

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL
ANTIVIBRACIÓN PARA PROTECCIÓN DE LAS
EXTREMIDADES SUPERIORES**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO QUÍMICO

**PRESENTA:
JESÚS SERGIO MARÍN HUEL GAS**



MEXICO, D.F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente	Prof. Carlos Guzmán de las Casas
Vocal	Prof. Ramón Edgar Domínguez Betancourt
Secretario	Prof. Mirna Rosa Estrada Yáñez
1er Suplente	Prof. Francisco López Serrano Ramos
2do Suplente	Prof. Eduardo Vivaldo Lima

Sitio donde se desarrolló el tema: Instituto de Investigaciones en Materiales.
UNAM. México, D.F.

Dra. Mirna Rosa Estrada Yáñez
Asesor del tema

Jesús Sergio Marín Huelgas
Sustentante

Agradecimientos

A Dios.

Por colocarme en este tiempo y en este espacio.

A mis Padres.

Por todo su apoyo y amor incondicional en este cuarto de siglo.
Este trabajo también es de ustedes.

A mis hermanas, Ani y Cristi.
Por su ejemplo y cariño.

A Ángela y Gabriel, mi nueva familia.
Por llegar justo en el momento indicado.

A mis amigos de la facultad, Adrián, Ale, Claus, Diego, Gustavo, Iván, Joel,
Juanito, Licha, Liliana, Marco, Mariana, Marisol, Paula, Ramón, Sara, Súper,
Víctor, Virginia y Viri, pero muy en especial a Bere.

Al gremio de ingenieros químicos, por hacer más fácil la vida diaria.

A la Dra. Mirna Rosa Estrada Yáñez.
Por interesarse en este proyecto, y por todas las horas dedicadas a este
trabajo.

A los compañeros del laboratorio E-008 del Instituto de Investigaciones en
Materiales, Lilian, Leo, Martín y Daniel.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.
Germen de humanismo y sabiduría.

A la Biblioteca Central.
Cuya majestuosidad no sólo se encuentra por fuera de sus muros, sino también
dentro de ellos.

Quisiera agradecer en especial a los técnicos Esteban Fregoso Israel del Instituto de Investigaciones en Materiales y Marisela Gutiérrez Franco de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación de la Facultad de Química, cuyos servicios son realmente de primer nivel.

ÍNDICE	PÁGINA
I. Introducción.	1
1.1. Objetivo.	2
1.2. Motivación.	2
II. Marco teórico.	4
2.1. Enfermedades de las manos causadas por vibración.	4
2.1.1. Trastornos debidos a la temperatura.	5
2.1.2. Trastornos neurológicos.	5
2.1.3. Trastornos musculares.	5
2.1.4. Fenómeno de Raynaud.	5
2.2. Las vibraciones.	6
2.2.1. Las ondas.	6
2.2.2. Características de las ondas.	7
2.2.3. ¿Qué se propaga en un movimiento ondulatorio?	8
2.2.4. Relación entre aceleración y frecuencia.	9
2.3. NOM-024-STPS-2001. Vibraciones-condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.	9
2.4. El amortiguamiento.	13
2.4.1. Polímeros aptos para amortiguar vibraciones.	15
2.4.1.1. Elastómeros.	15
2.4.1.2. Polímeros viscoelásticos.	16
2.5. La viscoelasticidad.	17
2.5.1. Viscoelasticidad en polímeros.	19
2.5.2. Métodos experimentales: evidencias de comportamiento viscoelástico.	19
2.5.3. Energía almacenada y disipada.	22
2.6. Técnicas de caracterización.	24
2.6.1. Espectroscopía infrarroja.	24
2.6.2. Espectroscopía de resonancia magnética nuclear.	24
2.6.3. Calorimetría diferencial de barrido.	24
2.6.4. Análisis termogravimétrico.	24
2.6.5. Microscopía electrónica de barrido.	25
2.6.6. Espectroscopía por dispersión de energía.	25
2.6.7. Análisis dinámico mecánico.	25
III. Parte experimental.	26
3.1. Material.	26
3.2. Equipo de caracterización.	27
3.3. Caracterizaciones.	27
3.3.1. Espesor.	27
3.3.2. Densidad.	27
3.3.3. Espectroscopía infrarroja.	28
3.3.4. Espectroscopía de resonancia magnética nuclear.	28
3.3.5. Calorimetría diferencial de barrido.	28

3.3.6. Análisis termogravimétrico.	29
3.3.7. Microscopía electrónica de barrido.	29
3.3.8. Espectroscopía por dispersión de energía.	29
3.3.9. Análisis dinámico mecánico.	29
IV. Resultados y discusión.	31
4.1. Espesor.	31
4.2. Densidad.	31
4.3. Espectroscopía infrarroja.	32
4.4. Espectroscopía de resonancia magnética nuclear.	34
4.5. Calorimetría diferencial de barrido.	38
4.6. Análisis termogravimétrico.	39
4.7. Microscopía electrónica de barrido.	40
4.8. Espectroscopía por dispersión de energía.	41
4.9. Análisis dinámico mecánico.	44
V. Conclusiones.	52
VI. Referencias.	53

1. INTRODUCCION

A principios de 1918 una enfermedad de trabajo fue identificada en Bedford, Indiana en los Estados Unidos de Norteamérica. Esta nueva enfermedad se presentaba en trabajadores cuya actividad laboral consistía en trabajar con herramientas pesadas y generadoras de fuerzas oscilatorias. Los síntomas que presentaban eran tales como entumecimiento de las extremidades superiores, sucesivos temblores en las manos y pérdida de la fuerza de agarre en los dedos. Esta enfermedad fue llamada HAVS por las siglas en inglés de Hand-Arm-Vibration-Syndrome, o en español síndrome de vibración mano-brazo¹.

Desde ese entonces numerosos trabajos de investigación se han llevado a cabo alrededor del mundo en las áreas de la medicina, epidemiología, ingeniería y aspectos legales sobre el HAVS; con el fin de conocer las causas de esta enfermedad, las formas de evitarla y la manera en que se pueden reducir sus padecimientos.

El HAVS es causado en su totalidad por la transmisión de las vibraciones de herramientas manuales y fijas, estas herramientas o equipos para poder funcionar emiten una fuerza oscilatoria, la cual se manifiesta en forma de vibraciones, estas vibraciones al ser una forma de energía mecánica deben transmitirse hacia algún lugar, el lugar al que se transmiten son las extremidades superiores de los trabajadores que operan con dichas herramientas².

El HAVS se presenta en varias actividades industriales en las cuales se encuentran muy extendidos procesos y herramientas a motor que exponen las manos del operario a vibraciones. La exposición del origen profesional a las vibraciones transmitidas a las manos proviene de las herramientas a motor que se utilizan en fabricación, explotación de canteras, minería y construcción, agricultura y trabajos forestales, y servicios públicos. También puede producirse exposición a vibraciones transmitidas a las manos por piezas vibrantes sostenidas con las manos del operario, como en el amolado de columna, y por controles manuales vibrantes, como al utilizar cortacéspedes o controlar rodillos vibrantes para compactación de carreteras. De esta manera el HAVS esta presente en toda

industria, en todos los países. Es un problema de que afecta alrededor del 46% de los trabajadores que usan estas herramientas.²

Si bien, tanto las vibraciones que producen estas herramientas son inevitables, también lo es la necesidad de su uso, por tanto no podemos dejar de usarlas, y tampoco podemos hacer que no produzcan vibraciones; lo que si podemos hacer es atenuar la transmisión de energía vibratoria a las manos. La manera de alcanzar este fin se da por varios medios: se pueden hacer adaptaciones a las herramientas para que las vibraciones se reduzcan de manera significativa, por ejemplo colocando diapasones en puntos estratégicos de la herramienta, o fabricando los manerales de un material antivibración; se puede también modificar la forma de trabajar de los operarios, sugiriéndoles que sostengan las herramientas sin tanta fuerza; o se puede desarrollar equipo de protección personal para las manos (guantes) que tengan la propiedad de atenuar la vibración transmitida a las manos y los brazos. Esta investigación se basa en la caracterización del material polimérico contenido en un guante antivibración comercial.

México es uno de los países con mayor mano de obra en el mundo, desgraciadamente en este gran país no se tiene una cultura de la protección, por tanto la investigación y fabricación de productos como éstos es nula. Esta investigación sentará una base sobre los materiales antivibración usados para proteger las extremidades superiores de los trabajadores.

1.1 Objetivo

Caracterizar el material polimérico antivibración contenido en un guante comercial de marca Gelfôm con el fin de implementar la caracterización y conocer sus propiedades características y sus componentes.

1.2 Motivación

Esta tesis de investigación es un primer paso para crear un *know how* sobre como se caracteriza un material antivibración para su posterior desarrollo, el cual en un futuro cercano podrá ser fabricado en territorio nacional para guantes y otras

aplicaciones. Además de resaltar la importancia del equipo de protección personal en el trabajo.

2. MARCO TEORICO

2.1 Enfermedades de las manos causadas por vibración.³

Las vibraciones transmitidas a las extremidades superiores son las vibraciones que entran en el cuerpo a través de las manos. Son causadas por distintos procesos de la industria, la agricultura, la minería, la construcción, servicios públicos, agricultura y trabajos forestales en los que se sostienen o empujan herramientas o piezas vibrantes con las manos o los dedos. La exposición a las vibraciones transmitidas a las manos puede provocar diversos trastornos³.

La exposición excesiva a las vibraciones transmitidas a las manos puede causar trastornos en los vasos sanguíneos, nervios, músculos, huesos y articulaciones de las extremidades superiores. Los niveles de frecuencia se clasifican en tres categorías, frecuencias bajas (1-16Hz), las frecuencias medias (16-400Hz) y las altas frecuencias (100-1600Hz)^{4,5}. Los resultados experimentales indican que la sensibilidad humana a la vibración disminuye a medida que aumenta la frecuencia. Las frecuencias muy bajas también son inofensivas para el ser humano.

La expresión “*síndrome de vibraciones mano-brazo*” se utiliza comúnmente en referencia al grupo de síntomas asociados con exposición a vibraciones transmitidas a las manos, como:

- Trastornos vasculares;
- Trastornos neurológicos;
- Trastornos de los huesos y articulaciones;
- Trastornos musculares;

Actividades tales como la conducción de motocicletas o el uso de herramientas vibrantes domésticas pueden exponer las manos esporádicamente a vibraciones de gran amplitud, pero sólo las largas exposiciones diarias pueden provocar problemas de salud.

2.1.1. Trastornos debidos a la temperatura.

La exposición al frío agrava la depresión táctil inducida por las vibraciones, debido a que la baja temperatura tiene un efecto vasoconstrictor en la circulación digital y reduce la temperatura de la piel de los dedos. En trabajadores expuestos a vibraciones que trabajan habitualmente en ambientes fríos, los episodios repetidos de deterioro agudo de la sensibilidad táctil pueden conducir a una reducción permanente de la percepción sensorial y a la pérdida de destreza de manipulación lo que, a su vez, puede interferir en la actividad laboral y elevar el riesgo de lesiones graves por accidentes.

2.1.2. Trastornos neurológicos.

Los trabajadores que manejan herramientas vibrantes pueden sufrir hormigueo y adormecimiento de dedos y manos. Si la exposición a las vibraciones continua, estos síntomas tienden a empeorar y pueden interferir con la capacidad de trabajo y las actividades de su vida diaria. Los trabajadores expuestos a vibraciones pueden presentar umbrales vibratorios térmicos y táctiles mas elevados. Se ha sugerido que la exposición continúa a las vibraciones no sólo puede deprimir la excitabilidad de los receptores de la piel sino también inducir alteraciones patológicas en los nervios de los dedos, tales como edema perineural, seguido de fibrosis y pérdida de fibra nerviosa.

2.1.3. Trastornos musculares.

Los trabajadores expuestos a vibraciones pueden quejarse de debilidad muscular y dolor en las manos y brazos. En algunos individuos la fatiga muscular puede causar discapacidad. En algunos estudios de seguimiento de leñadores se ha comunicado una disminución de la fuerza de agarre en la mano.

2.1.4. Fenómeno de Raynaud.

Se han utilizado diversos sinónimos para describir los trastornos vasculares inducidos por vibraciones: dedo muerto o blanco, fenómeno de Raynaud de origen profesional, enfermedad vasospástica traumática y, más recientemente, dedo

blanco inducido por vibración (VWF vibration white finger). Clínicamente, el VWF se caracteriza por episodios de dedos blancos o pálidos causados por oclusión espástica de las arterias digitales. Los ataques suelen desencadenarse por el frío y duran de 5 a 30 o 40 minutos. Durante un ataque puede experimentarse pérdida completa de sensibilidad táctil. En la fase de recuperación, normalmente acelerada por calor o masaje local, puede aparecer enrojecimiento de los dedos afectados a causa de un aumento reactivo del flujo sanguíneo en los vasos cutáneos. En los casos avanzados, los ataques vasospásticos digitales graves y repetidos pueden conducir a alteraciones tróficas (ulceración o gangrena) en la piel de las puntas de los dedos. Para explicar el fenómeno de Raynaud inducido por el frío en trabajadores expuestos a vibraciones, algunos investigadores señalan un reflejo vasoconstrictor simpático central exagerado causado por exposición prolongada a vibraciones perjudiciales, mientras que otros tienden a enfatizar el papel de las alteraciones locales inducidas por las vibraciones en los vasos digitales.

Se ha descubierto que el VWF está relacionado con el uso de herramientas de percusión para el trabajo de metales, amoladoras y otras herramientas rotativas, martillos percusores y perforadores utilizados en excavación, maquinaria vibrante empleada en el trabajo forestal y otras herramientas y procesos motorizados. El VWF está reconocido como enfermedad de origen profesional en muchos países. Desde 1975–80 se comunicó un descenso de la incidencia de nuevos casos de VWF entre trabajadores forestales tanto en Europa como en Japón, tras la introducción de sierras de cadena con sistemas antivibración y la aplicación de medidas administrativas que reducen el tiempo de utilización de las sierras. No se dispone aún de hallazgos similares para otros tipos de herramientas.

2.2. Las vibraciones.

2.2.1. Las ondas.

En un gran número de fenómenos naturales, lo mismo que en la mayoría de las actividades humanas, la energía se transmite de un lugar a otro, transmisión que es de gran importancia, esta transmisión de energía puede efectuarse de diversas

maneras: junto con la materia, a través de la materia o por medio de ondas. Una onda es una perturbación de alguna propiedad de un medio, que se propaga a través del espacio transportando energía⁶.

2.2.2. Características de las ondas.

Para poder estudiar las ondas, como se comportan, como interaccionan entre sí y con los cuerpos con que se ponen en contacto, es necesario tener en cuenta sus características⁷ (ver Figura 1).

- *Elongación (e)*, es la distancia que hay entre la posición del punto de la onda, y la posición que tenía en el equilibrio, la elongación de cada partícula varía constantemente, llamándose a la elongación máxima *amplitud (A)*, ambas deben medirse en unidades de longitud.
- *Crestas (C)*, son las partes altas de las ondas transversales; *valles (V)*, las partes bajas de las mismas; mientras los *nodos (N)*, son los puntos de las ondas que ocupan la posición de equilibrio. Si el cuerpo que transmite las ondas transversales no es horizontal, indiferentemente, a una mitad de la onda se le llama cresta y a la otra, valle.
- Al conjunto de una cresta y un valle completos, se les llama *Onda*, cuyo largo recibe el nombre de *longitud de onda (λ)*, la cual es una característica muy importante, porque no cambia mientras el movimiento ondulatorio se transmite en un mismo medio, midiéndose en unidades de longitud.
- *Periodo (T)*, es el tiempo que tarda en efectuarse una oscilación completa de cada partícula, o lo que es lo mismo, el tiempo que tarda en pasar una onda completa, se mide en segundos.
- *Frecuencia (f)*, es el número de oscilaciones completas que efectúa cada partícula del cuerpo agitado en un segundo, es decir, el número de ondas completas que pasa por un punto del cuerpo, en un segundo, se mide en oscilaciones por cada segundo, o hertz (Hz). La frecuencia es una característica aun más importante que la longitud de onda, porque en cada movimiento ondulatorio no cambia, aunque pase de una sustancia a otra. Así

se deduce que el periodo y la frecuencia, son dos magnitudes recíprocas, lo que se puede indicar por medio de la ecuación:

$$f = \frac{1}{T}$$

Los movimientos oscilatorios se comportan como ondas, estos movimientos también se conocen como vibratorios. Como ya se expuso anteriormente, las vibraciones están definidas como los movimientos periódicos u oscilatorios de un cuerpo rígido o elástico desde una posición de equilibrio. La frecuencia es el número de vibraciones efectuadas en un segundo. Periodo es el tiempo que tarda en efectuarse una vibración. La aceleración en una onda se define como el cambio de frecuencia en un determinado tiempo, es decir que en éste tiempo la onda modificó la frecuencia en la cual se estaba transmitiendo, incrementándola o disminuyéndola.

