas, las cuales son residuos de la matriz de hule que se quedaron pegadas sobre la fibra cuando la probeta fue sometida a un esfuerzo cortante al preparar la muestra para ser observada en el microscopio. Los residuos muestran la efectividad del adhesivo.

La fig. 4-73 muestra que no hay una distribución uniforme de las fibras debido al método de mezclado con que fueron elaboradas las probetas. A pesar de que el contenido de fibra era del 60%, se observan en la matriz de hule bastantes espacios libres. La buena adhesión de las fibras se hace evidente a través del corte de las fibras que fue hecho durante preparación de la probeta. Si no hubiera buena adhesión el esfuerzo cortante provocaría el desprendimiento de las fibras dejando una huella. No se observan huecos vacíos sugiriendo que alguna fibra se salió de su lugar.

De la fig. 4-74 que es un acercamiento de un grano de arena de una probeta reforzada con este material se aprecia que el grano de arena presenta una buena adhesión con la matriz de hule.

5.1.12 Prueba utilizando el microscopio óptico

Esta prueba se realizó para evaluar el proceso utilizado para reducir la ruptura de la fibra (ver capítulo 3). Para esta prueba se utilizaron muestras del material sin vulcanizar. Las fibras se extrajeron de las muestras aplicando a éstas fuego directo.

La fig. 4-75 muestra una fotografía representativa tomada con el microscopio óptico donde se puede apreciar que el tamaño de las fibras es bastante variable, se encontraron largos desde $134\mu\text{m}$ hasta $663.76\mu\text{m}$, aunque los más frecuentes fueron los de $250\mu\text{m}$ y $350\mu\text{m}$. O'Connor en 1977, señaló que para que el refuerzo mediante fibras sea efectivo, el valor del cociente longitud/diámetro (L/D) debe estar en el rango de 40 a 250 y Foldi en 1975 lo estableció para $L/D > 150$. La fibra que se

muestra en la fotografía es de carbono con un diámetro de $8\mu\text{m}$. Este proceso en comparación con el proceso tradicional disminuye el rompimiento de las fibras en aproximadamente un 5%.

5.1.13 Prueba de adhesión de una sola fibra

De la tabla 4-14 se aprecia que la resistencia al cortante interfacial para la fibra de vidrio resultó mayor cuando la fibra fue tratada con el adhesivo en comparación con la fibra sin tratar. Lo cual indica que el tratamiento de adhesión aplicado a la fibra mejora la unión entre la fibra y la matriz de hule. Para la fibra de carbono el resultado fue a la inversa ya que se obtuvo mayor resistencia cuando la fibra de carbono no contenía adhesivo. Esto indica que el adhesivo usado no es compatible con este tipo de fibra.

CAPÍTULO 6

Discusión

6.1 Comportamiento mecánico dinámico

Se observó (tabla 5-1) que, cuando a la matriz de hule natural se le agregó arena al 6% (HNA6), la T_g de este nuevo material aumentó, y a esa temperatura, la $\tan\delta$ se mantuvo igual que la de la matriz sin refuerzo. A la temperatura ambiente, la $\tan\delta$ y el módulo de pérdida aumentaron levemente. Esto sucedió posiblemente porque en este caso, la unión entre la arena y el elastómero no fue total, lo que produjo un ligero aumento en la fricción interna del nuevo material. El módulo de almacenamiento disminuyó porque la arena no se comportó como una carga de refuerzo.

De la misma tabla también se aprecia que, cuando a la matriz de hule natural se le agregó fibra de vidrio en una proporción del 6% (HNFV6), la T_g de este nuevo material disminuyó al igual que la $\tan\delta$ a esa temperatura. En cambio, a la temperatura ambiente, la $\tan\delta$, el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida

aumentaron. La fibra de vidrio, como era de esperarse, aumentó la rigidez del material y por eso el módulo de almacenamiento se incrementó. Sin embargo, la adhesión entre las fibras y la matriz elastomérica se percibe deficiente ya que las fibras tienen el poder de deslizarse, induciendo a un aumento en la fricción interna del nuevo material y provocando con ello una mayor disipación de energía que se traduce en un aumento de la $\tan\delta$ y del módulo de pérdida. Esta explicación es parte esencial de esta investigación.

El último material que se muestra en la tabla 5-1, el HNSFVA6, tiene una matriz de hule natural que difiere de la matriz de los otros materiales, en que posee además una carga de sílica. Desafortunadamente, no se tienen resultados elaborados en el mismo equipo de esta matriz sola, por lo que se hará la comparación con la matriz de hule natural sin refuerzos. Se aprecia que el material HNSFVA6 presenta una $\tan\delta$ menor que la de la matriz de hule natural en todo el rango de temperatura. Este efecto se debe principalmente a la presencia de la carga de sílica en el hule natural, la cual se sabe disminuye la generación de calor (Warner, 1976). La combinación de ingredientes con que se elaboró este material compuesto hizo posible también aumentar la temperatura de transición en 1.79°C en comparación con la matriz de hule natural. Este aumento significa un leve acercamiento de la T_g hacia el régimen de alta tracción (fig. 2-12). Es deseable establecer la temperatura de transición cerca del régimen asociado con alta tracción para obtener valores altos de $\tan\delta$ a bajas temperaturas (Gelling, 1994). Sin embargo, la disminución es demasiado pequeña como para lograr dicho efecto, aunque es significativo porque sugiere encaminar la investigación hacia este tipo de materiales. A las temperaturas de operación de las llantas, el módulo de almacenamiento del HNSFVA6 es 88% mayor que el del hule natural y esto se debe a la intervención de la fibra de vidrio. Se confirma que la fibra de vidrio tiene un efecto positivo en el incremento del módulo de almacenamiento lo cual se aprecia al analizar los resultados en el material HNFV6 (tabla 5-1) cuyo módulo de almacenamiento resultó 37% mayor que el del hule natural.

En la tabla 5-2 se obtuvieron sólo resultados a la temperatura de transición, donde se observa que cuando la matriz de hule natural se reforzó con fibra de carbono en una proporción del 6%, la T_g disminuyó junto con la $\tan\delta$, mientras que el módulo de almacenamiento y el de pérdida aumentaron. Era de esperarse que el módulo de almacenamiento del nuevo material fuera mayor que el de su matriz sola debido a la rigidez que las fibras de carbono le proporcionan. Se deduce que la unión entre las fibras y la matriz elastomérica no es buena ya que el módulo de pérdida también aumenta. Con esta observación se confirma la suposición expresada anteriormente como parte esencial de esta investigación.

Cuando la matriz de hule natural se reforzó con 15% de fibra de vidrio impregnada con el adhesivo "X" (tabla 5-2), la T_g aumentó de -40°C a -39°C , la $\tan\delta$, el módulo de almacenamiento y el de pérdida disminuyen debido al efecto del adhesivo. Éste, logró mejorar la unión entre la matriz y las fibras disminuyendo la fricción interna del nuevo material. Otro efecto del adhesivo fue una disminución en la dureza a la temperatura ambiente (ver gráfica 4-54 del capítulo 4).