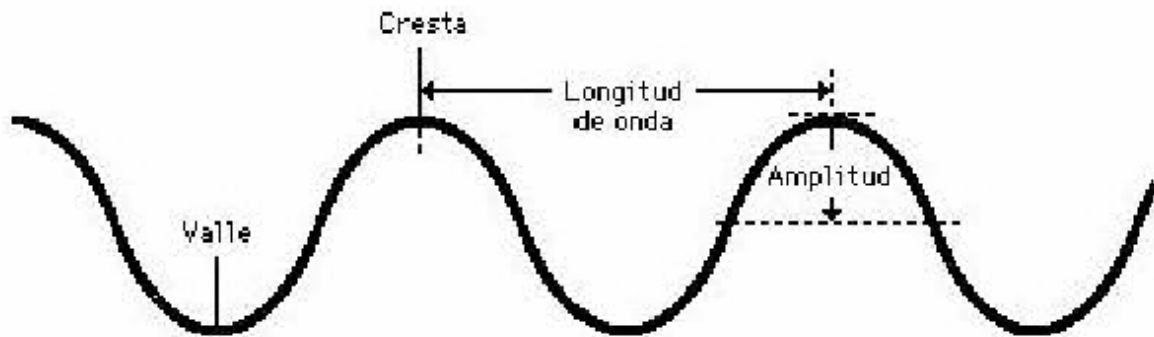


Figura 1. Partes de una onda.

2.2.3. ¿Qué se propaga en un movimiento ondulatorio?

Lo que se propaga en un movimiento ondulatorio es una condición física generada en algún lugar y que, como consecuencia de la naturaleza del fenómeno, puede ser transmitida a otras regiones. Todas las diferentes clases de ondas corresponden a ciertos tipos de movimientos de átomos o moléculas del medio a través del cual la onda se propaga, pero los átomos, en promedio, permanecen en sus posiciones de equilibrio. Entonces, lo que se propaga no es la materia, sino su estado de movimiento. Las condiciones dinámicas se describen usando los conceptos de momentum y energía, se puede decir:

En un movimiento ondulatorio se transmite o propaga momentum y energía. Así en una onda se puede propagar la energía vibratoria que se ha generado en un punto⁷.

2.2.4. Relación entre aceleración y frecuencia.

La magnitud de una vibración puede cuantificarse en función de su desplazamiento, su velocidad o su aceleración. A efectos prácticos, la aceleración suele medirse con acelerómetros, los acelerómetros son transductores electromecánicos, cuya salida de información entrega una señal eléctrica proporcional a la aceleración vibratoria a que se les somete. La unidad de aceleración es el metro por segundo al cuadrado (m/s^2).

La magnitud de una oscilación puede expresarse como la distancia entre los extremos alcanzados por el movimiento (valor pico-pico) o como la distancia desde algún punto central hasta la desviación máxima (valor pico). Con frecuencia, la magnitud de la vibración se expresa como el valor promedio de la aceleración del movimiento oscilatorio, normalmente el valor cuadrático medio o valor eficaz (m/s^2 r.m.s. (root mean square, valor promedio de la aceleración)). Para un movimiento senoidal, la aceleración a (en m/s^2), puede calcularse a partir de la frecuencia f (en Hz) y el desplazamiento (en metros) mediante³:

$$a = (2\pi f)^2 d$$

Y expresándola dimensionalmente:

$$\frac{m}{s^2} [=] \left(2\pi \frac{1}{s} \right)^2 m \rightarrow \frac{m}{s^2} [=] \frac{m}{s^2}$$

2.3. NOM-024-STPS-2001, Vibraciones-condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.

La Secretaría de Trabajo y Previsión Social, expidió la NOM-024-STPS-2001 “Vibraciones-condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo”. Esta norma tiene por objetivo establecer los límites máximos permisibles de exposición y las condiciones mínimas de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde

se generen vibraciones que, por sus características y tiempo de exposición, sean capaces de alterar la salud de los trabajadores.

Como todas las normas oficiales mexicanas, esta norma rige en todo el territorio nacional y aplica en todos aquellos centros de trabajo en donde por las características de operación de la maquinaria y equipo, se generen vibraciones que afecten a los trabajadores en cuerpo entero o en extremidades superiores.

En la norma se define⁵:

Nivel de Exposición a Vibraciones (NEV): aceleración promedio de las vibraciones, referida al tiempo de exposición del trabajador.

Personal ocupacionalmente expuesto (POE): trabajadores que en el desempeño de sus actividades laborales están expuestos a vibraciones.

Vibraciones: movimientos periódicos u oscilatorios de un cuerpo rígido o elástico desde una posición de equilibrio.

Vibraciones en extremidades superiores: fenómeno físico que se manifiesta por la transmisión de energía mecánica por vía sólida, en el intervalo de frecuencias desde 8 hasta 1600 Hz, a las extremidades superiores del POE.

Vibraciones en cuerpo entero: fenómeno físico que se manifiesta por la transmisión de energía mecánica por vía sólida, en el intervalo de frecuencias desde 1 hasta 80 Hz, al cuerpo entero del POE.

Uno de los tópicos de los que trata la norma es sobre las obligaciones del patrón, de entre las cuales se destacan:

- Informar a todos los trabajadores sobre las posibles alteraciones a la salud por la exposición a vibraciones.
- *Vigilar que no se rebasen los límites máximos permisibles de exposición.*

La norma contempla dos clases de vibraciones que se originan en los centros de trabajo, aquellas dirigidas al cuerpo entero y aquellas transmitidas a las extremidades superiores. Establece los límites máximos de exposición para ambos tipos de vibraciones en un día.

Establece los límites máximos permisibles de exposición a vibraciones, mediante la relación entre frecuencia y aceleración. Para vibraciones en las extremidades superiores los valores máximos permitidos de aceleración ponderada son⁵:

Tabla 1. Límites máximos de exposición en manos a vibraciones en direcciones X, Y y Z.

Tiempo total de exposición diaria a vibraciones, en horas.	Valores cuadráticos medios dominantes de la componente de las aceleraciones de frecuencia ponderada que no deben de excederse ⁺ .
	ak* (m/s ²)
De 4 a 8	Hasta 4
De 2 a 4	Hasta 6
De 1 a 2	Hasta 8
Menor de 1	Hasta 12

*ak es la aceleración total, obtenida de sus tres componentes en el espacio aX, a Y y aZ.

⁺Comúnmente, uno de los ejes de vibración domina sobre los dos restantes. Si uno o más ejes de vibración sobrepasan la exposición total diaria, se han sobrepasado los valores de los límites máximos de exposición.

En cuanto a la instrumentación mínima requerida para evaluar las vibraciones, la norma señala que ésta constará de:

- a) un transductor de aceleración con respuesta lineal desde 6.3 Hz, con un peso menor a 15 gramos y sensibilidad no menor a 1 mV/ (m/s²);
- b) un analizador que cuente con filtros en bandas de tercios de octava, con características de ganancia específicas a instrumentos de medición de respuesta humana a vibraciones en extremidades superiores;
- c) un calibrador de aceleración.

La norma explica también el método de evaluación de las vibraciones para extremidades superiores.

En la fracción 8 se propone un programa para la prevención de alteraciones a la salud del POE, este programa debe incluir los siguientes cinco elementos:

- a) Reconocimiento. Consiste en recabar toda aquella información técnica y administrativa que permita seleccionar las áreas y puestos por evaluar, los procesos de trabajo en los cuales se encuentra el POE y el método apropiado para medir las vibraciones.
- b) Evaluación. La evaluación de los NEV en una jornada laboral debe realizarse bajo condiciones normales de operación.

Condiciones para la evaluación:

- La evaluación de los NEV en una jornada laboral debe realizarse bajo condiciones normales de operación.
- La evaluación debe realizarse en cada uno de los diferentes ciclos de exposición del POE.
- Los puntos de medición se deben localizar en las asas o manerales de las herramientas y equipo bajo estudio.
- La evaluación debe realizarse y registrarse al menos cada dos años cuando se esté por debajo de los límites máximos permisibles o antes si se modifican las tareas, el área de trabajo, las herramientas o equipos del proceso de manera que se hayan podido incrementar las características de las vibraciones o los ciclos de exposición.
- Registrar la temperatura del aire en el área donde el POE realiza el trabajo.

c) Capacitación y adiestramiento del POE. El POE debe ser capacitado acerca de:

- características y ubicación de las fuentes emisoras de vibraciones;
- la vigilancia y efectos a la salud;
- los NEV;
- prácticas de trabajo seguras;
- medidas de control, que deben incluir su uso, cuidado, mantenimiento y limitaciones.

d) vigilancia a la salud del POE. Se debe establecer por escrito un programa de vigilancia a la salud que incluya la periodicidad de los exámenes médicos del POE, su historia clínica completa, medidas de prevención y control medico, y el seguimiento al programa de vigilancia a la salud del POE.

- e) control. Cuando el NEV supere los límites de exposición, se deben aplicar de inmediato una o más de las medidas siguientes, de tal manera que el POE no se exponga a niveles de vibración superiores a los límites:
- a) mantenimiento a equipo y herramientas;
 - b) medidas técnicas de control como:
 - sustitución de equipos o proceso;
 - reducción de las vibraciones en las fuentes generadoras;
 - modificación de aquellos componentes de la frecuencia que tengan mayor probabilidad de generar daño a la salud del POE;
 - tratamiento de las trayectorias de propagación de las vibraciones por aislamiento de las máquinas y elementos constructivos;
 - medidas administrativas de control como el manejo de los tiempos de exposición, ya sea alternando a los trabajadores en diversos puestos de trabajo por medio de la programación de la producción u otros métodos administrativos.

La fracción 9 de la NOM-024-STPS-2001 indica que el patrón puede contratar, para tener resultados con reconocimiento oficial, una unidad de verificación, acreditada y aprobada para el reconocimiento y evaluación de las vibraciones generadas en el centro de trabajo.

Sorprendentemente el uso de equipo de protección personal como guantes antivibración no se menciona en la norma, tampoco se contempla la protección contra el riesgo de vibración en la NOM-017-STPS-2001 *Equipo de protección personal – selección, uso y manejo en los centros de trabajo*.

2.4. El amortiguamiento.

El amortiguamiento es un fenómeno consistente en disminuir la amplitud de una onda de vibración en un cierto tiempo determinado. Un efecto asociado con el amortiguamiento es aquel asociado con la vibración libre. Si a una barra que uno de sus extremos está insertado en una pared, le ejercemos una fuerza en el otro de sus extremos y la liberamos, ésta empezará a oscilar regularmente, con el transcurrir del tiempo la amplitud de cada sucesión oscilatoria será menor que la

anterior, la relación de las amplitudes sucesivas es una medida de la cantidad de amortiguamiento⁸.

Como se puede apreciar en la Figura 2, en un sistema no amortiguado (a), la oscilación una vez iniciada continuará indefinidamente. Si la barra es sujeta al piso mediante un amortiguador viscoso (b) la respuesta desaparecerá con el tiempo, lentamente para un amortiguador ligero, y rápidamente para un amortiguador pesado.

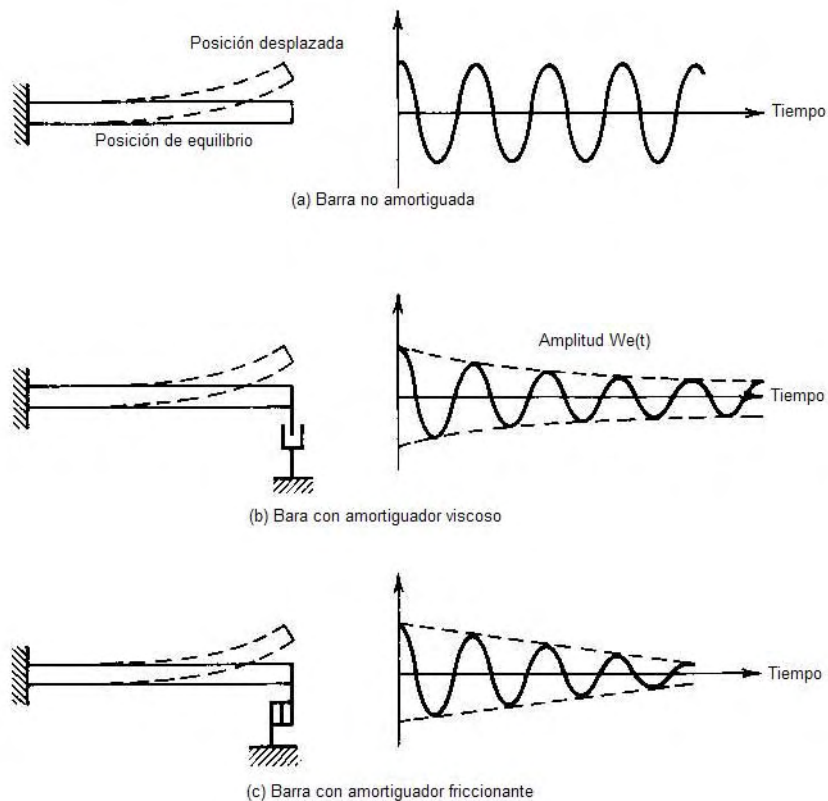


Figura 2. Sistemas amortiguados.

Teóricamente el movimiento tomara un tiempo infinito para terminar completamente, pero en la práctica los mecanismos de amortiguamiento harán que el sistema regrese a su forma original en un tiempo finito. En la figura también se aprecia un mecanismo (c) en el cual la fuerza amortiguadora es constante pero cambia cada mitad de ciclo, tal amortiguamiento siempre da al sistema una recuperación total en un tiempo finito⁸.

La medida del amortiguamiento (δ), conocida como el decremento logarítmico, está relacionada con la relación de la n-ésima hasta la n+N-ésima amplitud de ciclo mediante⁸:

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{W_n}{W_{n+N}}$$

Donde N es el número total de ciclos, W_n es la amplitud del n-ésimo ciclo y W_{n+N} es la amplitud del n+N-ésimo ciclo. Si el comportamiento de la onda decreciente es una curva exponencial de la forma $W_e(t) = e^{-\delta t}$, entonces esta definición de amortiguamiento define al amortiguamiento viscoso y al amortiguamiento viscoelástico, ambos amortiguamientos presentan curvas de este tipo.

2.4.1. Polímeros aptos para amortiguar vibraciones en equipo de protección personal.

Existe una gran cantidad de materiales poliméricos que sirven para amortiguar vibraciones, específicamente los elastómeros o materiales que tengan un comportamiento viscoelástico⁹.

2.4.1.1. Elastómeros.

Una de las clasificaciones de los polímeros es su comportamiento con respecto a la temperatura, esta los clasifica en termoplásticos, elastómeros y termorígidos, y la diferencia consiste en que los termoplásticos son polímeros que presentan temperatura de transición vítrea (T_g , por sus siglas en inglés Glass Transition Temperature) y también temperatura de fusión T_f por lo que se pueden moldear a partir de su forma original, mientras que los termorígidos, no poseen temperatura de fusión ni temperatura de transición vítrea, y cuando se calientan, se descomponen (se queman). Los elastómeros poseen temperatura de transición vítrea, pero no funden por lo que se encuentran en la transición entre los dos anteriores.

La temperatura de transición vítrea, T_g , es una característica muy importante de los polímeros. Si el polímero se encuentra a una temperatura mayor a la de su T_g

es un material blando y flexible, por el contrario a temperaturas por debajo de ésta se tienen materiales rígidos y quebradizos.

Midiendo la T_g se puede decir si un polímero es un elastómero o un termoplástico a temperatura ambiente (25°C), ya que los elastómeros tienen temperaturas de transición vítrea menores que la temperatura ambiente (muchas veces menor que 0°C) y los termoplásticos tienen temperaturas de transición vítrea mayores a la temperatura ambiente¹⁰.

El término *elástico* está implícito en la palabra *elastómero*. Los elastómeros difieren de los termorrígidos (o termoestables), en que son materiales que se deforman cuando se les aplica una fuerza de deformación (de alargamiento, compresión o torsión) y cuando se les deja de aplicar regresan a su forma original. Un típico ejemplo son las ligas.

2.4.1.2. Polímeros viscoelásticos.

Otra clasificación de los materiales poliméricos está relacionada con el comportamiento de éstos cuando se les aplica una fuerza deformante. Dependiendo de la respuesta que ofrezcan los polímeros a esta fuerza aplicada existen polímeros viscosos, polímeros elásticos y polímeros viscoelásticos (una combinación de los anteriores). La viscoelasticidad es el tipo de comportamiento que presentan ciertos materiales que exhiben tanto propiedades viscosas (por ejemplo, que se oponen a fluir cuando se les aplica una fuerza) como propiedades elásticas (por ejemplo, volver a su forma original después de aplicarle un esfuerzo) cuando se deforman.

El **amortiguamiento viscoelástico** es exhibido en muchos materiales poliméricos. Los materiales poliméricos orgánicos están hechos de largas cadenas moleculares. El amortiguamiento en estos materiales surge de la **relajación y recuperación** de la red polimérica después de que fue deformada⁸.

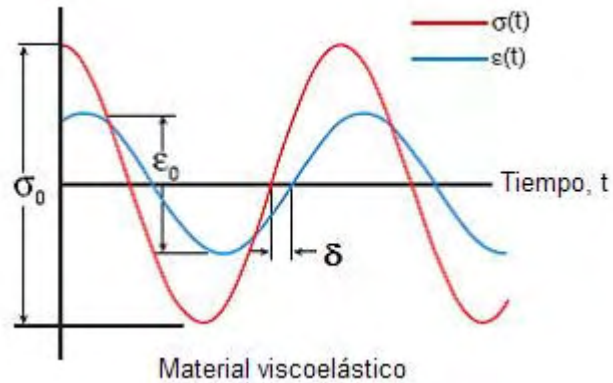


Figura 3. Comportamiento de un viscoelástico, σ es el esfuerzo, ε es la deformación y δ es el ángulo de desfase. Así la línea roja representa el comportamiento del esfuerzo en función del tiempo, la línea azul el comportamiento de la deformación con respecto al tiempo.

2.5. La viscoelasticidad.

Cuando los sólidos y los líquidos se someten al influjo de una fuerza que tiende a deformarlos, existen ciertas leyes que explican de forma sencilla su comportamiento frente a tal agresión. En el caso de los líquidos esa ley idealizada es la ley de Newton (1687), que relaciona el esfuerzo (o la fuerza realizada sobre el líquido) con la velocidad a la que se deforma el líquido bajo la acción del esfuerzo aplicado. La constante de proporcionalidad entre ambas magnitudes se define en términos de la viscosidad del líquido¹¹:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

Donde τ_{yx} es el esfuerzo cortante que se ejerce en la dirección x sobre la superficie de un fluido, situada a una distancia constante y ; v_x es el componente x del vector de velocidad del fluido, μ es la viscosidad. Es decir que la fuerza de cizalla por unidad de área (esfuerzo) es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local.

Un líquido newtoniano es el que cumple esa ley, tras la que se esconde el hecho comprobable de que el líquido, una vez que cesa el esfuerzo, no recupera, siquiera parcialmente, la forma en la que sus moléculas estaban ordenadas originalmente. Eso significa que una parte de la energía mecánica suministrada

durante el esfuerzo realizado se disipa en forma de calor, como consecuencia de los roces entre las moléculas de líquido¹¹.

Por el contrario, la ley ideal que explica el comportamiento de los sólidos bajo un esfuerzo se la debemos al científico inglés Robert Hooke, quien ya en 1676 establecía que la deformación es proporcional a la fuerza. La diferencia fundamental entre ambas definiciones estriba en el hecho de que el sólido hookeano tiene una memoria infinita, esto es, tras cesar el esfuerzo, vuelve siempre a su forma original, aunque el tiempo transcurrido entre la aplicación del esfuerzo y su cese se alargue considerablemente¹¹.

Existen sólidos que presentan un comportamiento cercano a los sólidos descritos por la ley de Hooke, así como líquidos cuyo comportamiento puede ser descrito mediante la ley de Newton. Sin embargo, una parte importante de los materiales que manejamos habitualmente se comportan de una manera intermedia entre los sólidos perfectamente elásticos y los líquidos perfectamente newtonianos. Tal es el caso de ciertos polímeros en estado sólido, los polímeros fundidos y sus disoluciones o dispersiones. Estos materiales suelen definirse como viscoelásticos, queriendo englobar en este término el hecho de que su comportamiento se sitúa entre los sólidos elásticos de Hooke y los líquidos viscosos de Newton¹¹.

Los materiales viscoelásticos son aquellos cuya relación entre tensión y elongamiento depende del tiempo. Los sólidos **anelásticos** representan un subconjunto de los materiales viscoelásticos, estos tienen una configuración de equilibrio única, es decir se recuperan totalmente después de remover una carga¹¹.

Algunos fenómenos en los materiales viscoelásticos son¹²:

1. Si la tensión es mantenida constante, el esfuerzo incrementa con el tiempo (creep).
2. Si el esfuerzo se mantiene constante, la tensión decrece con el tiempo (relajación).
3. La dureza efectiva depende de la velocidad de aplicación de la carga.
4. Si una carga cíclica es aplicada, ocurre histéresis (retraso de fase), dando una disipación de energía mecánica.

5. Presentan atenuación de ondas acústicas.

2.5.1. Viscoelasticidad de polímeros.

Los polímeros, tanto en su estado sólido como líquido, se desvían del comportamiento esperado en un sólido hookeano o en un líquido newtoniano. Cuando se trata de comprender el comportamiento de un sólido cristalino, comportamiento muy próximo a la ley de Hooke, se puede pensar en que la aplicación del esfuerzo genera un estiramiento de los enlaces existentes en la red cristalina, almacenándose allí la energía aplicada y facilitando la recuperación elástica una vez que el esfuerzo haya cesado. Todo lo contrario sucede en un esfuerzo sobre un líquido newtoniano, en la que toda la energía ligada al esfuerzo aplicado se disipa en forma de calor como consecuencia del roce entre las moléculas del líquido.

Los polímeros y otros materiales tienen, en muchos casos, un comportamiento que participa de los dos procesos arriba descritos. Y así, al considerar los polímeros fundidos, existen comportamientos que necesitan de una explicación en la que el fundido tiene una cierta componente elástica en su forma de funcionar¹¹.

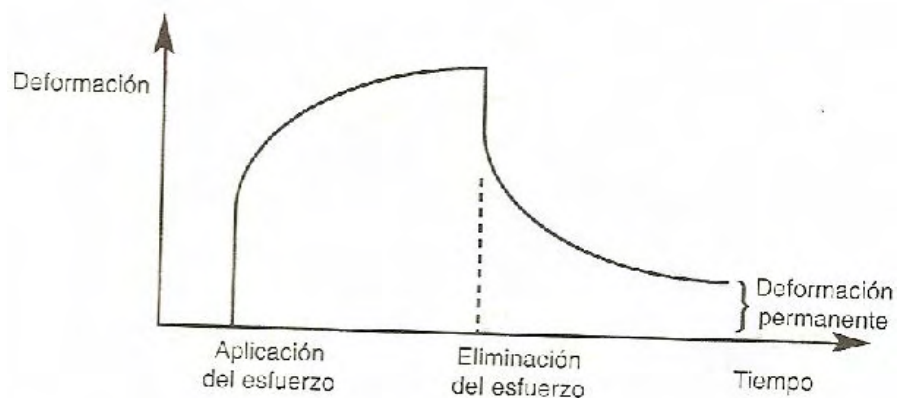


Figura 4. Comportamiento de un viscoelástico.

2.5.2. Métodos experimentales: evidencias de comportamiento viscoelástico.

Existe una gama de experimentos que ponen de manifiesto el comportamiento viscoelástico de los materiales y que han sido comercializados en algunos instrumentos como los analizadores dinámicos mecánicos (DMA Dynamic-Mechanic Analyzers). En tales experimentos se pueden medir diversas

magnitudes dinámicas, a diferentes temperaturas pero también, y esto es su característica principal, a diferentes frecuencias de deformación. **Esto quiere decir que en el equipo DMA se aplican esfuerzos de forma oscilatoria en el tiempo.** Supóngase que, como consecuencia de ese esfuerzo cíclico la deformación inducida en éste experimento varía senoidalmente en el tiempo¹²:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t)$$

Donde ε es la deformación, t es el tiempo, ω es la frecuencia angular, en radianes por segundo, que puede transformarse en una frecuencia en ciclos de deformación sufridos por el material por unidad de tiempo (Hz).

Si los experimentos dinámicos se realizan sobre un sólido elástico, la correspondiente ley de Hooke se escribiría¹²:

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 \text{sen}(\omega t)$$

La notación $\sigma(t)$ expresa que el esfuerzo aplicado varía con el tiempo. E es el módulo dinámico.

Si el material al que se aplica ese esfuerzo fuera un líquido puramente newtoniano, entonces esfuerzo (ε) y velocidad de deformación (η) estarían relacionados por la ley de Newton, a partir de la cual podría derivarse¹²:

$$\sigma(t) = \eta\varepsilon(t) = \eta \frac{d}{dt} [\varepsilon_0 \text{sen}(\omega t)] = \eta\varepsilon_0 \cos(\omega t)$$

Lo que implica que el esfuerzo resultante (σ) de esta expresión estaría desfasado de la deformación senoidal inducida en un ángulo de 90° . Como el comportamiento viscoelástico es una combinación de comportamientos puramente elásticos o viscosos, es evidente que en materiales como los polímeros se pueden esperar ángulos de desfase entre 0° (que correspondería a un almacenamiento de energía por un mecanismo elástico) y 90° (que correspondería a una disipación de la energía aplicada por un mecanismo viscoso). Se podría escribir¹²:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(\omega t + \delta)$$

Donde δ es el ángulo de desfase. Esa expresión puede también escribirse como¹²:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos \delta \text{sen}(\omega t) + \sigma_0 \text{sen} \delta \cos(\omega t)$$

Que expresa el esfuerzo en función de dos componentes: una en fase con la deformación y otra desfasada 90° . La relación entre esfuerzo y deformación se suele expresar habitualmente por medio de la expresión¹²:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 [E'(\omega) \text{sen}(\omega t) + E''(\omega) \text{cos}(\omega t)]$$

Definiendo el módulo de almacenamiento (o elástico) (E') y el módulo de pérdida (o viscoso) (E'') como¹²:

$$E'(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta$$

$$E''(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \text{sen} \delta$$

Ambos módulos se relacionan con la tangente del ángulo de desfase (factor de amortiguamiento)¹²:

$$\tan \delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}$$

Por tanto, en los experimentos de tipo dinámico, podemos extraer información directa sobre la importancia de las componentes elástica y viscosa de un comportamiento viscoelástico, mediante la obtención experimental de los módulos de almacenamiento (E') y el módulo de pérdida (E''). El comportamiento genérico que uno podría esperar para las tres magnitudes sería el que se muestra a continuación¹²:

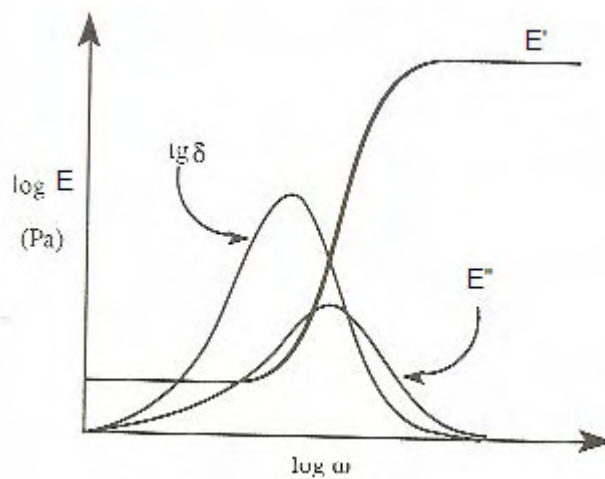


Figura 5. Magnitudes viscoelásticas de un material. E' representa el módulo de almacenamiento, E'' representa el módulo de pérdida, y $\text{tg } \delta$ es el factor de amortiguamiento.

2.5.3. Energía almacenada y disipada.

Al graficar la tensión contra la deformación, para ciertos materiales se obtiene una gráfica elíptica, esta gráfica encierra cierta área.

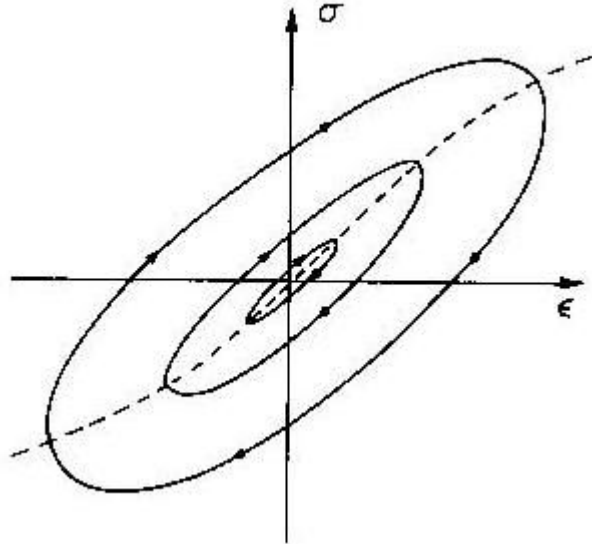


Figura 6. Curva de histéresis esfuerzo vs deformación.

El área dentro de la elipse representa una energía por volumen disipada en el material, por cada ciclo. Definiendo al esfuerzo y a la deformación como¹²:

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \quad \text{Y} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta)$$

El periodo $T = 1/v = (2v)/\omega$ corresponde a un ciclo entero. La energía almacenada en un ciclo entero es cero cuando el material regresa a su configuración inicial. Para encontrar la energía almacenada, se integra sobre un cuarto de ciclo, o en $t = \pi/(2\omega)$ ¹²:

$$\int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon = \int_0^{\pi/2\omega} \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt = \varepsilon_0 \sigma_0 \left[\frac{\cos \delta}{2} + \frac{\pi \sin \delta}{4} \right]$$

El primer término ($\cos \delta/2$) representa la energía almacenada, el segundo término ($\pi \sin \delta/4$ que desaparece para $\delta=0$) representa la energía disipada. Como ya se definió antes, el módulo de almacenamiento o elástico $E' = E \cos \delta$, la energía almacenada elásticamente en el material sería¹²:

$$W_s = \int_0^{\varepsilon_0} E' \varepsilon d\varepsilon = \frac{1}{2} E' \varepsilon_0^2$$

Esta energía almacenada (W_s) corresponde al área bajo la curva. La energía almacenada es calculada para un cuarto de ciclo¹².

La energía disipada (W_d) para un ciclo completo es proporcional al área dentro de la elipse, la energía disipada en un cuarto de ciclo se determina tomando un cuarto de la integral sobre un ciclo entero¹².

$$W_d = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi/\omega} \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt = \frac{\pi}{4} E'' \varepsilon_0^2$$

$$\frac{W_d}{W_s} = \frac{\pi}{2} \tan \delta$$

El significado físico de la tangente de delta es asociado con la relación entre energía disipada y energía almacenada en una carga dinámica, es llamada factor de amortiguamiento¹². Para determinar que material antivibración es mejor con respecto a otro se utiliza el factor de amortiguamiento, si éste presenta valores mayores de 1 es un buen material antivibración.

Para un material viscoelástico antivibración la curva de histéresis presenta un comportamiento como el de la figura 7.

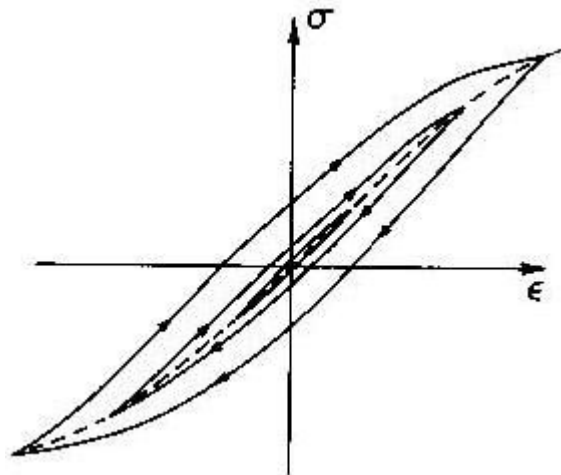


Figura 7. Curva de histéresis esfuerzo vs. deformación para un material viscoelástico antivibración.

2.6. Técnicas de caracterización.

2.6.1. Espectroscopía Infrarroja (IR).

La espectroscopía infrarroja es una técnica analítica basada en las vibraciones de los enlaces moleculares, que revela, los grupos funcionales predominantes en el polímero. Si bien esta técnica es una primera aproximación a la estructura química del polímero, es útil para dar una idea de la composición del polímero antivibración.

2.6.2. Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN).

Se empleará esta técnica para obtener información acerca del ambiente químico de un núcleo respectivo en el polímero. Los núcleos más útiles en compuestos orgánicos son el de hidrógeno (^1H -RMN), y el de carbono 13 (^{13}C -RMN). Con el análisis se podrán determinar que grupos funcionales abundan en el polímero.

2.6.3. Calorimetría diferencial de barrido.

Se conoce como DSC (por sus siglas en inglés Differential Scanning Calorimetry). En esta técnica se obtiene información acerca del comportamiento térmico del polímero. Con esta técnica se encuentran las diferentes temperaturas de transición del polímero, entre éstas las más representativas son la temperatura de transición vítrea, la temperatura de fusión y la temperatura de cristalización. Es posible que el material no contenga alguna de estas temperaturas de transición.

2.6.4. Análisis termogravimétrico.

Conocida como TGA (por sus siglas en inglés Termogravimetric Analysis). Este análisis es capaz de informar acerca de la estabilidad térmica, forma de descomposición, la existencia de aditivos en el polímero, etc. El análisis termogravimétrico señala la pérdida de masa de la sustancia con respecto a la temperatura. De esta manera es posible conocer el porcentaje en masa del polímero que se ha perdido a una cierta temperatura y relacionarlo con el mecanismo de descomposición de sus grupos funcionales.