Comparando la matriz de hule natural con una carga de sílica (HNS) con esta misma matriz pero reforzada con 6% de fibra de carbono (HNSFC6), es evidente el efecto de la fibra de carbono en la disminución de la $\tan\delta$ (tabla 5-2) y en el aumento del módulo de almacenamiento y del de pérdida. Estos resultados podrían ser muy significativos si se mantuvieran constantes hasta los 100°C . Desafortunadamente no se cuentan con resultados arriba de 0°C . La mayoría de los materiales de este tipo presentan un comportamiento inverso arriba de la temperatura ambiente, por lo que es difícil establecer una conclusión respecto al comportamiento que muestra la gráfica.

Comparando la matriz elastomérica (HNS) y la de hule natural solo (HN), se observa que el efecto de la sílica es el de reducir la $\tan\delta$, el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida (tabla 5-2), lo cual concuerda con lo establecido por Warner (1976) quien dice que la sílica disminuye la histéresis y la generación de calor. Para

que la sílica actúe como una carga de refuerzo (aumente el módulo de almacenamiento E') en los elastómeros no polares como lo es el hule natural, ésta requiere de un agente de acoplamiento; por ejemplo, silano (Mark, Erman y Eirich, 1994). En el caso de esta investigación la sílica se usó siempre sin ningún tipo de agente de acoplamiento por lo que su efecto reforzante siempre fue mínimo.

Con la matriz de hule sintético reforzada con 6% de fibra de carbono (HSFC6) ocurre una situación similar a la del hule natural reforzado con la misma fibra en la misma proporción (HNFC6) ya que la $\tan\delta$ también disminuye y el módulo de almacenamiento aumenta, aunque el módulo de pérdida disminuye levemente en vez de aumentar (tabla 5-2). Es posible que entre el hule sintético y las fibras de carbono ocurra una mejor unión que conlleva a una menor fricción interna que se traduce a su vez en una disminución del módulo de pérdida. Cuando la matriz se reforzó con 15% de fibra de carbono impregnada con el adhesivo "X" (HSFC15X), la T_g , la $\tan\delta$, el módulo de almacenamiento y el de pérdida del nuevo material aumentaron presumiblemente debido al efecto del adhesivo. Puede suponerse que el adhesivo actuó como plastificante permitiendo que las fibras pudieran tener cierto deslizamiento en lugar de adherirlas fuertemente al elastómero. También provocó que la rigidez de las fibras de carbono no se viera totalmente reflejada en el módulo de almacenamiento del nuevo material.

Cuando a la matriz de hule sintético se le agregó una carga de sílica (HSS) y posteriormente se reforzó con 15% de fibra de carbono impregnada por el adhesivo "X" (HSSFC15X), la T_g aumentó presumiblemente por el efecto del adhesivo (tabla 5-2), mientras que la $\tan\delta$ disminuyó por la acción de la sílica que reduce la histéresis (Warner, 1976). El módulo de almacenamiento aumentó por la intervención de la fibra de carbono. El módulo de pérdida aumentó, posiblemente porque el adhesivo, actuó como plastificante.

En la tabla 5-3 se aprecia que cuando a la matriz de hule natural se le agregó arena (HNA6, HNA6W, HNA6C, HNA8, HNA20), la T_g y la $\tan\delta$ (a esa temperatura) del

nuevo material aumentaron. En cambio, a la temperatura ambiente, la $\tan\delta$ y el módulo de pérdida disminuyeron mientras que el de almacenamiento aumentó. Con estos resultados, se confirma que la arena mejora la resiliencia de los materiales que la contienen (tabla 4-2 del capítulo 4); así, la histéresis del material y por lo tanto la $\tan\delta$ disminuyen. El módulo de almacenamiento, en general, aumentó muy ligeramente debido a la rigidez que le proporcionó la arena. Este resultado y el del módulo de pérdida, hacen pensar que la unión entre la matriz elastomérica y la arena es buena por lo que al haber poco deslizamiento entre ellas la disipación de energía es baja. Cuando la arena se impregnó por un adhesivo ("W" o "C"), los resultados fueron todavía mejores que cuando se utilizó la arena sola. El mejor adhesivo fue el tipo "C" con el cual se logró, que a temperatura ambiente, el material tuviera la menor $\tan\delta$ con el menor módulo de pérdida y una rigidez 50% más alta que la de la matriz de hule natural sola.

De la misma tabla, comparando la matriz de hule sintético (HS) con la misma matriz pero reforzada con 15% de arena (HSA15), la T_g no aumentó, aunque la $\tan\delta$ a esa temperatura sí disminuye. A temperatura ambiente, el módulo de pérdida no disminuye, lo que demuestra que la arena no logra una unión tan eficiente con el hule sintético como con el hule natural.

Cuando se agregó sílica a la matriz de hule natural y se reforzó con 15% de arena impregnada con el adhesivo "W" (HNSA15W), se observó que la T_g no cambió aunque a esa temperatura la $\tan\delta$ sí disminuyó (tabla 5-3). El efecto de la arena impregnada con el adhesivo, a temperatura ambiente, fue el esperado (disminuyó la $\tan\delta$ y el módulo de pérdida y aumentó el módulo de almacenamiento), confirmando una vez más que la arena aumenta la resiliencia. Sin embargo, sorprendentemente, cuando la matriz se reforzó con 6% de arena impregnada con el adhesivo "C" (HSSA6C) el efecto del refuerzo, a temperatura ambiente, no resultó como se esperaba, ya que la $\tan\delta$ y el módulo de pérdida aumentaron. Esta es una observación difícil de explicar dado que la arena posee una constitución similar a la de la sílica. Sin embargo, como se sabe, la sílica (Mark, Erman y Eirich, 1994) tiene

la propiedad de absorber aceite (que es un plastificante) por lo que probablemente ésta contrarrestó la acción del adhesivo, que bajo circunstancias todavía no muy claras, actúa como plastificante. Cabe también la posibilidad de un error del operario del equipo, por lo que antes de dar una conclusión final al respecto de este resultado en particular, se sugiere repetir esta prueba.

6.2 Relación entre la histéresis y el módulo de pérdida

En esta investigación no se tienen datos directos de pérdida por rodamiento, sin embargo a través de los resultados obtenidos de histéresis, $\tan\delta$ y módulo de pérdida E'' se puede predecir qué material presentará una menor pérdida por rodamiento, ya que varios investigadores, por ejemplo Curtiss (1969) y Schuring, (1980), han concluido que la pérdida por rodamiento que ocurre en la cinta de rodamiento se debe principalmente a la histéresis del material y más recientemente (en 1994 Gelling) se demostró que entre la $\tan\delta$ y la pérdida por rodamiento existe una relación lineal.

La fig. 4-76 muestra una gráfica de la relación virtualmente lineal entre la histéresis (obtenida de los datos de la prueba de resiliencia) y el módulo de pérdida, E'' (obtenidos de la prueba del DMA) de varios materiales utilizados en la investigación. Esta relación muestra una correlación entre la histéresis y el módulo de pérdida. Se aprecia que al agregar arena a una matriz de hule natural, en general, se reduce el módulo de pérdida y la histéresis, de donde sobresale positivamente el material (HNA6C) cuya matriz es hule natural reforzado con 6% de arena impregnada con adhesivo "C" (estos valores se pueden confirmar de la tabla 4-2 y 5-3). Este material seguramente debe proporcionar bajas pérdidas por rodamiento.

Se puede afirmar que el efecto más importante que ejerció la arena en los materiales elaborados con hules naturales fue el aumento de la resiliencia y por consecuencia en la disminución de la histéresis. Además, en los materiales reforzados con una combinación de fibras y arena se observan resultados muy positivos en otras

En 1977, O'Connor en sus experimentos, utilizó fibras de vidrio y de carbono reportando que debido a una excesiva ruptura de las fibras (factores de L/D de 22 para la fibra de vidrio y de 18 para la de carbono), éstas no habían podido reforzar adecuadamente a los elastómeros utilizados. Los módulos elásticos obtenidos resultaron muy bajos, El factor L/D que O'Connor propone para lograr que el refuerzo de un elastómero sea eficiente, debería estar entre 40 y 250. En esta investigación se consiguieron factores promedio de L/D de 112 para la fibra de carbono y 44 para la fibra de vidrio.

Una desventaja observada en la utilización de la carga de negro de humo como material de refuerzo, en comparación con las fibras de vidrio o carbono, es que el proceso de mezclado para la obtención del material compuesto se dificulta con el aumento de contenido de negro de humo, por lo que, con esta carga, no se facilita la obtención de módulos elásticos tan altos como es posible con las fibras.

En cuanto a la adecuada adhesión entre las fibras y la matriz elastomérica, ésta sigue siendo un problema, pues aunque con algunos adhesivos se logró mejorar dicha unión, los resultados no son fáciles de reproducir. En general los mejores resultados de adhesión se obtuvieron con la fibra de vidrio que con la de carbono. El comportamiento de la fibra de carbono fue mejor cuando no contenía ningún tipo de tratamiento para mejorar su adhesión.

Debido al método utilizado para incorporar las fibras a las matrices elastoméricas, no se pudo controlar la distribución ni la orientación de las fibras, sin embargo, de las fotografías tomadas en el microscopio electrónico se aprecia que su orientación está bien definida y que su distribución no es uniforme (fig. 4-73). Según van der Pol y de Vos (1995), el grado de orientación de las fibras depende de los esfuerzos cortantes encontradas en la última etapa del proceso de mezclado. Estos resultados indican que los materiales compuestos preparados para llevar a cabo esta investigación son anisotrópicos.

6.4 Relación entre la prueba de dureza y las otras pruebas

Existe una relación aproximadamente lineal entre la dureza y el módulo de Young según se aprecia de los resultados experimentales (fig. 4-79). En el caso de la arena, el módulo de Young prácticamente no se incrementa al incrementarse la dureza, lo cual concuerda con los resultados presentados en las gráficas 4-39, 4-41, 4-43 y 4-45 del capítulo 4 y en lo discutido en la sección anterior, donde se menciona que la arena no actúa como carga de refuerzo.

La relación entre la dureza y la resiliencia también es lineal e inversa (fig. 4-80). Los valores más altos de resiliencia corresponden a los materiales con arena.

CAPÍTULO 7

Conclusión

La contribución más importante de esta investigación es el desarrollo de un material compuesto adecuado para la fabricación de una cinta de rodamiento para las llantas de los vehículos eléctricos. Se sustenta esta aseveración en las consideraciones que se explican en los siguientes párrafos.

En esta investigación se evaluaron cuatro diferentes matrices elastoméricas reforzadas con diversos materiales. En estas conclusiones se mencionarán con detalle sólo los materiales que dieron los mejores resultados.

Comparando las propiedades que caracterizan a un material compuesto elaborado con una matriz de hule natural y negro de humo reforzada con arena, con los de una matriz de solo hule natural (ver capítulo 4), se encuentra que sus propiedades cambian de la siguiente manera. En cada caso se presenta la explicación probable:

La resiliencia aumenta porque: los granos de arena, que no son tan frágiles como las fibras de vidrio o de carbono, no se fracturan tan fácilmente como aquéllas durante el proceso de mezclado. Además, su geometría es irregular y áspera cualidades que ayudan a que entre el hule natural y la arena exista una buena adhesión impidiendo la movilidad de los granos y por ende reduciendo la disipación de energía y la histéresis. Inversamente, las fibras cuya superficie es tersa y lisa se deslizan libremente con respecto a su matriz provocando un incremento en la disipación de energía. Hasta ahora no existe un adhesivo que

sea totalmente eficiente, capaz de adherir fuertemente el hule natural con las fibras. La arena en cambio, logra una buena adhesión con el hule natural, la cual mejora todavía más si se usa un adhesivo que sea químicamente compatible tanto con la arena como con el hule natural.

Además de la rigidez natural que la arena le puede proporcionar a la matriz elastomérica, se considera que pudiera existir otro efecto rigidizante debido al espacio que ésta ocupa en el nuevo material y que hace que las cadenas poliméricas se confinen en un espacio más reducido restringiendo sus movimientos. El resultado es que el nuevo material compuesto se vuelve más rígido (la rigidez aumentará con el aumento de contenido de arena). Esta rigidez reduce la deformación que se producirá al aplicarle al material un esfuerzo. A menor deformación menor histéresis, por lo tanto mayor resiliencia. No obstante los mejores resultados se obtuvieron con bajas concentraciones de arena.

El módulo de almacenamiento aumenta por: la rigidez natural que la arena le puede proporcionar a la matriz elastomérica y por la disminución del espacio disponible de las cadenas poliméricas.

El módulo de compresión aumenta por: la misma razón expresada con respecto al módulo de almacenamiento. Si la arena se combina con alguna fibra el módulo aumenta todavía más en comparación con la matriz de sólo hule.

Los ángulos de fricción aumentan ligeramente, porque: el parámetro que influye en la fricción es la T_g , la cual se ve afectada por la arena, ya que aumenta su valor con respecto al del hule natural sólo. Este efecto resulta positivo ya que mientras más alta sea la T_g de un material elastomérico (ver fig. 2-13), más cerca estará del régimen de alta tracción (Gelling, 1994). Un material con una T_g alta (en los rangos de un elastómero) producirá, a temperatura ambiente, un hule blando más "pegajoso", cualidad necesaria para tener una buena tracción en suelo mojado.

La dureza aumenta con el contenido de arena especialmente si está impregnada con un adhesivo debido a la disminución del espacio de las cadenas poliméricas.