2.6.5. Microscopía electrónica de barrido.

El SEM (por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscopy) es un poderoso microscopio que puede aumentar la imagen vista en un microscopio normal hasta 20 000 veces. Esta técnica sirve para observar la superficie del polímero, revela así si el material presenta anomalías o características sobresalientes en él, como por ejemplo porosidad.

2.6.7. Espectroscopía por dispersión de energía.

Esta técnica es conocida como EDS (por sus siglas en inglés Energy Dispersive Spectroscopy). Esta espectroscopía se realiza en el mismo momento de realizar el SEM y revela información acerca del porcentaje de elementos que se pueden encontrar en la muestra, es un análisis elemental puntual superficial.

2.6.8. Análisis dinámico-mecánico.

El equipo donde se lleva a cabo la prueba dinámico-mecánica se le conoce como DMA (por sus siglas en inglés Dynamic Mechanic Analyzer). En este equipo es posible realizar diversas pruebas, de las cuales se obtienen las magnitudes de tangente delta, módulo de almacenamiento y módulo de pérdida con las que se puede clasificar a un material como viscoelástico o como un apto amortiguador.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Material.

- Guanteleta antivibración comercial marca Gelfôm

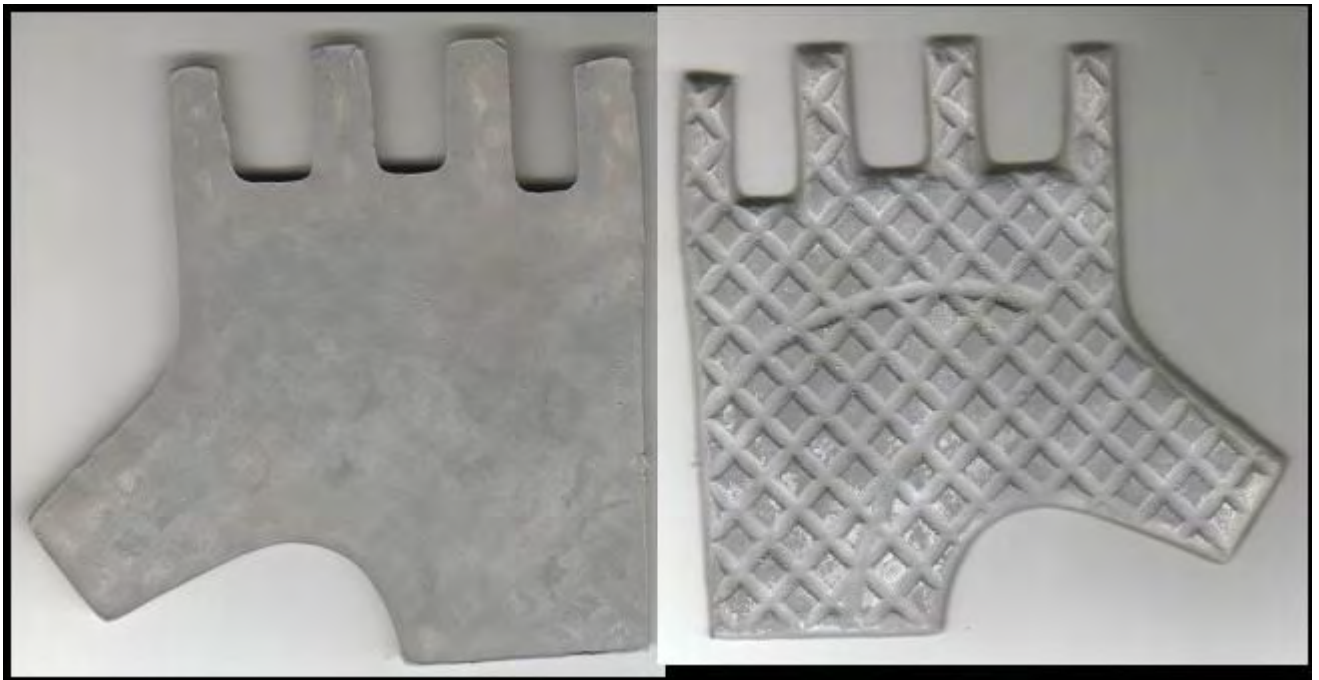
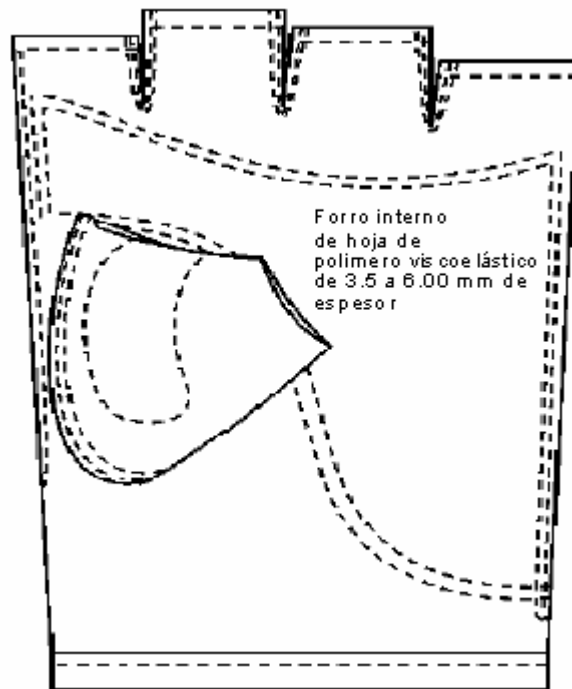


Figura 8. Guanteleta comercial Gelfôm

3.2. Equipo de caracterización.

- Analizador Termogravimétrico TGA 2950. TA Instruments.
- Analizador Dinámico Mecánico (DMA) Q800. TA Instruments.
- Espectrómetro RMN Bruker Advanced 400. Software XWIN-NMR. Sonda de geles.
- Vernier digital Mitutoyo, precisión 0.01mm, rango de medición 0-150mm.
- Picnómetro con termómetro Kimax. Capacidad 5 ml.
- Espectrofotómetro FT-IR marca Perkin Elmer modelo 1605. Software Spectrum 3.02. Accesorio ATR (Attenuated Total Reflection).
- Calorímetro diferencial de barrido DSC 2910. TA Instruments
- Microscopio electrónico de barrido. Marca Leica Cambridge. Modelo Stereoscan 440.
- Espectrómetro EDS. Marca Oxford. Modelo Pentafet.

3.3. Caracterizaciones.

El material polimérico antivibración que se encuentra dentro de la guanteleta fue extraído para su caracterización, se llevaron a cabo las siguientes pruebas.

3.3.1. Espesor.

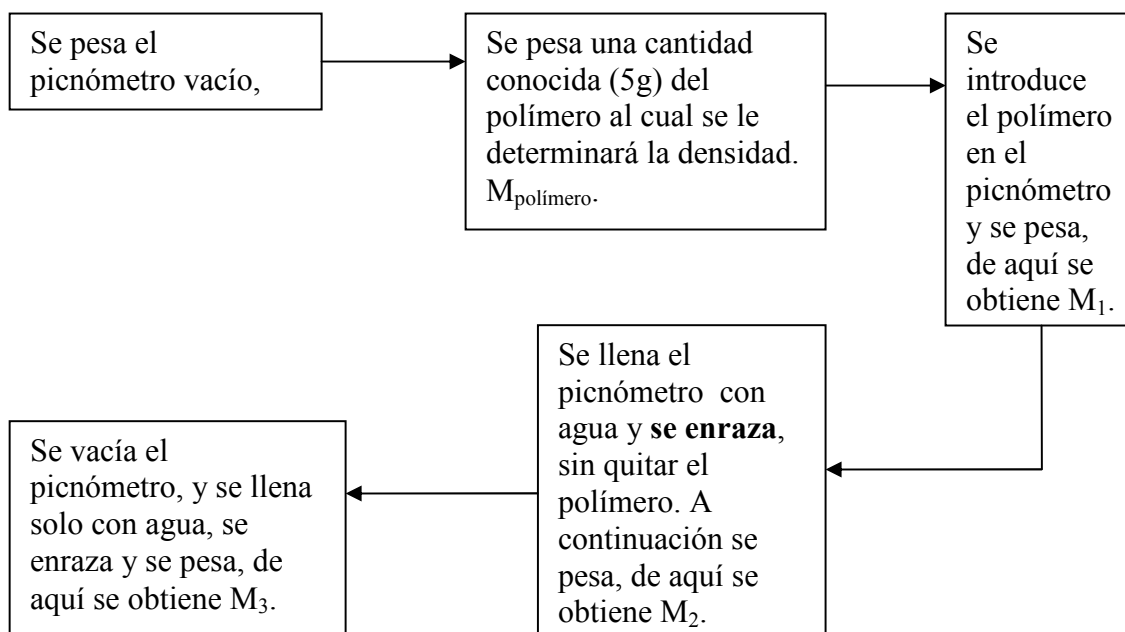
La medición del espesor se realizó con el vernier digital Mituyoto. Se realizó en todo la superficie del material.

3.3.2. Densidad.

Se midió la densidad por el método de enrazado de picnómetro, con un termómetro de mercurio, de dos bocas de 50 ml.

$$\rho_{polimero} = \frac{m_{polimero}}{v_{polimero}}$$

Procedimiento.



Descripción:

M1: Masa del picnómetro y el polímero juntos.

M2: Masa del picnómetro, agua y el polímero juntos.

M3: Masa del picnómetro con agua.

3.3.3. Espectroscopía Infrarroja (IR).

Para realizar el espectro infrarrojo se utilizó el accesorio ATR (Attenuated total reflection), este accesorio se usa para caracterizar la superficie de los materiales o para caracterizar materiales con espesor muy grande.

3.3.4. Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN).

Las muestras fueron tratadas con etanol para realizar la resonancia magnética nuclear en fase gel, como estándar para la prueba se usó cloroformo deuterado.

3.3.5. Calorimetría diferencial de barrido.

Se conoce como DSC (por sus siglas en inglés Differential Scanning Calorimetry). En esta técnica se obtuvo información acerca del comportamiento térmico del polímero. Se tomaron 10 mg del polímero para el análisis, la prueba se realizó con

una velocidad de barrido de 10°C por minuto, en una atmósfera inerte de nitrógeno, de -100°C a 100°C.

3.3.6. Análisis termogravimétrico.

Se tomaron 47 mg del polímero para el análisis, la prueba se realizó de 0°C a 1000°C, con una velocidad de calentamiento de 10°C por minuto, en atmósfera de nitrógeno.

3.3.7. Microscopía electrónica de barrido.

A las muestras se les dio un tratamiento de recubrimiento con oro para poder observarlas en el microscopio. Se analizaron las superficies externa e interna del polímero.

3.3.8. Espectroscopía por dispersión de energía.


Las muestras se preparan de la misma forma que en el experimento anterior, debido a que esta técnica se realiza, para distintos puntos de la muestra, simultáneamente a la de microscopía electrónica de barrido.

3.3.9. Análisis dinámico-mecánico.


Se obtuvieron las propiedades viscoelásticas del polímero, módulo de almacenamiento (E'), módulo de pérdida (E'') y coeficiente de amortiguamiento ($\tan \delta$) a diferentes frecuencias y temperaturas como se muestra en las tablas. También se realizó una familia de curvas de histéresis para verificar el comportamiento viscoelástico del polímero, a diferentes elongamientos, con una fuerza máxima de 1 Newton y esfuerzo máximo de 0.65 MPa.

En las siguientes tres tablas se muestran las condiciones específicas de las pruebas:

Prueba A. Determinación de las propiedades viscoelásticas del material desde 0.1Hz a 1 Hz, variando la temperatura.

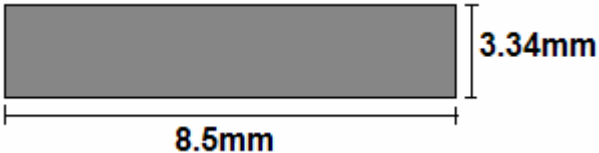
Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Dimensiones del material (Espesor 4.4mm)
-70°C a 30°C	0.1	
	0.4	
	0.7	
	1	

Prueba B. Determinación de las propiedades viscoelásticas del material a 60 Hz y 120 Hz, variando la temperatura.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Dimensiones del material (Espesor 4.4mm)
-70°C a 30°C	60	
	120	

Esta prueba (B) emula las condiciones de trabajo de algunas herramientas oscilatorias a una frecuencia media (60Hz) y a una frecuencia alta (120Hz)

Prueba C. Obtención de curvas de histéresis del material forzándolo a alcanzar diferentes elongamientos establecidos arbitrariamente.

Esfuerzo máximo (MPa)	Elongamiento (%)	Dimensiones del material (Espesor 4.4mm)
0.65	19.5	
	40	
	59.5	
	70.5	
	79.5	
	89	
	101	

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Espesor.

El espesor del polímero en toda su extensión es de 4.4mm

4.2. Densidad.

La temperatura ambiental a la que se realizó la medición fue 17.9°C.

Se realizó el procedimiento indicado en la sección de experimentación, obteniendo los siguientes datos:

$$M_{\text{picnómetro}} = 50.369\text{g}$$

$$M_1 = 55.386\text{g}$$

$$M_2 = 100.396\text{g}$$

$$M_3 = 100.508\text{g}$$

De M_3 obtenemos la densidad del agua a esta temperatura (17.9°C), si se conoce el volumen en el picnómetro (50ml) la masa del agua es: $M_3 - M_{\text{picnómetro}} = 50.139\text{g}$

$$\rho = m / v = \frac{M_{\text{agua}}}{v} = \frac{50.139 \text{ g}}{50 \text{ mL}} = 1.002 \text{ g / mL}$$

Este valor corresponde a la densidad del agua a temperatura ambiente.

La masa del polímero ($M_{\text{polímero}}$) se obtiene de la resta de $M_{\text{picnómetro}}$ menos M_1 :

$$M_{\text{picnómetro}} - M_1 = 5.017\text{g}$$

Se obtiene también la masa del agua M_2 : $M_{\text{picnómetro}} - M_2 - 5.017\text{g} = 45.01\text{g}$, con la masa del agua, y con su densidad calculada previamente, podemos saber el volumen que ocupa el agua en M_2 .

$$\rho = m / v \rightarrow v = m / \rho = \frac{M_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{45.01 \text{ g}}{1.002 \text{ g / mL}} = 44.88 \text{ mL}$$

El volumen que ocupa el polímero por tanto es la diferencia entre el volumen del picnómetro menos el volumen que ocupa el agua: $50\text{ml} - 44.88\text{ml} = 5.114\text{ml}$

Y su densidad es:

$$\rho = m / v = \frac{M_{\text{agua}}}{v} = \frac{5.017 \text{ g}}{5.114 \text{ mL}} = 0.98 \text{ g / mL} \quad \text{Densidad} = 0.98\text{g/mL.}$$

4.3. Espectroscopía Infrarroja (IR).

Se pueden distinguir las absorbancias a las longitudes de onda de los siguientes enlaces:

Tabla 2. Grupos funcionales asignados en el infrarrojo.

Tipo de grupo funcional	Intervalo esperado (cm^{-1})	Posición de la banda (cm^{-1})
C-O	1050-1150	1093
C-N	1030-1230	1223
C=O	1670-1780	1726
CH_2	2850-2960	2847-2968
N-H	3300-3500	3297

En el espectro se observan las transmitancias de los grupos funcionales presentes en el polímero. A 1093cm^{-1} se encuentra el grupo funcional C-O se puede suponer que el enlace C-O observado corresponde a un grupo éter, ya que no aparecen las absorbancias correspondientes al grupo alcohol ($3400\text{-}3650\text{cm}^{-1}$). La única señal arriba de los 3000cm^{-1} es la señal, que por su intensidad y aspecto correspondería a un grupo amina N-H. A 1223cm^{-1} aparece una señal que puede asignarse al enlace C-N (que apoya lo anterior), por consiguiente se puede deducir que se tiene el grupo C-N-H. Al tener señales de C-O y N-H, puede proponerse que el polímero presenta el grupo funcional uretano. El grupo uretano se caracteriza también por contar con un grupo carbonilo, C=O, este grupo funcional se identifica en el espectro a 1726cm^{-1} .

Así mismo el grupo funcional C- CH_3 observado a 2847cm^{-1} indica la presencia de cadenas alifáticas en el polímero.