Existe también una relación en donde se observa que al aumentar la resiliencia de los nuevos materiales se disminuye su dureza (Fig. 4-80) y viceversa. Como ya se mencionó anteriormente, otro de los efectos de la arena en la matriz de hule natural es que la T_g del nuevo material compuesto se mueve ligeramente hacia la derecha incrementando su valor. Este resultado hace que a temperatura ambiente, el nuevo material disminuya su dureza. Cuando la arena se combinó con alguna fibra, la dureza aumentó considerablemente.

El desgaste disminuye debido a: que al agregar arena a la matriz de hule natural se reduce el espacio de las cadenas disminuyendo la distancia entre ellas. Así, las fuerzas de interacción entre las cadenas poliméricas se fortalecen dando como resultado una disminución en el desgaste.

La conclusión respecto de los materiales compuestos cuya matriz es hule sintético reforzado con arena es que ésta no causa el mismo efecto en las propiedades medidas que cuando la matriz es hule natural. Por un lado, los efectos de adherencia de la arena con el hule sintético no se manifiestan de la misma manera que con el hule natural y por otro, la T_g no tiende a incrementar, sino que por el contrario, disminuye.

Se deja para futuras investigaciones buscar nuevas combinaciones de materiales con los que se pueda obtener resultados similares a los logrados con el hule natural.

Finalmente, se puede concluir que los objetivos de esta tesis se cumplieron ya que se encontró, que al reforzar el hule natural con 6% de arena impregnada con el adhesivo tipo "C", se obtiene una disminución de la histéresis del 10% y del módulo de pérdida del 37% sin alterar negativamente la tracción ni el desgaste. Por lo anterior que se puede decir que este nuevo material utilizado en una cinta de rodamiento presentaría ventajas sobre una de hule natural sin ningún refuerzo.

REFERENCIAS

1. **Agarwal B. D., Lifshitz J. M. y Broutman L. J.**, "Elastic-Plastic Finite element Analysis of Short Fibre Composites", *Fibre Sci. Technol.*, 7(1), 45-62, 1974.
2. **Aggarwal S. L.**, "Advances in Elastomers ad Rubber Elasticity", J. Lal ad J. E. Mark, Eds., Plenum Press, New York, pp. 17-36, 1986
3. **Ahmed S. and Jones F. R.**, "A Review of Particulate reinforcement theories for polymer composites". School of Materials. University of Sheffield, Northumberland Road Sheffield S10 2TZ, UK. 1990.
4. **Allen P. W.**, "Energy accounting: Natural versus Synthetic Rubber". The Malaysian Rubber Producers' Research Association. Vol. 32 No 4. Año 1979.
5. **Allen P. W.**, "Can Rubber Stop us Wasting Energy?". The Malaysian Rubber Producers' Research Association. 1975, Vol. 28 (1) No 2.
6. **Alliger G y Sjothun I.**, "Vulcanization of Elastomers", Von Nostrand Reinhold, New York, 1964
7. **Ashbee K.**, *Fundamental Principles of Fibre Reinforced Composites*. Technomic Publishing Co. Inc.1990
8. **Askeland D. R.**, *The science and Engineering of Materials*. Chapman and Hall. 1990
9. **Bandyopadhyay S, Chandra A. K. and Mukhopadhyay .**, "An Overview of Tyre Rolling Loss", *Progress in Rubber and Plastics Technology*, vol. 10, No. 1, 1994, pp. 79-111
10. **Barbin W. W. Y Rodgers M. B.**, "The Science of Rubber Compounding", *Science y techology of Rubber*, second edition Academic press, Inc. 1994.
11. **Bastow D. and Howard G.**, *Car Suspension and Handling*. 3rd edition. Pentech Press, London. SAE.1993.
12. **Bäumeier M.**, "Development and Application of a Measurement Procedure for Investigating the Power Loss of Passenger Car Tires", Ph.D. Thesis, University of Karlsruhe,1987
13. **Beatty j. R. and Mischk j.**, "Relative Tire Fuel Consumption" *Rubber Plast. News* 9(25 ad 26), 22, 1980.
14. **Bely V. A., Sviridenok A. I., Petrokovets M. I. and Savkin V. G.**, "Friction and Wear in Polymer Based Materials". Pergamon Press.1995.
15. **Bhagwan D. A. and Lawrence J. B.**, "Analysis and Performance of Fiber Composites". John Wiley & Sons, 1980.
16. **Bikales M.**, "Vulcanization", *Encyclopedia of Polymer Science y Engineering*, 2nd ed., Vol. 17., New York, 1989.
17. **Billingley W. F., Evans R. D., Hulswit W. H., and Roberts.**, "The Effect of the Rolling Loss on Tread Geometry", *E. A., SAE J. Trans.* 50, (2), 37. 1942.
18. **Bond B., Norton G. F. and Krol L. H.**, "Temperatures and Frequencies Governing Traction ad Rolling losses on Tires", *Polymer* 25, 132. 1984.
19. **Brown R.**, "Physical Testing of Rubber". Chapman and Hall. Third edition.1995.

20. **Browne A. L.**, "Convective Heat Transfer on Tires", SAE Tech. Pap.820457, 1982.
21. **Brodnyan G.**, Fue nombrado en "A review of particulate reinforcement theories for polymer" composites escrito por Ahmed y Jones en 1990, aunque el año de su publicación fue 1959
22. **Brunot C. A. and Schuring D. J.**, "The Effect of the Rolling Loss on the Tread Material", SAE Trans. 92, 3, 454, 1984.
23. **Bschorr O. and Wolf A.**, "Tire Vibrations" Automobil Ind. 29, 451, 1982.
24. **Bull, A. W.**, "Tire Behaviour in Steering", The SAE Journal, vol. 45, No 2, 1939 pp. 344-349.
25. **Cain J.R.**, "Materiales para Bandas de Rodamiento", Hules y Plásticos, Diseño de Piezas Automotrices con Aleaciones. Revista tecnológica año 2 número 2, marzo de 1994, pp 27-28.
26. **Chakko M, K.**, "Structural Tire Models ", Tire Sci. Technol. 12, 3, 984.
27. **Chakraborty S.K. and Mukherjee J.K.**, "Study of Heat Build-up of a Cured Tire Using a Goodrich Flexometer", Industries, Ltd., India Rubber World, June 1987, pp 30-34.
28. **Chandra A. K.**, "Tyre Rolling Resistance and Fuel Economy", Robber Reporter, May/June, 1987, 9.
29. **Cheremisinoff N. P.**, "Elastomer Technology Handbook", CRC Pres, Inc. 1993.
30. **Clark, S. K.**, "Mechanics of Pneumatic", Tires Editor, U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Administration, U.S. Government Printing Office, Washington, D C, 1981, 931 pp.
31. **Claxton W. E., and Conant F. S.**, "Heat Build up Model for Pneumatic Tires" Rubber Chem. Technol, 47,717. 1974.
32. **Collins, J. M., Jackson, W. L., and Oubridge, P. S.**, "Relevance of Elastic and Loss Moduli of Tire Components to Tire Energy Losses", Transactions, Institution of the Rubber Industry, Vol. 40, 1964, p. 239.
33. **Conant F. S.**, "Effect of the Temperature on Tires" Rubber Chem. Technol. 44, 397, 1971.
34. **Curtis. P.T., M.G.Bader and J.E. Bailey.**, 1978. "The Stiffness and Strength of a Polyamide Thermoplastic Reinforced with Glass and Carbon Fibres", J. Mat SCI., 13:377.
35. **Curtiss W.W.**, "Low Power Loss Tires" The Goodyear Tire and Rubber Co. Society of Automotive Engineers. International Automotive Engineering Congress, Detroit, Mich. January 13-17, 1969.
36. **Davey J. E. and Loadman J. R. A.**, "Chemical Demonstration of the Randomness of Epoxidation of Natural Rubber". Malaysian Rubber Producers Research Association, Tun Abdul Razak Laboratory, Brickendonbury, Hertford SG13 8NL, UK, April 9,1984.
37. **Davies C. K. L. , Wolfe S. V. , Gelling I. R. And Thomas A.G.**, "Strain Crystallisation in Random Copolymers Produced by Epoxidation of cis 1,4-Polysoprene" Polymer, January 1983, vol. 24.
38. **Derringer G.C.**, "Compounding with fibres for high performance elastomer compounds" Rubber World, 1971.
39. **Dijks I. A.**, "Rolling Resistance Measurements with a Piezo-Electric