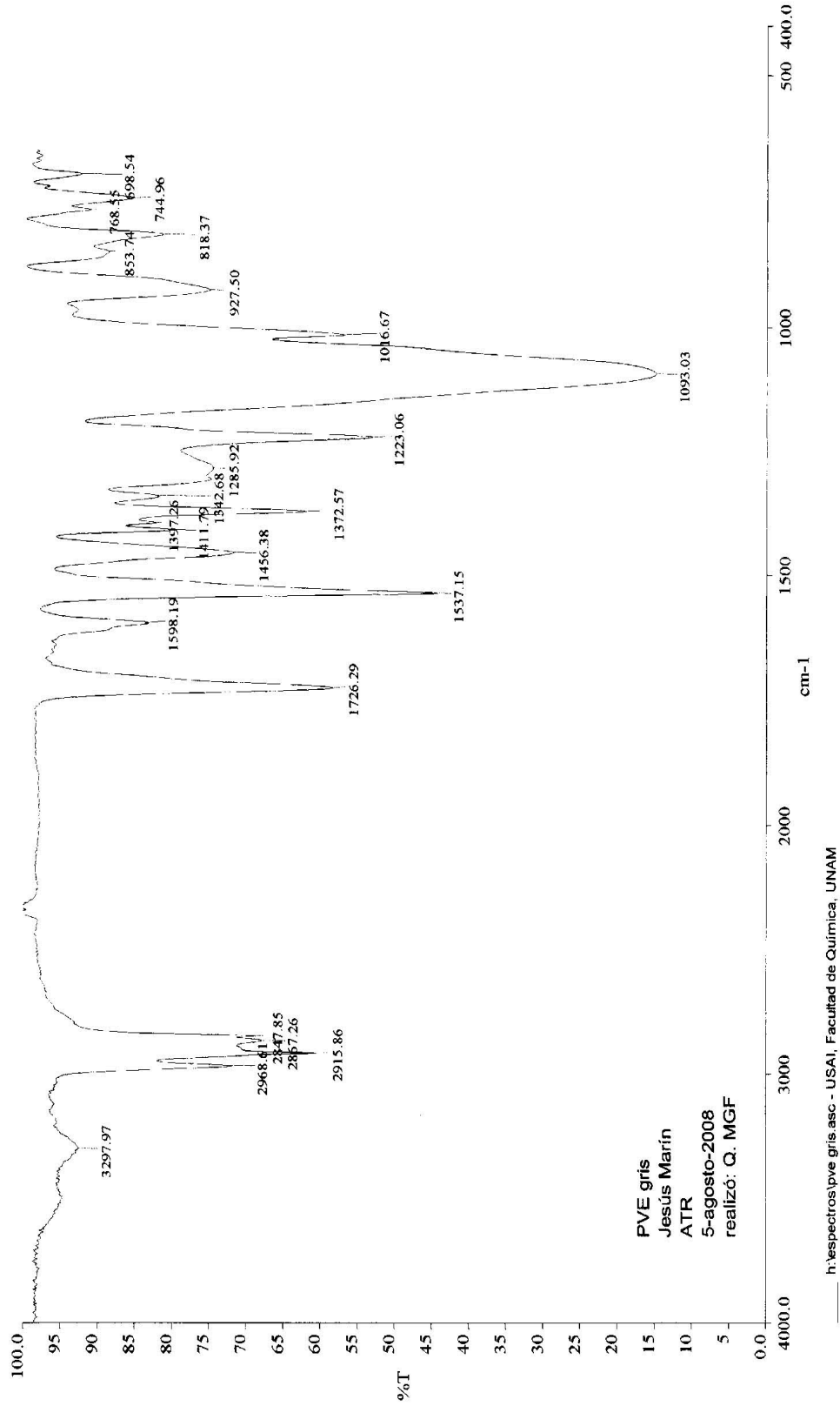


Figura 9. Espectro Infrarrojo

4.4. Espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN).

En la ^{13}C -RMN se observa un conjunto de señales a 19 y 30ppm correspondientes a los grupos $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2-$, que corroboran las cadenas alifáticas que se observaron en el espectro IR. El enlace C-O, asociado a las señales en la región de 76ppm, indica la presencia del grupo éter en el polímero. En 73ppm las señales pueden asignarse al enlace C-N, que informa sobre la existencia de un grupo amida o amina en el polímero.

Por otra parte a 128.31 ppm existe un desplazamiento químico correspondiente a un grupo aromático, dando a pensar que el polímero estaría formado por cadenas alifáticas y grupos aromáticos. La última frecuencia observada corresponde a un grupo carbonilo C=O, este enlace al igual que el enlace C-N, es característico del grupo funcional uretano y se podría deducir que el polímero es un poliuretano.

Grupo uretano:

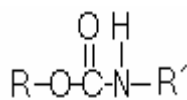


Tabla 3. Grupos funcionales asignados en la espectroscopía de resonancia magnética nuclear ^{13}C .

Tipo de grupo funcional	Intervalo esperado (ppm)	Desplazamiento químico (ppm)
$-\text{CH}_3$	10-25	19
$-\text{CH}_2-$	25-45	30.42
C-N	42-78	73.28
C-O	50-85	76.52
Aromático	110-140	128.31
C=O	160-220	167.53

Resonancia magnética nuclear ^{13}C de Polímero Gelfóm-ETOH en CDCl_3
 Bruker Advance 400
 IIM-UNAM

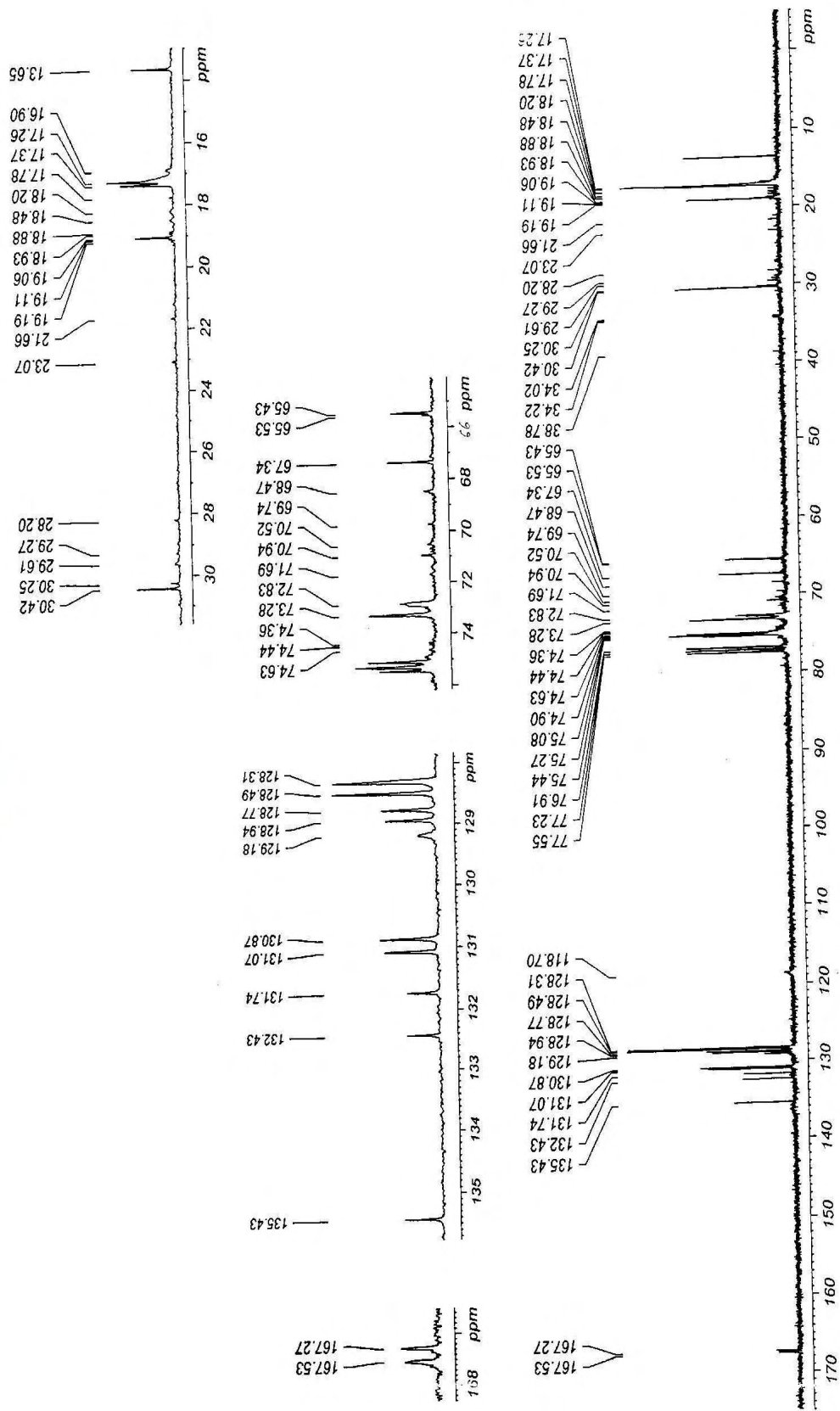


Figura 10. Espectroscopia de resonancia magnética nuclear ^{13}C .

En la resonancia de ^1H -RMN, se confirma lo observado en los espectros de ^{13}C -RMN y en el infrarrojo, la existencia de cadenas alifáticas (1 ppm) y grupos éter (3.5 ppm) en el polímero. Aparecen también señales atribuibles a los enlaces N-C-H y /o al RCOO-C-H en 3.3, y al grupo O=C-NH₂ alrededor de 7. Este último podría indicar protones aromáticos, pero no están presentes en el espectro de infrarrojo. Esta técnica también apoya la estructura de un poliuretano.

Esta resonancia además posee la característica particular de que es cuantitativa con respecto a cuántos hidrógenos producen cada señal. De esta manera la integración de las señales revela que hay una gran abundancia de cadenas alifáticas. Lo que indica que el polímero puede ser un poliuretano este fue sintetizado a partir de un poliol con cadenas alifáticas largas.

Tabla 4. Grupos funcionales asignados en la espectroscopia de resonancia magnética nuclear ^1H

Tipo de grupo funcional	Intervalo esperado (ppm)	Desplazamiento químico (ppm)
C-C-H	0-1.5	~1.2 (39.1 H)
RO-C-H	3.3-4.5	3.5 (26.3)
N-C-H	2.5-4.5	~3.36 (26.3)
RCOO-C-H	3.7-4.1	4.12 (1.8)
Aromático, O=C-NH ₂	6.5-8 5-8	~7.35 (9.2)

Resonancia magnética nuclear 1H de Polímero Gelfóm-ETOH en CDCl3
 Bruker Advance 400
 IIM-UNAM

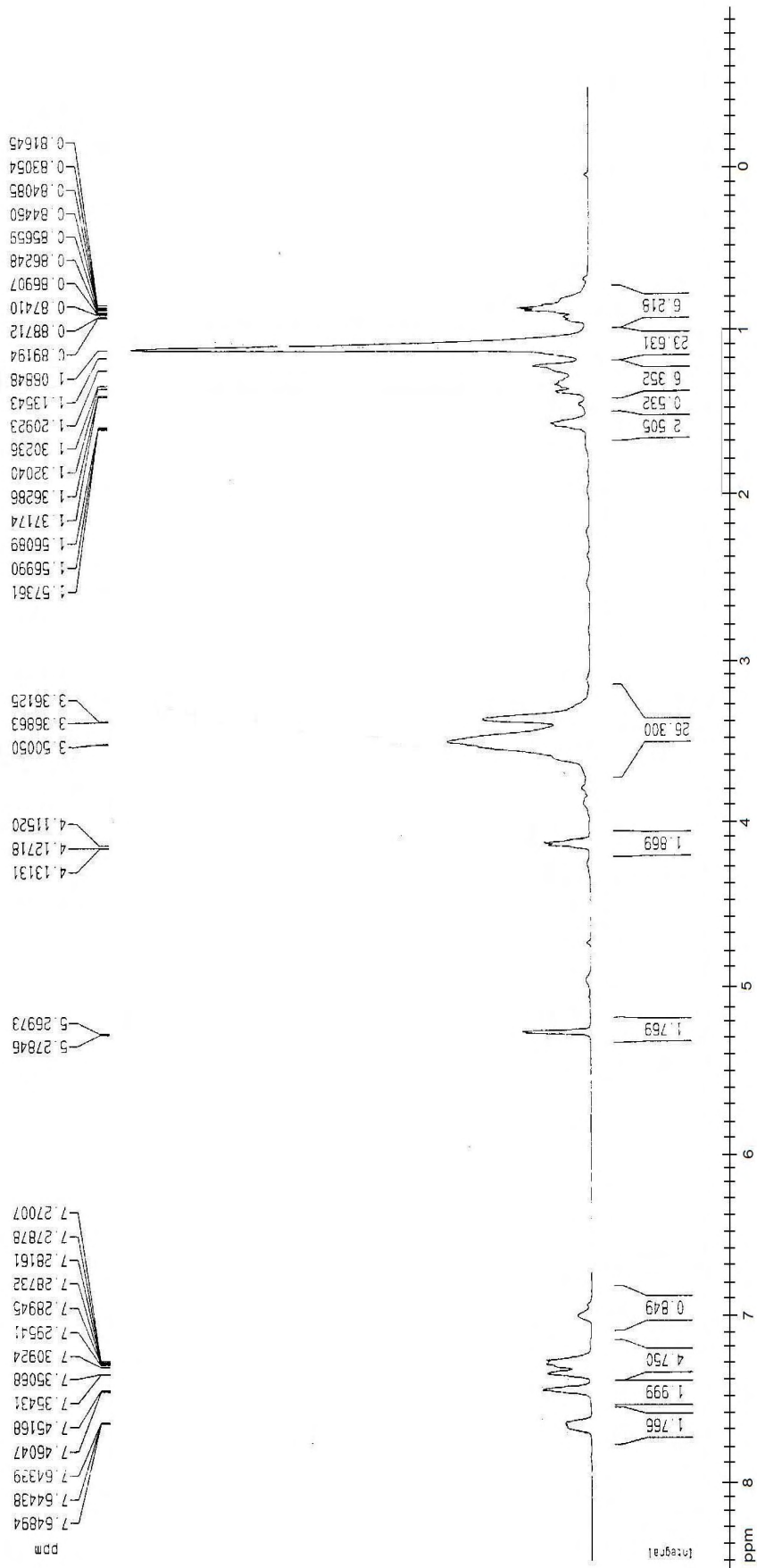


Figura 11. Espectroscopia de resonancia magnética nuclear 1H.

4.5. Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

En el termograma de DSC se observa una transición a -53.61°C . Este valor, que se encuentra por debajo de la temperatura ambiente, corresponde a la temperatura de transición vítrea. Como el material es blando y su T_g es muy baja, se puede confirmar el comportamiento elastomérico del material.

No se aprecian otras temperaturas de transición, por ejemplo la temperatura de fusión. Lo que confirma que se tiene un polímero elastomérico.

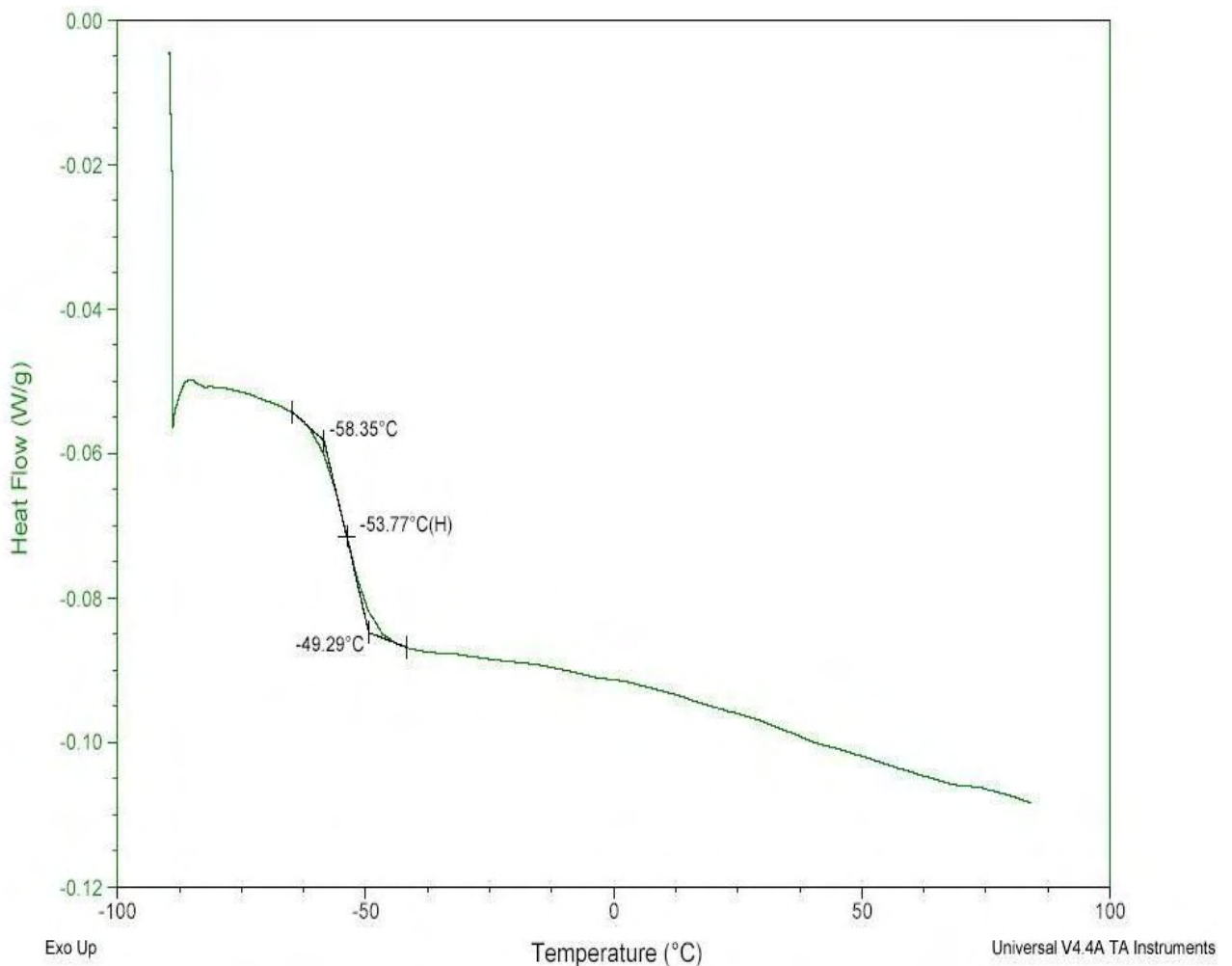


Figura 12. Termograma. Calorimetria diferencial de barrido

4.6. Análisis termogravimétrico (TGA).

En el termograma del TGA se observa como la curva de porcentaje en masa varia con la temperatura. Del inicio hasta 243 °C se comienza a observar un descenso casi lineal de la curva, indicando que a esta temperatura el material elimina volátiles de baja concentración y empieza su descomposición.