- Measuring system", Rep. P204. Delft Univ. Techn vehicle Res. Lab., feb. 1980.
40. **Einstain A.**, "Investigation on Theory of Brownian Motion" (Dover, New York) 1956.
 41. **Eisele U.**, Introduction to Polymer Physics. Springer-Verlang Berlin Heildenberg 1990.
 42. **Egeler N.**, "Characterisation of the Rolling Resistance of Aftermarket Passenger Car Tires" Rep. EPA- AA- SDSB-84-5. July 1984.
 43. **Egeler N.**, "Investigation of the Rolling Resistance of Fuel Efficient and High Performance Tires" Rep. EPA- AA- SDSB-84-5A. August 1984.
 44. **Elliot, D. R., Klamp, W. K., and Kaemer, W. E.**, "Passenger Tire Power Consumption", SAE Paper 710575, Society of Automotive Engineers, Detroit, 1969.
 45. **Elmer O.C.**, "Adhesion to Glass Fibers to Rubber 1" (to The General Tire ad Rubber Co.), U.S. 3, 895,163, July 15, 1975.
 46. **Elmer O.C.**, "Adhesion to Glass Fibers to Rubber 2", (to The General Tire ad Rubber Co.) U.S. 3, 955,033, May 4, 1976.
 47. **Ellinger H. E. and Hathaway R.B.**, Automotive, Suspension, Steering, and Brakes, 1992.
 48. **Energy Statistics SIEE.**, Energy-Economic Information System, Latinoamerican Energy Organization, 1996, versión #8, Quito.
 49. **Faria L. O., Odea T. Yavari B. W. W. Tworzvdlo. Bass J.M and Becker E.B.**, "Tire Modelling by Finite Elements", Tire Science and Technology. TSTCA, Vol. 20, No 1, January-March, 1992, pp. 33-56.
 50. **Foldi A. P.**, "Reinforcement of Rubber Through Short Individual Filaments". Rubber Division, American Chemical Society, New Orleans, Louisiana, October 7-10, 1975.
 51. **Fuentes Corona.**, Apuntes de conferencia sobre cargas reforzantes impartida en la Universidad Iberoamericana y organizada por el grupo hulero, Julio 1997.
 52. **García P., B.**, La Política de Hidrocarburos en el proceso de reordenación Económica 1981-1983. Fac. Economía UNAM, 1989.
 53. **Gent A. N.**, Engineering with Rubber. How to Design Rubber components. Under the Auspices of the Rubber Division of the American Chemical Society. Hanser 1992.
 54. **Gelling I.R.**, "Influence of Tread Polymer on Traction, Rolling Resistance, and Wear Properties of Tires" , Vehicle-Road Interaction, ASTM STP 1225, B.T. Kulakowski, De., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp. 107-118.
 55. **Gerresheim M.**, "Aerodynamic Resistance on Tires". Mech. E. Publ. C282/83, 51 1983.
 56. **Geethamma V. G., Reethamma J. and Thomas S.**, "Short Coir Fiber-Reinforced Natural Rubber Composites: Effects of Fiber Length, Orientation, y Alkali Treatment", Journal of Applied Polymer Science. Vol. 55, 583-594, 1995.
 57. **Giles C. G., Sabey B. E. Y Cardew H. F.**, "Development and Performance of the Portable Skid Resistance Tester", Simposium on Skid Resistance,

- Special Technical Publication 326, American Society for Testing and Materials, 1962.
58. **Gillespie, T. D.**, Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001 copyright 1992.
 59. **Girgis M. M.**, "Glass Fibers Coating Composition for Glass Fiber Filament Bundles to Produce Reinforcing Members for Elastomeric Articles" (to PPG Industries Inc.), U.S 4,164,485, August 14, 1979.
 60. **Girgis M. M.**, "Method of Preparing Phenolic Aldehyde Resin and Resin Composition for an Adhesive System to be Applied to Glass Fibers", (to PPG Industries Inc.), U.S 4,164,485. July 12, 1983.
 61. **Groves I.F., Lever T.J. y Hawkinns N.A.**, "Dynamic Mechanical Analysis- A Versatile Technique for the viscoelastic Characterisation of Materials" . 1980. International Labmate Vol. XVII Issue II. Marlin Scientific Ltd., Watford, UK.
 62. **Grugett B. C., Reinmann M. E., and Thompson G. D.**, "Pressure effect on tires" SAE Tech. Pap. 810069, 1981.
 63. **Guth E. S., Gold O. Zeit K.**, Thesis, Viena. 1937, Kolloid Zeit..
 64. **Guth N.**, Journal of Applied Physics 16 (21), 1951.
 65. **Haddad Y. M.**, Viscoelasticity of Engineering Materials. Chapman & Hall 1995.
 66. **Harper. C. A.**, Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites. McGraw-Hill, Inc. 1975.
 67. **Hays, D. F.**, "The Physics of Tire Traction". Theory and Experiment. New York, 1974.
 68. **Hess W. M. and Klamp W. K.**, "The Effects of Carbon Black and other Compounding Variables on Tire Rolling Resistance and Traction". American Chemical Society, Rubber Division, Chicago Illinois. October 5-7 1982.
 69. **Hill S. W. and Moore R. C.**, "Tire Rolling Resistance, Its Effect on Vehicle Fuel Economy and Other Performance Areas", Proceedings , Akron RubberGroup Technical Seminar, 27 Oct. 1978.
 70. **Hirakawa H. and Ahagon, A.**, " New Process for Preparing Tire Tread Compounds Having Low Rolling Resistance", Tire Science and Technology, Vol. 10, Nos. 1-4, Jan-Dec. 1982, pp. 16-22.
 71. **Hull D.** An Introduction to Composite Materials. Cambridge, Solid State Science Series. 1988.
 72. **Hunt J.D., Walker J.D. y Hall G. L.**, "Tyre Rolling Losses and Fuel Economy", SAE Conf. Proc. 161, October 1977.
 73. **Informe del Servicio de Energía a la Comisión Energética de la LVII. Legisl.**, 12 de noviembre de 1997.
 74. **Ivens J.**, "Effect of the Temperature on Passenger Car Tires" SAE Tech. Pap. 890642, 1989.
 75. **Jannarelli, A. E.**, "Effect of the Resistance of Passenger Car tire Retreads Compared to Rolling Resistance of New Tires", National Tire Dealer and Retread Association, Washington, DC, February 1981
 76. **Jablonski E. J.**, "Tire Aerodynamics", presented at 2nd annual meeting. Tire Society, Akron, OH, March 1983.

77. **Kaufman M.**, Giant Molecules. The Technology of Plastics, Fibres, and Rubber. Aldus Books London. 1980.
78. **Keefe R. L. and Koralek A. S.**, "The Relations Between Rolling Loss and Tread Patern", Rubber Div. Symp. 1, 78, 1983.
79. **Kikuchi N.**, "Tires Made of Short fibre Reinforced Rubber". Sumitomo Rubber Industries. Jun, Linda Hall Library. 1996.
80. **Kinlock A., J.**, "Adhesion and Adhesives Science ad Technology". Chapman & Hall, 1995.
81. **Klingbell W. W.**, "Non-linear Tire Model" presented at ASTM F-9 Committee Meeting Richfield, OH, Nov, 1989.
82. **Khromov M. K and Konovalova N. P.**, "Rolling Losses of Tyres", Soviet Rubber Technology, Vol.29, No. 8, 1970, pp.45-47.
83. **Knight, R. E.**, SAE Publ. SP-546, 97. 1983.
84. **Kraghelsky Y. V. and Nepomnyashchi E. F.** "Fatigue Wear under Elastic Contact Conditions". Institute for Machine Research, Academy of Science of the USSR Moscow August 10, 1964.
85. **Kraguski L. V., and Nepomnyashchü, EF.** "Fatigue Wear under Elastic Contact Conditions" Wear, Vol. 8, p.303,1965.
86. **Kummer H.W.**, "Unified Theory of Rubber and Tyre Friction", Engin. Res. Bulletin b-94, Penn. State Univ, 1966, 34.
87. **Lansdown A. R. and Price A. L.**, "Materials to resist wear" A guide to their Selection and Use. Pergamon Press, 1986.
88. **Lin K. C.**, "Glass Fibers Coated with Polybutadieno Homopolymer Latex "(to Owens-Corning Fiberglass Corp.) U.S. 4,060,658, November 19, 1977.
89. **Lippmann S. A., Oblizajek K. L. and Matters J. J.**, SAE Paper No. 780258 1978.
90. **Loo M.**, "Tire Continuous Fiber " Tire Sci. Technol. 13, 67, 1985.
91. **Lou A. Y. C.**, "Tire Science and Technology". 6, (3), 176, 1978.
92. **Lubin G.** Handbook of Composites. Nostrand Reinhold Company Inc. 135 West 50th Street, New York, N.Y. 10020.1980.
93. **Luchini J. R., Peters J. M. And Arthur R. H.** "Tire Rolling Loss Computation with the Finite Element Method", Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 22, No. 4 October-December 1994, pp. 206-222.
94. **Luchini J. R., and Simonelli L. A.**, "Fuel consumption on Tires", Rubber Div. Symp. 1, 140, 1983.
95. **Mallick, P. K.**,. Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design, Second edition.1988.
96. **Marks C.**, "Which Way to Achieve Better Fuel Economy?", presented at the California Institute of Technology Seminar Series on Energy Consumption in Private Transportation, Pasadena, Calif., 3 Dec. 1973.
97. **Mark J., Erman B., and Eirich F.**, "Science ad Thechnology of Rubber" Academic Press. 1994, pp. 675-718.
98. **Markow E. G.**, "Band Reinforced Radial Tire", Unites States Patent No. 4,111,249 Nov. 8, 1976.
99. **Martini M. E.**, "Traction and Wear in Contrast of Rolling Loss", Rubber Div. Symp. 1, 181 1983.
100. **Marzocchi A.**, "Adhesion to Glass Fiber to Rubber", (to Owens-Corning

- Fiberglass Corp.), U.S. 3,796,627, March 12, 1974.
101. **Miller B.**, "Measurement and Mechanical Aspects of de Microbond Pull Out Technique for Obtaining Fiber/resin interfacial shear strength" *Composites Science and Technology*, pp 207-219, 1991.
 102. **Moore D. F.**, *Viscoelastic Machine Elements. Elastomers and Lubricants in Machine Systems.* Butterworth-Heinemann. 1993.
 103. **Moore D. F.**, *The Friction of Pneumatic Tyres.* Amsterdam, 1975.
 104. **Moore K.J.**, "Reducing Tyre Energy Losses for Better Fuel Economy", *The SAE Australasia*, pp. 120-125 . May/June 1981.
 105. **Moult H.**, *Handbook of Adhesives*, 2nd Ed., I. Skeist, ed., New York: Van Nostrand Reinhold Publishing Corp., pp. 661-668. 1977.
 106. **Nagdi K.**, "Rubber as Engineering Material: Guideline for Users", Hanser Publishers, 1993.
 107. **Neubert T. C.**, "Lignin Amine Carboxylated Conjugated Diene Tire Cord Adhesives" (to The General Tire and Rubber Co.), U.S 4,204,984, October 17, 1977.
 108. **Novopolsky, V. I.**, "Passenger Tire Rolling Resistance at High Speeds", *Revue Générale du Caoutchoue*, vol. 36, N.o 10, 1959, pp. 1521-1529.
 109. **O'Connor J. E.**, "Short-Fiber Reinforced Elastomer Composites", paper presented at a meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, Chicago Illinois, May 3-6, 1977.
 110. **Ogorkiewicz, R. M.**, "Effect of the Load on the Tire Rolling Resistance", *Automotive Engineer* 49, 177, May 1959.
 111. **Pacejka, H. B.**, "Tyre Factors and Vehicle Handling." 1978.
 112. **Peters L. A., Visic J.C. and Cain D.E.** "Silica reinforcement of oil field elastomers for improved decompression resistance" *Rubber World*, December 1990.
 113. **Pericarpio E. P. and Bevilacqua E. M.**, "Lubricated Friction of Rubber. I, II, III, IV and V. Influence of Rubber Resilience and Hardness on Friction" Presented at a meeting of the Division of Rubber Chemistry, American Chemical Society, Cleveland, Ohio, April 23-26, 1968.
 114. **Pirkovskii Y.V.**, " Development of the Theory of Rolling of a Wheel with an Elastic Pneumatic Tyre" , *Vestnik Mashinostroeniya*, vol. 67, Issue 12, 1987, pp. 28-31.
 115. **Porter N. K.**, "Some mayor Variables in RFL Formulatiois and Their Effect on Dipped Cord Properties", *Journal of coated Fabric*, volume 23-July 1993.
 116. **Pottinger M. G.**, " The Three- Dimensional Contact Patch Stress Field of Solid and Pneumatic Tires", *Tire Science and Technology*, TSTCA, vol. 20. No. 1 January-March, 1992, pp. 3-32.
 117. **Powell P. C.**, *Engineering with Polymers.* Chapman and Hall LTD 1983.
 118. **Rahalkar R.** "Dependence of Wet Skid Resistance upon the E-ntaglement Density and Chain Mobility According to the Rouse Theory of Viscoelasticity." Polysar Limited, Sarnia, Ontario Canada N7T 7M2. October 7, 1988.
 119. **Read B. E. and Dean G. D.**, "The Determination of Dynamic Properties of Polymers y Composites", Adam Hilger, Bristol, 1978.
 120. **Reynolds O.**, "On Rolling Friction", Owens College, Manchester.