A 251.59°C el polímero a perdido un 5% de su peso total y posteriormente a alrededor de 390 °C, el 10%. Éstas pérdidas pueden representar la humedad o de aditivos en el polímero (algún plastificante).

El polímero experimenta una degradación abrupta total de 300 a 390°C, quedando alrededor de un 5% de residuos inorgánicos.

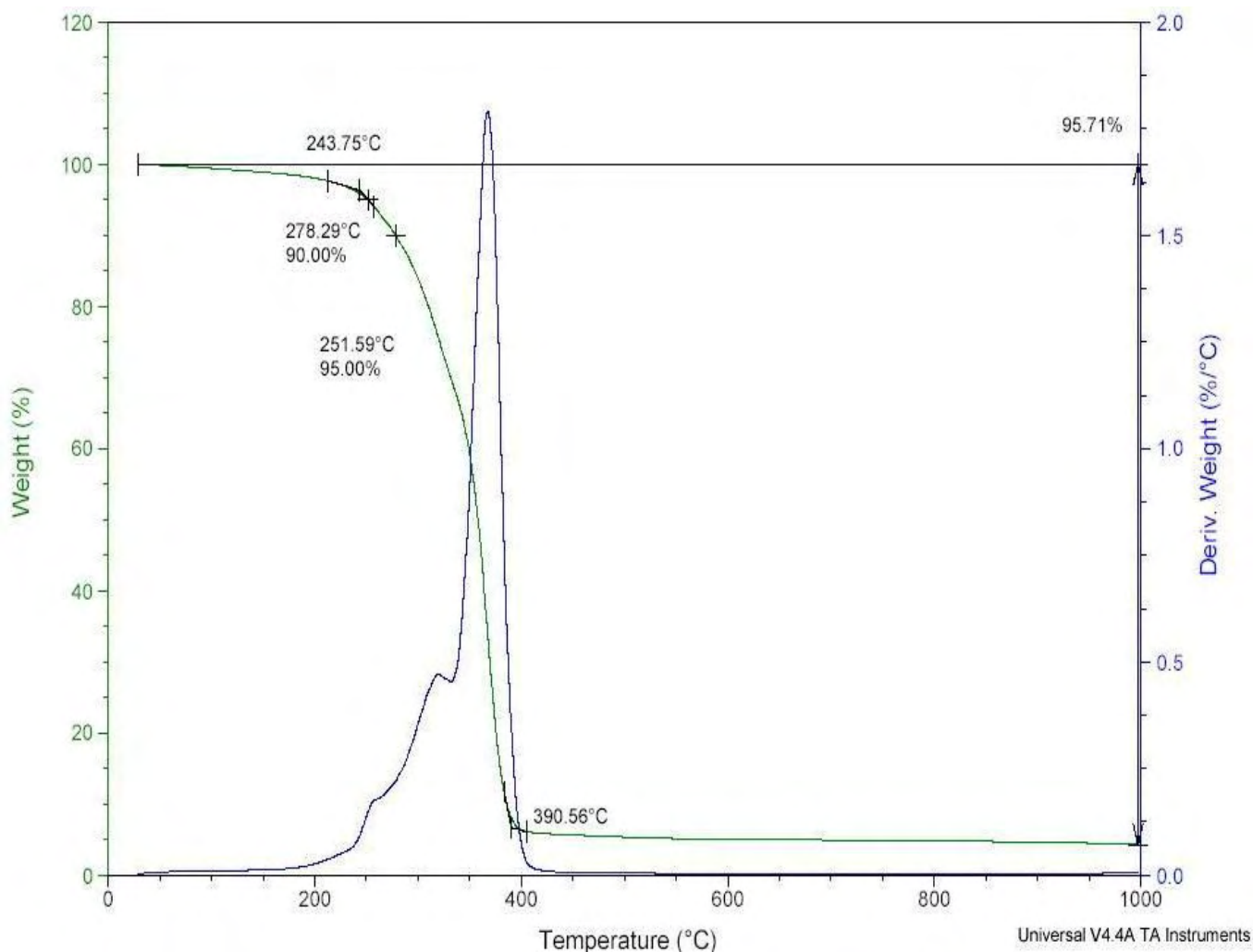


Figura 13. Termograma. Análisis termogravimétrico

4.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM).

A continuación se muestran las imágenes obtenidas en el SEM, las primeras 2 son de la superficie externa y las dos restantes son del interior del polímero.

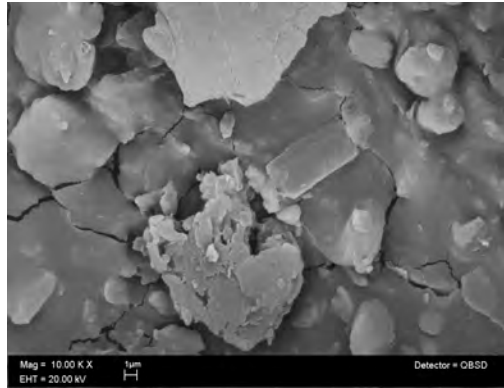


Figura 14. Superficie 10000 aumentos

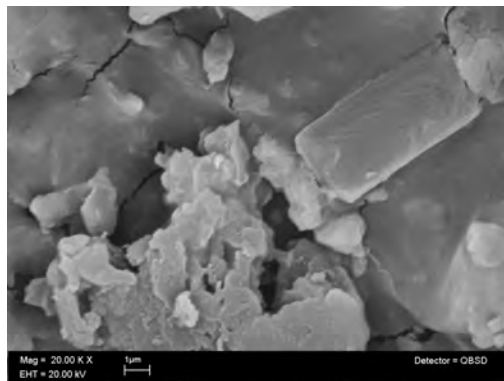


Figura 15. Superficie 20000 aumentos

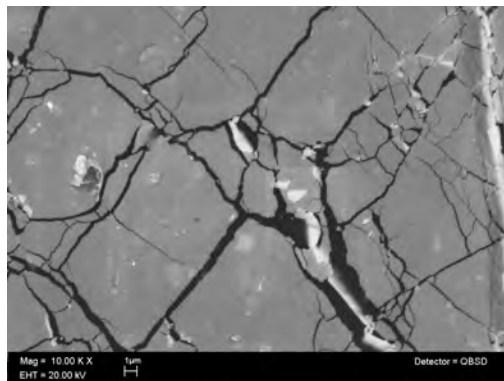


Figura 16. Interior 10000 aumentos

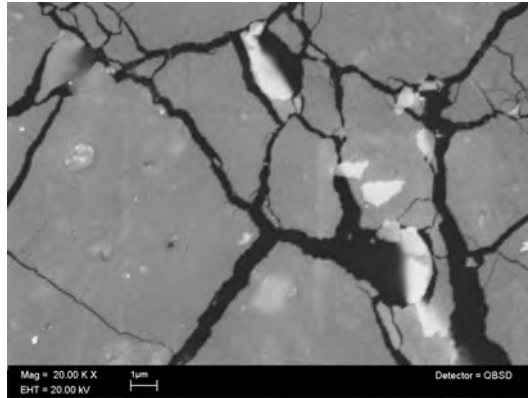


Figura 17. Interior 20000 aumentos

Las imágenes no muestran porosidad. La superficie no es lisa, presenta aglomerados de polímero en unas zonas. Las imágenes del interior muestran un agrietamiento quizás debido a que se cortó el polímero para analizar el interior. Tampoco resalta alguna característica del material como porosidad o aglomerado de partículas.

4.8. Espectroscopía por dispersión de energía (EDS).

Se muestran los espectros obtenidos por EDS en el SEM en la Figura 18. Se encontraron elementos como calcio, titanio, cloro y aluminio, que son característicos de cargas usadas como aditivos. Se puede afirmar que se encuentran en porcentajes menores de 5%. El pico de oro aparece debido al recubrimiento que se hizo para poder observarlo en el SEM.

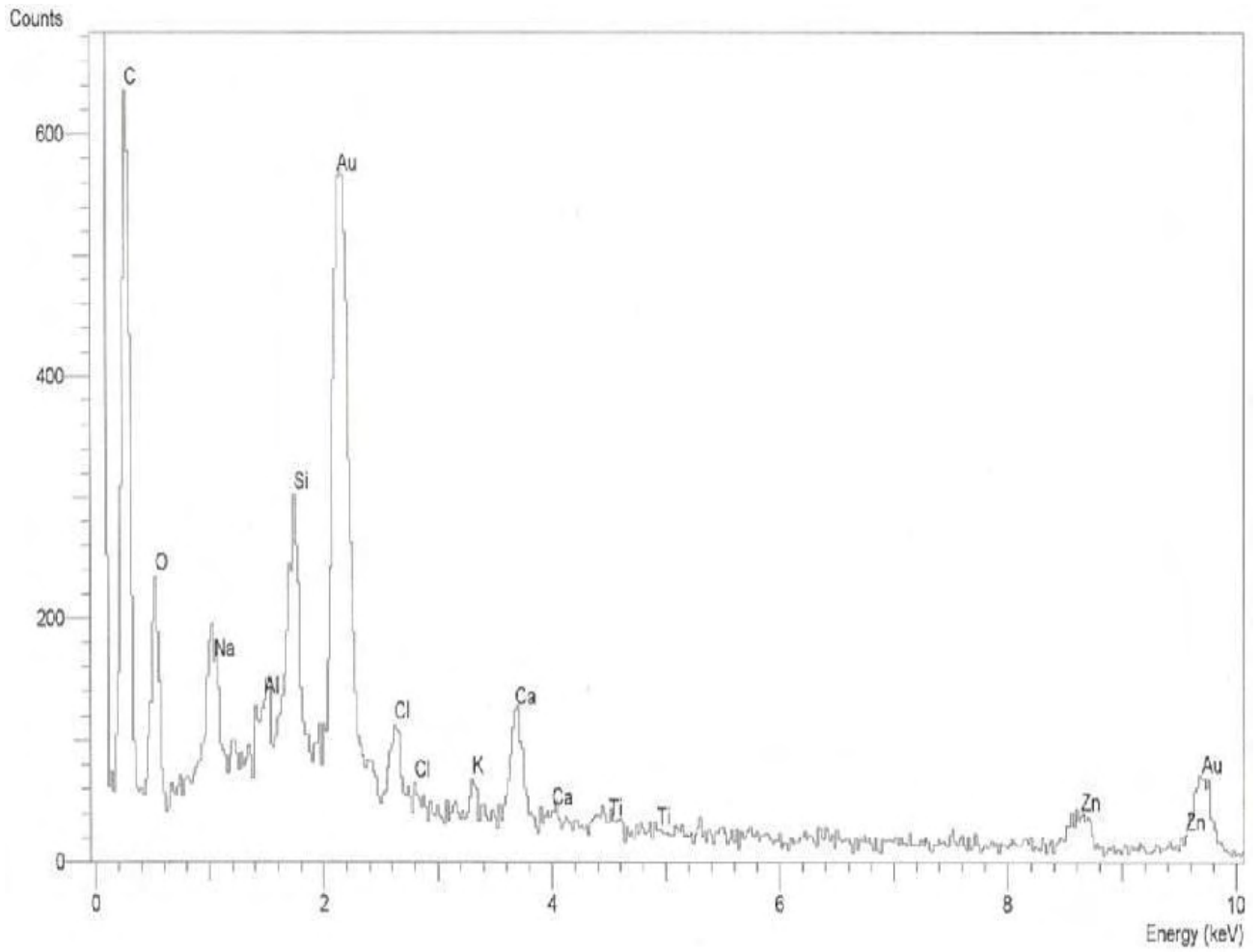


Figura 18. Espectroscopía por dispersión de energía en la superficie.

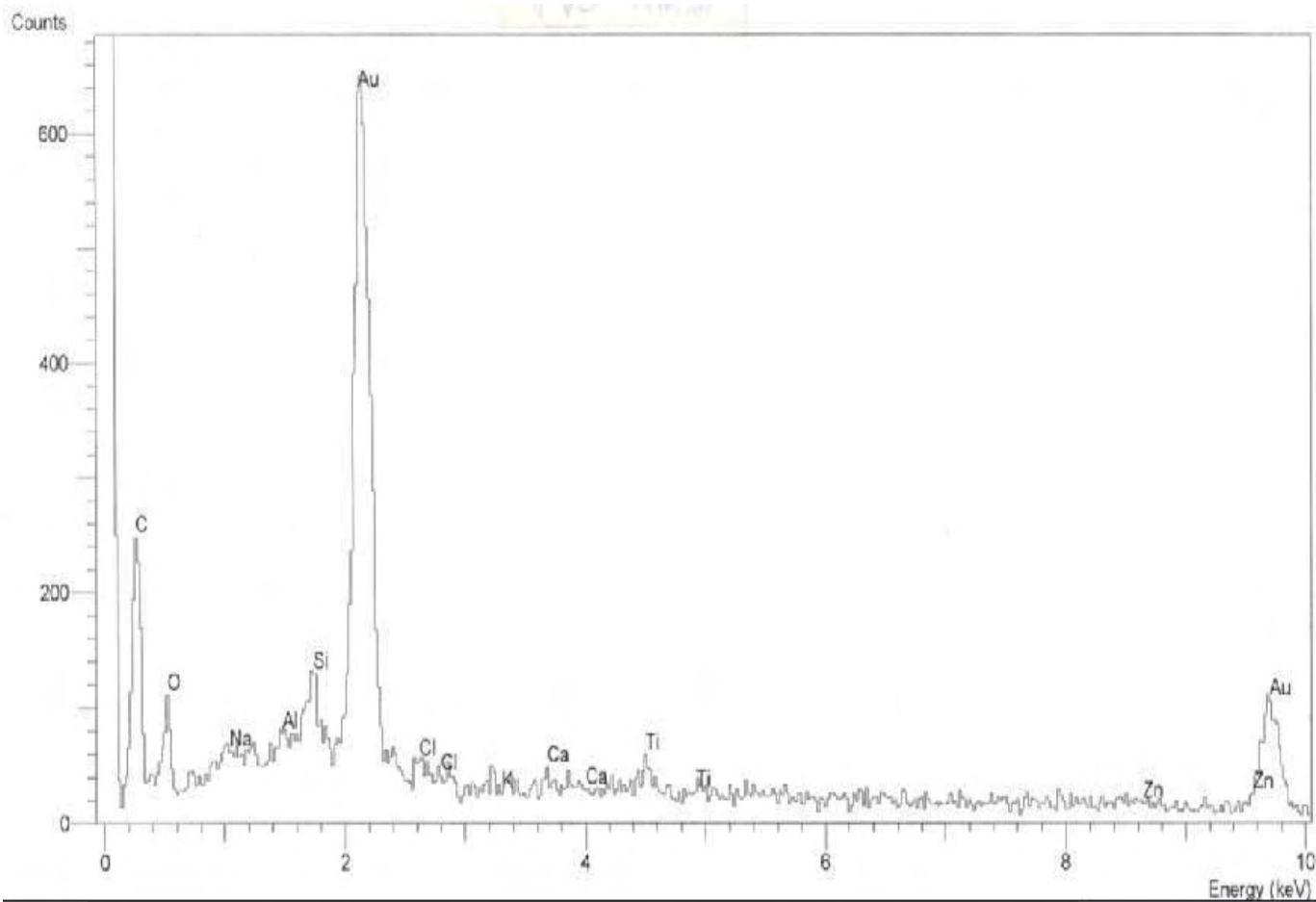


Figura 19. Espectroscopía por dispersión de energía en el interior

4.9. Análisis dinámico-mecánico (DMA).

En la figura 20 se muestra el análisis dinámico mecánico para determinar las magnitudes viscoelásticas del material con respecto a la temperatura, variando la frecuencia desde 0.1 hasta 1 Hz. A temperatura ambiente (En eje x alrededor de 20°C) se observa que el coeficiente de amortiguamiento (Tan Delta) es menor a uno (<1) para este barrido de frecuencia (0.1Hz a 1Hz). Esto indica que, a temperatura ambiente y a esta frecuencia el material no es buen amortiguador de vibraciones. Sin embargo a -40° y a un Hz sería un buen amortiguador, debido a que su valor de Tan DELTA es mayor a uno (>1).

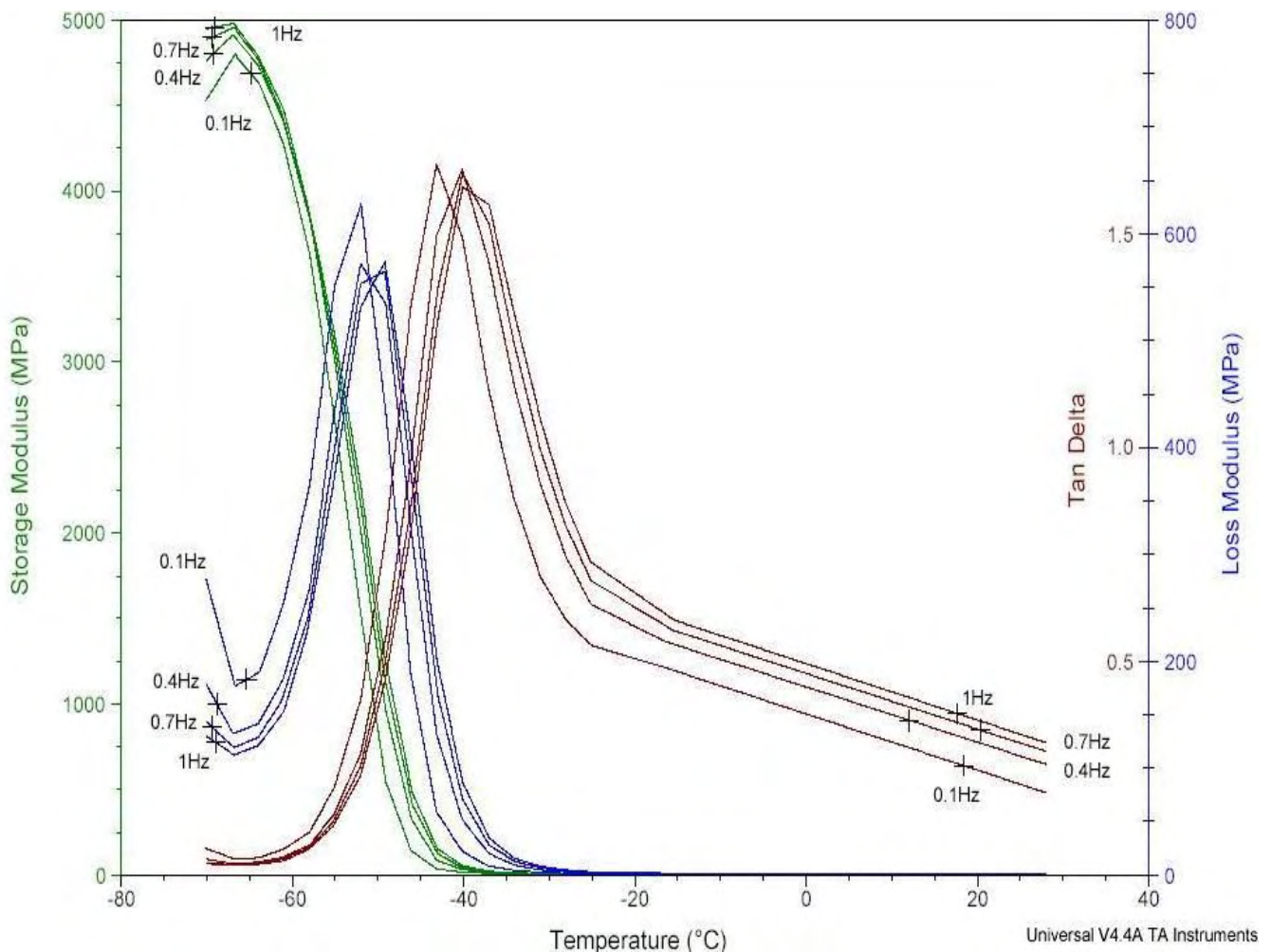


Figura 20. Propiedades viscoelásticas en función de La temperatura hasta 1Hz.

La figura 21 muestra el comportamiento del coeficiente de amortiguamiento con respecto a la temperatura a dos frecuencias distintas: una frecuencia baja (60 Hz) y una frecuencia alta (120 Hz). Se obtienen valores altos de coeficiente de amortiguamiento para una frecuencia alta y bajos para una frecuencia baja. Por ejemplo en la gráfica se señala que a temperatura ambiente (aprox. 25°C) el coeficiente de amortiguamiento (Tan Delta) es de 12.48 para 120 Hz, mientras que para 60 Hz tan sólo es de 0.3929.

Lo cual indica que el guante esta diseñado para trabajar con herramientas que operen a altas frecuencias y no es apto para usarse a bajas frecuencias.

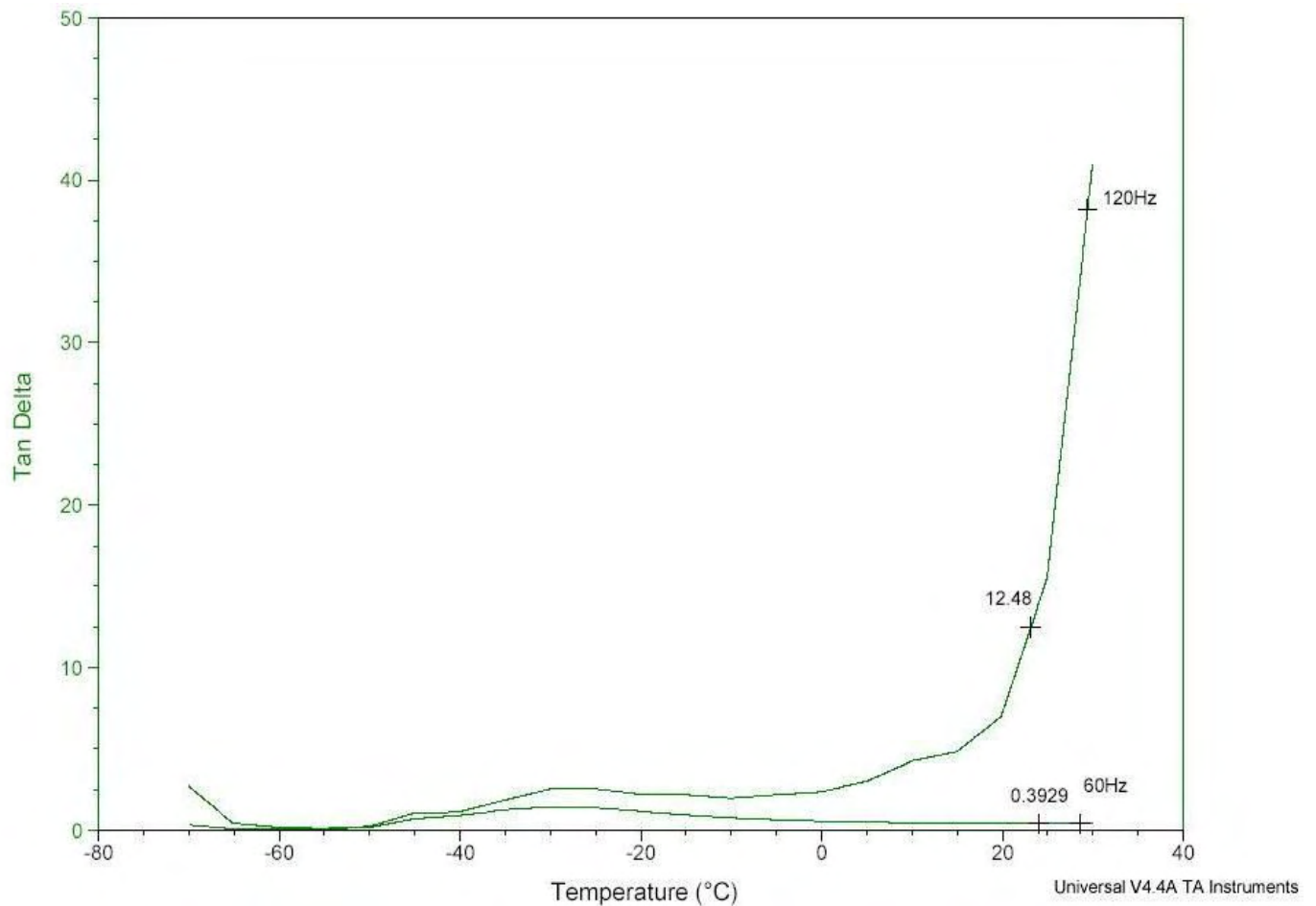


Figura 21. Coeficiente de amortiguamiento en función de la temperatura a 60 Hz y 120 Hz.

Con el objetivo de conocer la energía disipada a distintos elongamientos se realizaron las curvas de histéresis, mostradas en la Figura 22. Se observan a distintos elongamientos (variados desde 19% a 100%). También se indica el tiempo en el que se alcanzaron estos elongamientos. Se tienen siete curvas, cada una de ellas señalada con números rojos. Esta gráfica de las curvas de histéresis obtenidas presenta en el eje de las ordenadas la tensión en megapascales (MPa) y el elongamiento en porcentaje de estiramiento (%) en las abscisas.

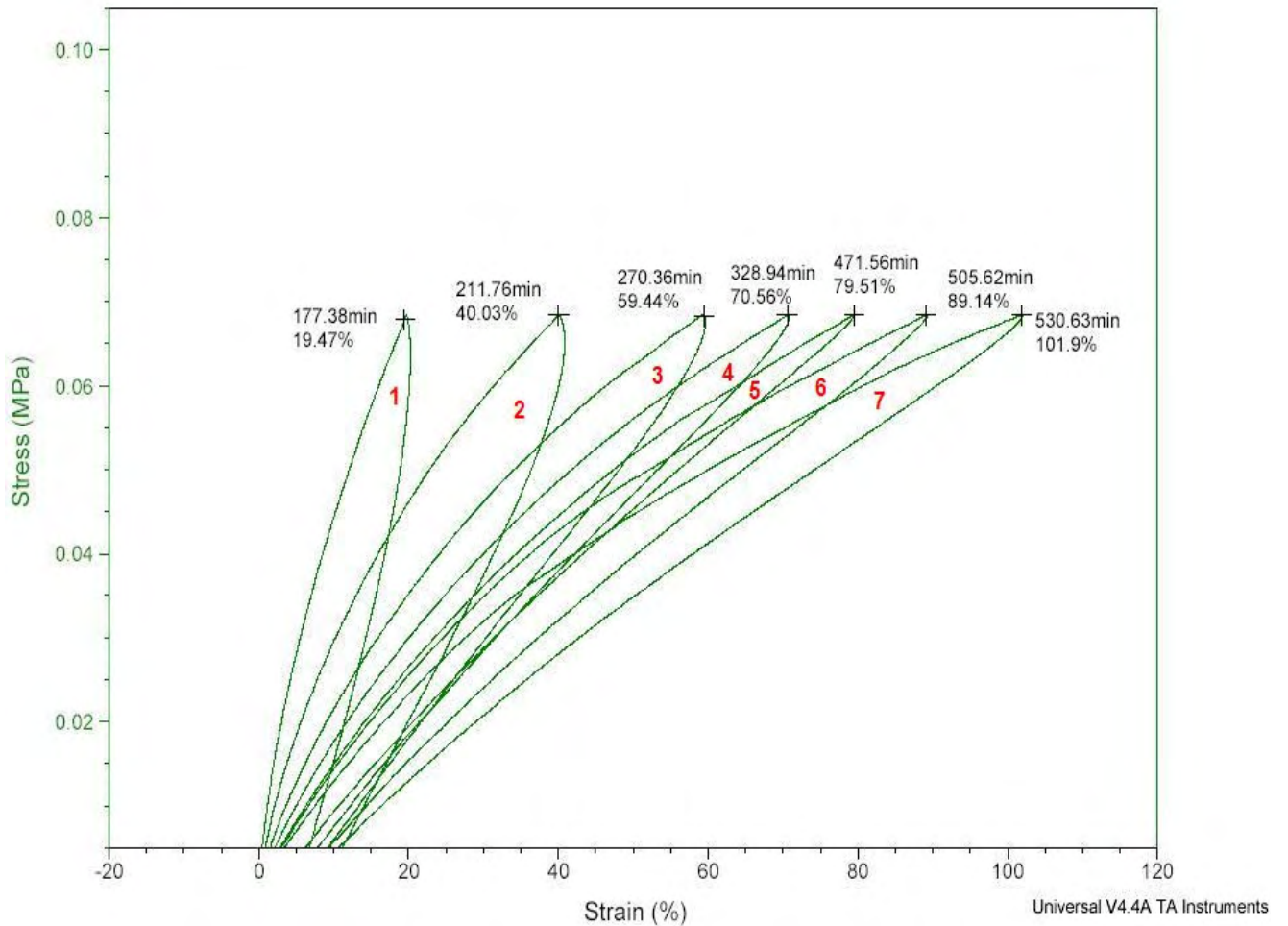


Figura 22. Curvas de histéresis.

Para poder hacer un análisis de la energía disipada (obtenida calculando el área dentro de cada curva de histéresis) se necesita ser consistente en cuanto a las unidades de energía, por tanto las curvas de la Figura 22 se grafican en la Figura 23 en el eje de las abscisas en micrómetros y en el eje de las ordenadas en Newtons, recordando que la unidad de energía es el Joule (J), definido a su vez como Newton por metro (N·m). El análisis nos da la posibilidad de graficar la dependencia del desplazamiento establecido en micrómetros (μm) con respecto a la fuerza que se aplicó, en Newtons (N).

Para hacer un análisis más preciso de las curvas de histéresis, en la Figura 23 se muestran las primeras cuatro y las tres restantes en la Figura 24.

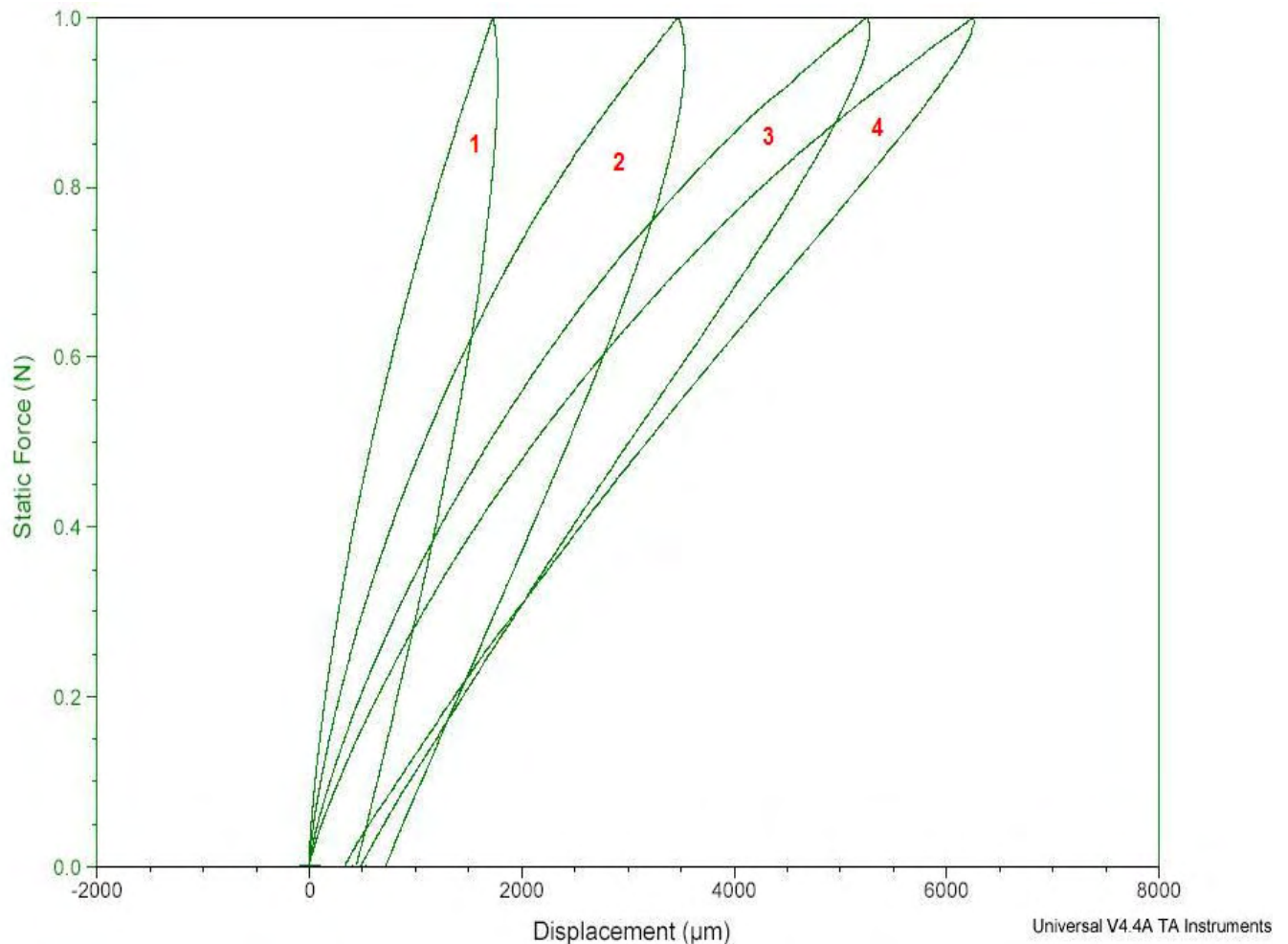


Figura 23. Curvas de histéresis 1, 2, 3 y 4.