Communicated by Profesor b. Stewart, F.R.S. Received May 24, Read June 17, 1875.

121. **Rijkema B. and Weening W. E.**, "The Mechanical Properties of RFL Adhesives and Influence on Cord-In-Rubber Composites", Akso Fibers. Rubber World, Sept, 1994.
122. **Rhode, D.**, "Investigation into the Influence Parameters on Rolling Resistance and the Development of and Energy Optimised Tire", presented at 6th Annual Meeting Tire Society, Akron, OH. March 1987.
123. **Roberts G. B.**, "Power Wastage in Tires" Proceedings International Rubber Conference, american Chemical Society. Washington DC pp.57-72. 1959.
124. **Ryant M. I.**, "Method to Improve Adhesion to Glass Fiber To Rubber" (to Burlington Industries, Inc.), U.S. 3,698,983, October 17, 1972.
125. **Saito Y.**, "Rolling Loss of Pneumatic Tires", Kautsch, Gummi, Kunstst. 38, 178 .1986.
126. **Sakhnovskii N. L., Alekseeva I.K., Khromov M. K. and Evstratov V. F.**, "The Effect of Tread Rubber on the Rolling Loss of Large Truck Tires" Intl. Polymer Science and Techn. 1, (3), T14, 1974.
127. **Sarkar K. Kwon Y. D. and Prevorsek D. C.**, "A New Approach for the Thermomechanical Analysis of Tires by the Finite Element Method". Tire Science and Technology, TSTCA. Vol. 15 No. 4 October-December 1987, pp. 261'275.
128. **Sarver K. F.**, "CAD/CAE: A Look at Tire Design Engineering" Firestone Tire and Rubber Co. Rubber World, June 1987, pp. 26-29.
129. **Sasaki S.**, (to Tokyo Rubber Co. Ltd.), JP 47/26107 .July 14, 1972.
130. **Savkoor, A. R.**, "The Relation of the Adhesional Friction of Rubber to the Friction between Tyre and Ground". Vehicle Research Laboratory of the Technological University Delft, 1970.
131. **Seki K., Sasaki, S. and Tsunoda H.**, "Tyre Rolling Resistance", Automobile Engineer, Vol. 59, March 1969, pp. 88-91.
132. **Schallamach A.**, "Friction and Abrasion of Rubber". The British Rubber Producers. Research Association, Welwyn Garden City, England. Vol. 1. pp. 384-417, 1958.
133. **Schuring D. J.**, "Rolling Loss on Tires", Rubber Chem. Technol. 53, 600, 1980.
134. **Schuring D. J., and Hall G. L.**, ""The Rolling Loss and the Effect of the Temperature on Tires", Rubber Chemistry Technology, 54, 1113, 1981.
135. **Schuring D.J.**, "The Rolling Loss of Pneumatic Tires" De., Rubber Divisions Symposia, vol. 1, Tire Rolling Resistance, October 1982.
136. **Schuring D.J.**, "Tread Contribution to the Rolling Loss", SAE Trans, 92, Paper 830158 (1983)Chemistry Society, Akron, OH 1983.
137. **Schuring D.J.**, "A General Definition of Tire Energy Loss for All Modes of Tire Operation on Curved and Flat Roadways" presented at ASTM F-9 Spring Meeting, Cleveland, OH. May 1976.
138. **Schuring D.J. and Speyer, A. G.**, "The Rolling Loss and Pressure Increase", SAE Tech. Pap. 831027 1983.
139. **Schuring D.J.**, "Tire Rolling Loss- An Overview", plenary lecture presented at 7th annual meeting and conference of Tire Science and Technology,

- Akron, Ohio, March, 1988.
140. **Schuring D. J. and Clark J. D.**, "Load, Speed, and Pressure Effects on Passenger Car Tire Rolling-Loss Distribution", Rubber Chemistry and Technology, vol. 61, 1987, pp. 669-687.
 141. **Schuring D.J., and Futamura.**, "Rolling Loss of Pneumatic Highway Tires in the Eighties" Rubber, Chemistry and Technology, vol. 63, 1990, pp. 315-367.
 142. **Schuring D.J., Siegfried J. F., and Hall G. L.**, "Transient Speed and Temperature Effects on Rolling Loss of Passenger Car Tires" SAE trans. 94, 3.515, 1985.
 143. **Seitz H., Pieper H., & Frerichs U.**, "Vehicle Wheel". United States Patent No. 4,577,668. Mar. 25, 1986.
 144. **Shirono K.**, (to Kuraray Co., Ltd.), JP 49/29886, August 8, 1974.
 145. **Solomon T. S.**, "Adhesion of glass fibers to Rubber", Rubber Chemistry, Technol., 58:561-576. 1985.
 146. **Sone K., Ishida M., Ishiguro M., Hatta T., Kasei M. and Fujimoto K.** "Characterisation of Physical Properties of SBR/Carbon Black Masterbatch". Institute of Technology, Rubber World, June 1994.
 147. **Stiehler R. D., Steel M. N., Rickey, G. G., Mandel J. and Hobbs R. H.**, "Power Loss and Operate Temperatures of Tires", Proceedings International Rubber Conference, American Chemical Society, Whashington, D. C., 1959, pp.73-84.
 148. **Szczepaniak C.**, Fundamentos de Diseño del Automovil. C.E.C.S.A.1982
 149. **Takeyama T. and Matsui J.**, "Latex/Rubber Combinations", Rubber Chemistry ad Technology, 42:159-256. 1969.
 150. **Tarpian H.D., Nybakken G. H., and Mishory J.**, "The Effect of Carbon Black on the Rolling Loss of Truck Tires", SAE Paper 7907226, 1979.
 151. **Thieme, Dijks y Bobo.**, "Measurement of Tyre Properties", in "Mechanics of Pneumatic Tyres", Chapter 8, Ed. Clark S.K., US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC 20590, 1981, 584.
 152. **Treichel, D.**, "Rolling Loss Reductions of Truck Tire and their Effect on Fuel Consumption", SAE Proc. P 126, 2, 87.1 1982.
 153. **Treloar L.R. G.**, Introduction to Polymer Science. The Wykeham Science Series for schools and universities, 1970.
 154. **Trivisono N. M.**, "A Review of Radiation Tire Thermography". The International Tire Society Conference, March 1992.
 155. **Uffner W. E.**, "Method to Increase the Adhesion between Glass Fibers and Rubber", (to Owens-Corning Fiberglas Corp.), U.S.3,707,399, December 26, 1972.
 156. **van der Pol J.F, Papegaaji P. E. and Vos L.J.**, "Aramid fibers y Adhesion to Elastomers: Aplication y Performance"Rubber World, November, 1996.
 157. **van der Pol J.F and Vos L.J.**, "Short Fibre Reinforcement of Elastomers" International Polymer Science and Technology, Vol. 22, No. 8, 1995.
 158. **Veith A. G.**, Akron Rubber Group Technical Symposia, Jan 1980."
 159. **Walker L. A. and Fath M. A.**, "Relation between Rolling Loss and Rebound" Paper presented at a meeting at the Rubber Division, American Society,