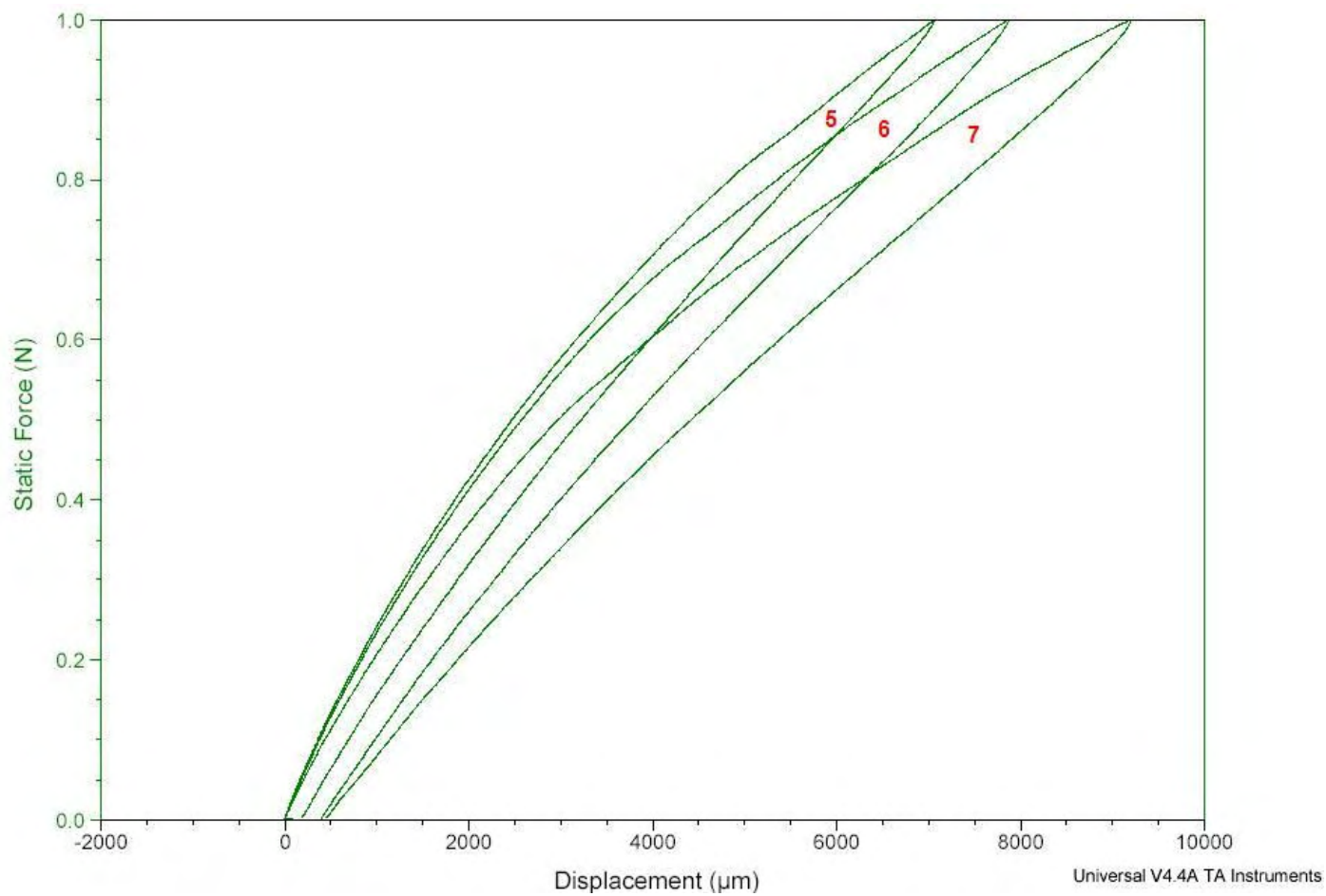


Figura 24. Curvas de histéresis 5, 6 y 7.

Si se calcula el área dentro de la curva esta tendrá unidades de Newton por micrómetro ($N \cdot \mu m$). La multiplicación de estas dos unidades resulta en la unidad de energía microjoules (μJ). La energía disipada correspondiente a cada una de las curvas de histéresis se muestra en la parte superior de las figuras 25 y 26, en unidades de $N \cdot \mu m$.

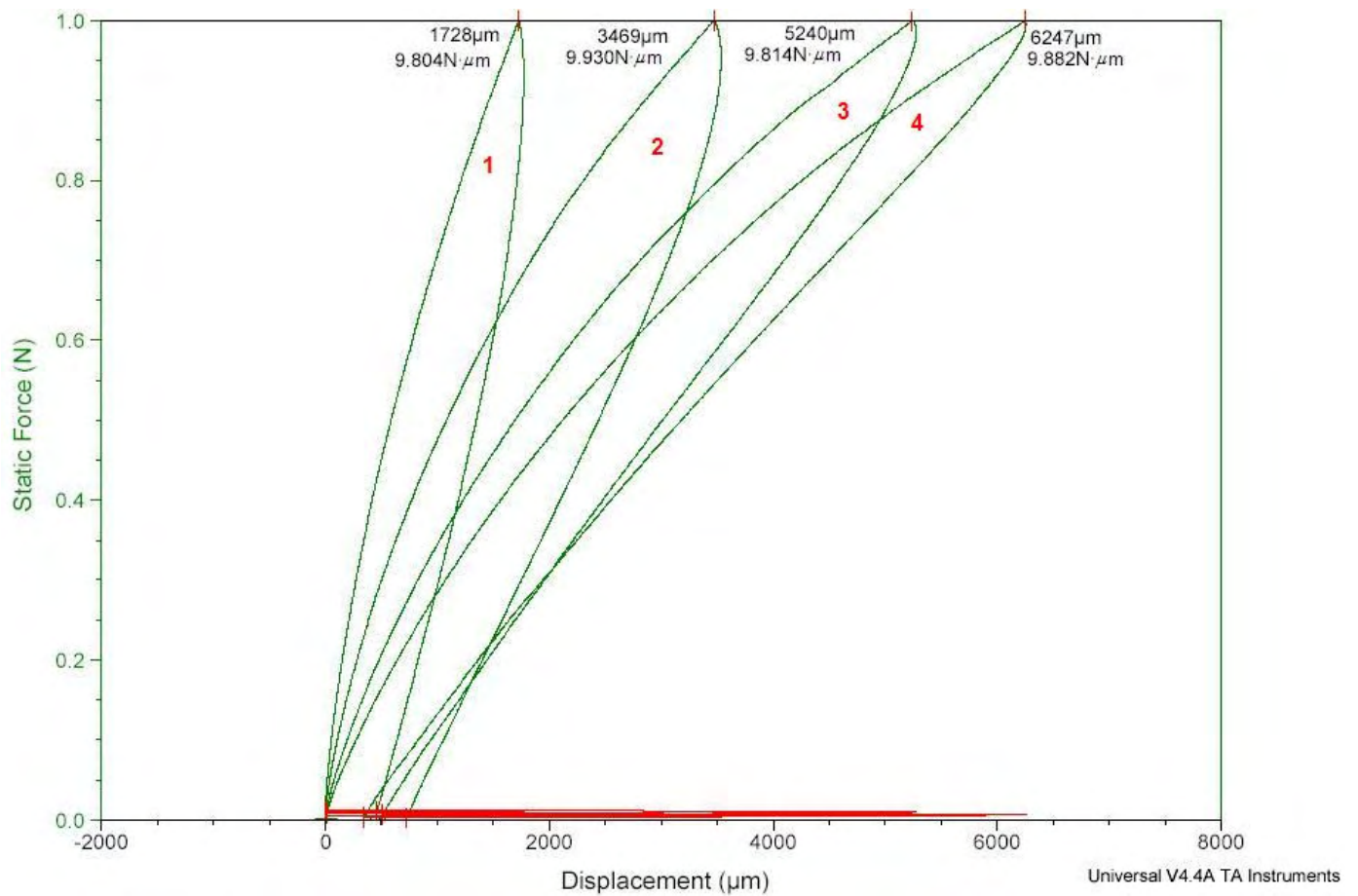


Figura 25. Determinación de la energía disipada curvas 1, 2, 3 y 4.

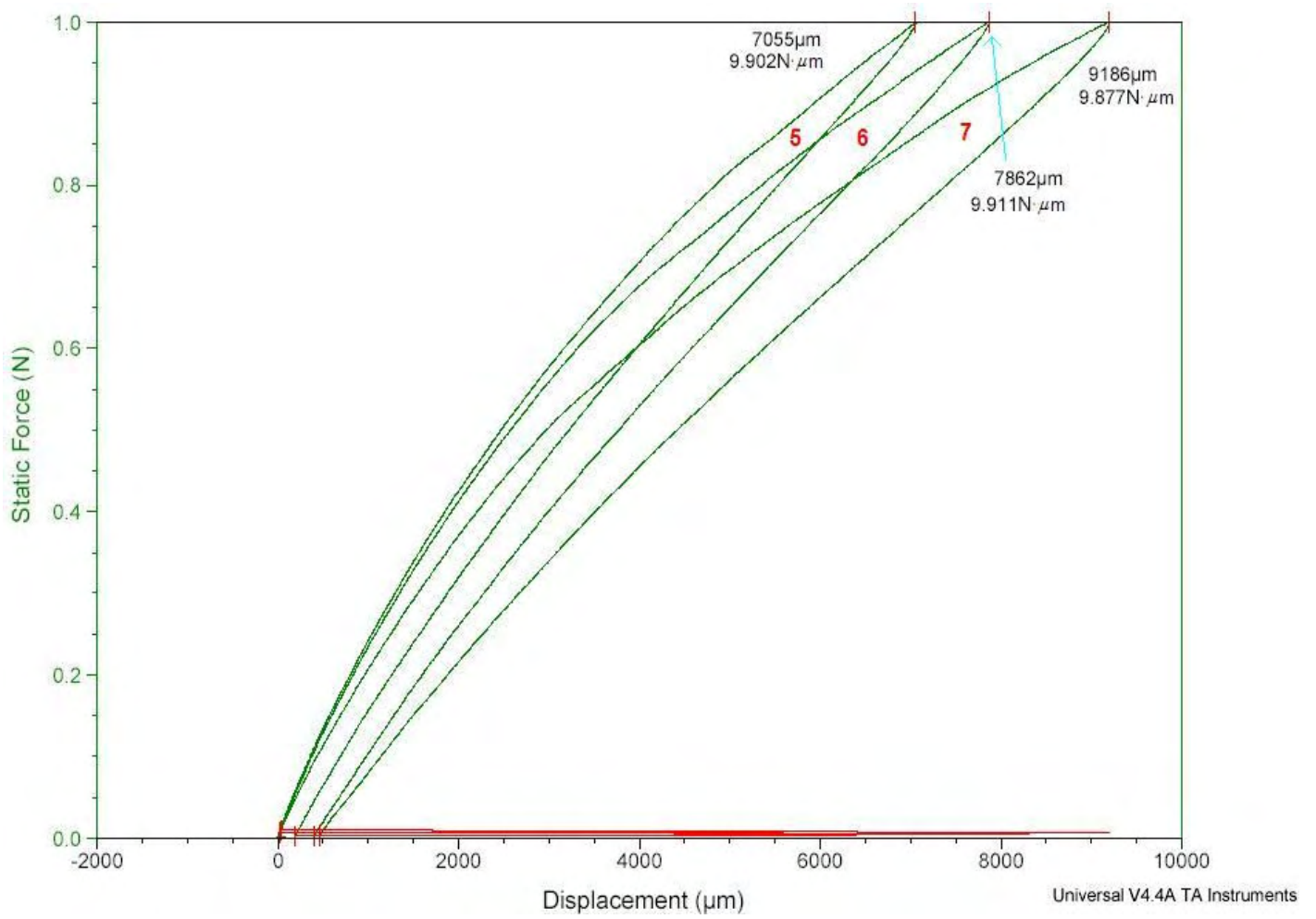


Figura 26. Determinación de la energía disipada curvas 5, 6 y 7.

A continuación se muestra una tabla que resume las magnitudes fundamentales determinadas en estas pruebas.

Tabla 5. Magnitudes determinadas en la prueba de histéresis del material.

Curva	Tensión (MPa)	Fuerza (N)	% de elongamiento	Desplazamiento (μm)	Energía disipada (μJ)
1	0.07	1	19.5	1728	9.804
2	0.07	1	40	3469	9.930
3	0.07	1	59.5	5240	9.814
4	0.07	1	70.5	6247	9.882
5	0.07	1	79.5	7055	9.902
6	0.07	1	89	7862	9.911
7	0.07	1	101	9186	9.877

Como se observa en la tabla, la energía disipada no varía considerablemente con respecto a la elongación del material. Esto nos indica que no importa cuanto se estire el material va a absorber la misma energía. Así el material polimérico antivibración disipará una cantidad de energía igual si se estira a un 20% de su tamaño original o a un 100%.

5. CONCLUSIONES.

- El espesor del material es de 4.4 mm, ya que se necesita un buen espesor para amortiguar las vibraciones, y tiene una densidad de 0.98 g/mL a temperatura ambiente (aprox. 20°C).
- Se aprecian en el IR y RMN los grupos característicos de un posible poliuretano, hecho a partir de un polioliol de cadena larga y un diisocianato.
- El material presenta al simple tacto un comportamiento elastomérico, que es confirmado por la temperatura de transición vítrea de -56°C.
- El material es relativamente estable térmicamente hasta los 240°C, por arriba de esta temperatura empieza a degradarse. Queda aproximadamente un 5% de sólidos después de 400°C.
- En la espectroscopia por dispersión de energía (EDS) se detectan cargas inorgánicas en el material, para dar al polímero un mejor funcionamiento.
- El material es viscoelástico, con valores de coeficiente de amortiguamiento ($\text{Tan } \delta$) adecuados (>1) para amortiguar las vibraciones de frecuencias altas (100-1600Hz) y no es recomendable para usarse a bajas frecuencias (1-60 Hz).
- El material disipa la misma cantidad de energía si se elonga al doble de su tamaño que si se elonga sólo una décima parte más de su tamaño, lo que indica que la disipación de energía no depende de su deformación, ya que es su estructura molecular es la que realiza la función de amortiguador.

6. REFERENCIAS.

- ¹ Keller T., Setsuo M., Multi-axis hand-arm vibration testing & simulation at the national institute of industrial health, Kawasaki, Japan.
<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2006-140/pdfs/2006-140.pdf>
- ² Occupational Health Clinics for Ontario Workers Inc, HAVS suplemento informativo. <http://www.ohcow.on.ca/resources/handbooks/havs/HAVS.pdf>
- ³ Griffin Michael J., Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, pps 50.1-50.14-http://www.ucm.es/info/seas/estres_lab/enciclo/indice_gral.htm.
- ⁴ Reynolds D.D., Stein J.K., Design and evaluation o fan inexpensive test fixture for conducting glove vibration tests per ISO standard 10819. Center for mechanical & environmental systems technology, University of Nevada. Ergo-air Inc.
http://www.ergoair-inc.com/paper_1.html
- ⁵ NOM-024-STPS-2001. Vibraciones-condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo. Catálogo de normas en: <http://www.economia-noms.gob.mx/>
- ⁶ Mosqueira R. S. Física Elemental. (1968). Editorial Patria, S. A. pp. 185-187.
- ⁷ Alonso M., Finn E., (1976), Física. Campos y ondas, vol. 2, Fondo Educativo
- ⁸ Nashif A., Jones D., Henderson J., (1985), Vibration damping, John Wiley & Sons, pp. 25,26,45,61,67,68,74,75,88,90,91.
- ⁹ Interempresas Bienes de equipo y naves industriales y oficinas.
<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=8304>
- ¹⁰ Macrogalería. El maravilloso mundo de los polímeros.
<http://www.pslc.ws/spanish/index.htm>
- ¹¹ Areizaiga J., Cortazar M., Elorza J., Iruin J (2002). Polímeros, vol. 1, Editorial Síntesis, Madrid, pp. 320-340.
- ¹² Lakes R.S. (1999). Viscoelastics solids, 2da edición, CRC Press, pp. 1, 2, 4, 5, 7, 8, 11, 54, 75, 93, 94, 108, 245, 384, 387, 406