Cleveland Ohio, October 23 al 26, 1979.

160. **Walter J. F. and Conant F.S.**, " Energy Losses in Tires", Tire Science and Technology. TSTC, vol. 2 No. 4, Nov. 1974, pp. 235-260.
161. **Warner M. P.**, "Reinforcing Silicas and Silicates" Rubber Chemistry and Tecnology, vol. 49, 1976
162. **Watanabe S.**, "Slippage Preventing Tire Method for Producing a Tread Surface of a Slippage Preventing Tire and Method for Producing a Slippage Preventing Tire", Patente no. 5,603,367. February 18, 1995.
163. **Watt W., Philips L., N., & Johnson W.**, "High-Strength High-Modulus Carbon Fibres". The Engineer 221, pp. 815-816, 1966
164. **Williams, A. R.**, "The Influence of Tyre and Road Surface Design on Tyre Rolling Resistance", Inst, Petroleum Rep. IP 81-003, London, UK 1981.
165. **Winspear G. G.**, "The Vanderbilt, Rubber Handbook" Published by R.T. Vanderbilt Company, Inc. New York, 1958.
166. **Wischhusen M.**, "Designing Rolling Resistance Characteristics" manager of product engineering at Michelin America's Research and Development Corp. Greenville, S.C. 1994.
167. **Wicker D. and Rohde M.**, "A Thermo-Viscoelastic Finite- Element Model" SAE Tech. Pap. 810161, 1981.
168. **Yamagishi K., Togashi M., Furuya S., Tsukahara K. and Yoshimura N.**, "A study on the contour of the truck and Bus Radial Tire" Tire Sci. Technol.15 (3) 1987.
169. **Yavari B. Tworzydlo W. W. and Bass M. J.**, "A Thermomechanical Model to Predict the Temperature Distribution of Steady State Rolling Tires". Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 21 No. 3, July-September, 1993, pp. 163-178.
170. **Yoshioka A., Komuro K., Ueda A., Watanabe H., Akita S., Masuda T. and nakajima A.**, "Rolling Loss of Pneumatic Tires", Pure Appl. Chem. 581698, 1986.
171. **Young R. J. and Lovell P. A.**, Introduction to Polymers, second edition. Chapman and Hall. 1988.
172. **Yoshimura N., Okuyama M. and Yamagishi K.**, "Rolling Loss Measurements" Rubber Div. Symp. 1, 51 1983.
173. **Zegelaar P. W. A., Gong S. and Pacejka H. B.**, "Tyre Models for the Study of In-Plane Dynamics". Vehicle Research Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Delft University of Technology, Mekelweg 2, 2628 CD Delft. The Netherlands, pp. 578-591. 1990.

FALTA PAGINA

No. **193**

Apéndice

Pérdida de energía en un material viscoelástico bajo un esfuerzo cíclico

La fig. A1 muestra al vector esfuerzo y al vector deformación unitaria representando un material viscoelástico. El vector deformación esta defasado un ángulo δ con respecto al vector esfuerzo.

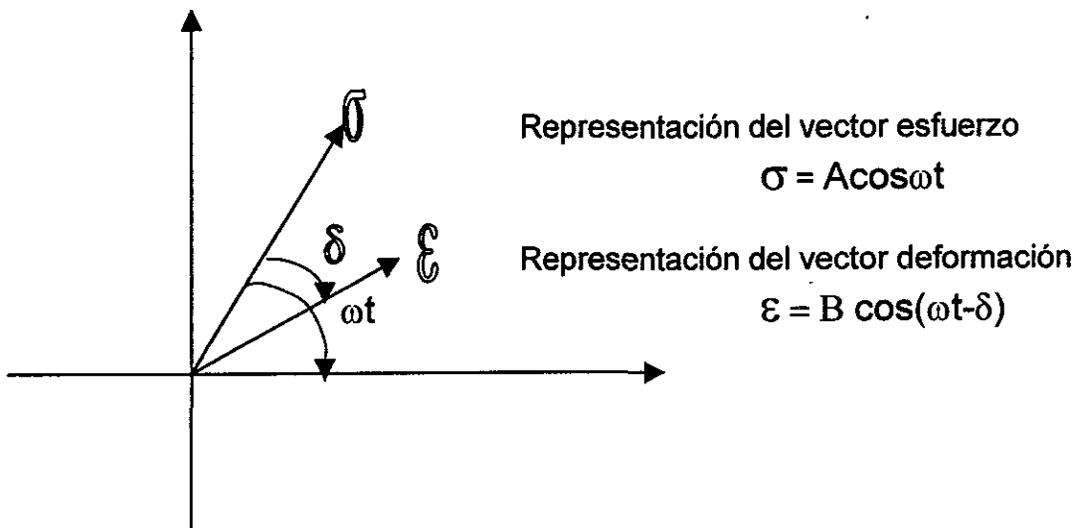


Fig. A1 Diagrama vectorial del comportamiento teórico de un material viscoelástico

El trabajo por ciclo realizado sobre un volumen unitario es:

$$\int_0^{2\pi/\omega} \sigma d\epsilon = -\omega AB \int_0^{2\pi/\omega} \cos \omega t \sin(\omega t - \delta) dt = -AB\omega \int \cos \omega t [\sin \delta \cos \omega t - \cos \delta \sin \omega t] dt$$

$$=AB\omega \frac{\pi}{\omega} \text{sen } \delta = \pi AB \text{sen } \delta = \frac{\pi}{E'} A^2 \text{sen } \delta \cos \delta = \frac{\pi}{2E'} A^2 \text{sen } 2\delta \quad (1)$$

$$E' = \frac{A \cos \delta}{B} \quad (2)$$

$$E'' = \frac{A \text{sen } \delta}{B} \quad (3)$$

De acuerdo a la ecuación (1) para un esfuerzo dado la pérdida aumenta con el ángulo δ y disminuye con la rigidez representada por E' . Los módulos de almacenamiento y de pérdida se definen respectivamente como E' y E'' .