



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

“EFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE EL NITINOL SOMETIDO A BAJAS PRESIONES”

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

PRESENTA:
ING. KHRYZTIAN ADRIAN SAHAGÚN CUESTAS

TUTOR PRINCIPAL:
DR. JESÚS ANTONIO DÍAZ HERNÁNDEZ
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
DR. GERARDO SOTO HERRERA
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

DR. FRANKLIN MUÑOZ MUÑOZ
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA A MAYO DE 2019



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.

DEDICATORIA

A mis papás Salvador y Marisol
por todo su apoyo brindado.

“El hombre nunca sabe de lo que es capaz hasta que lo intenta”

Charles Dickens

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por haberme permitido ser miembro de uno de sus posgrados; asimismo, al Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN) por abrirme las puertas y darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución; también agradezco a cada uno de los investigadores y docentes involucrados en mi formación los cuales me enseñaron el camino hacia al conocimiento científico.

Agradezco también a mi tutor de tesis el Dr. Jesús Antonio Díaz Hernández por haberme enseñado la forma correcta de hacer las cosas, por auxiliarme en cada situación presentada, con toda la paciencia del mundo y por haber estado pendiente de mis avances durante el desarrollo de esta tesis.

De igual manera agradezco al Dr. Gerardo Soto Herrera y al Dr. Franklin Muñoz Muñoz, miembros de mi comité de tesis, quienes estuvieron presentes en cada uno de mis avances siempre con una crítica constructiva en pro de desarrollar una mejor investigación. También se les agradece, el haber participado en la toma de decisiones sobre la fabricación de los diferentes componentes, así como en el desarrollo del proyecto en general.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido durante toda mi etapa de estudio, así como por el financiamiento del proyecto FORDECYT-272894 a cargo del Dr. Oscar Edel Contreras López con el cual se compraron los materiales y componentes requeridos en esta investigación.

Se le agradece a la empresa ThumbSat México S.A. de C.V. por promover la idea de la construcción de un sistema de simulación espacial para probar sus femtosatélites, así como el aporte de conocimientos durante el desarrollo de esta investigación, de la misma manera le doy las gracias por la contribución del alambre de nitinol utilizado en las pruebas realizadas durante el desarrollo del proyecto.

Gracias a los técnicos Gabriel Rendón Márquez y Víctor Pérez Arroyo del departamento de Geología de la división de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por su apoyo y aporte de conocimientos en el proceso de la elaboración de muestras con acabado espejo.

Gracias al Mtro. Benjamín González Vizcarra y al Ing. Miguel Ángel Ávila Puc de la Escuela de Ciencias de Ingeniería y Tecnología (ECITEC) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) Unidad de Valle de las Palmas Campus Tijuana por su valiosa colaboración en el desarrollo de las pruebas de tensión y microdureza, así como en el análisis de resultados de los diferentes ensayos.

Se les agradece a los técnicos Alejandro Tiznado Vázquez, Enrique Medina Leal y Joaquín Quezada Rivera por su aporte de conocimiento, su accesibilidad para capacitarme en el uso de maquinaria y herramientas, así como por el apoyo en la fabricación, montaje y pruebas de la cámara.

Agradezco al Ing. Israel Gradilla Martínez por aportar su valioso tiempo para la observación de mis muestras en el MEB así como la contribución de sus conocimientos en el análisis de los resultados durante el desarrollo de esta investigación.

Un reconocimiento especial a los Dres. Leonel Susano Cota Araiza, Enrique Antonio Hernández Elías, Roberto Conte Galván y Raúl Michel Murillo, por aceptar ser parte de los miembros de mi jurado en la defensa de ésta tesis. También les agradezco enormemente el tiempo empleado en la revisión, redacción y aportes hacia ésta investigación para que fuese escrita de la mejor manera.

Un especial agradecimiento a la Mtra. Martha Eloísa Aparicio Ceja y al Tec. Lab. Jaime Mendoza López por todas las palabras motivacionales y de conocimientos que me brindaron las cuales fueron fundamentales para poder finalizar con éxito esta etapa de mi vida.

También le agradezco a la coordinadora del posgrado en Ensenada, la Dra. María Guadalupe Moreno Armenta; al personal administrativo en CU: a María Esther Carrillo Espinosa y a Diana Elizabeth Arias Calzadilla, quienes resolvieron todas mis dudas y orientaron en todos los procesos durante toda mi estancia en la maestría, así como realizar los trámites necesarios para que pudiera terminar en tiempo y forma.

Agradezco a investigadores, técnicos, compañeros, colegas y amigos que forman parte del CNyN que de una u otra forma me apoyaron para poder culminar mi proyecto de tesis.

Mi más sincero agradecimiento a mis papás Salvador y Marisol por todo su apoyo brindado no sólo en esta última etapa sino a lo largo de toda mi vida, por su constante motivación para seguir adelante y contribuir en lograr todas mis metas. Gracias también a mis hermanas Yhara Diana y Cindy Berenice por estar siempre presente en cada momento vivido. A mis abuelas, tías y al resto de familiares quienes permanentemente me estuvieron insistiendo en seguir adelante y sobrepasar todas las adversidades.

Infinitas gracias en especial a Dios por permitirme disfrutar cada situación presentada, por conocer nuevas amistades, por culminar satisfactoriamente este pequeño paso de una grandiosa vida y por estar siempre presente en cada circunstancia sin importar lo bueno o malo que ésta haya sido.

Gracias de todo corazón.

RESUMEN

Este trabajo consiste en el diseño y construcción de una cámara de alto vacío para simular las condiciones del ambiente espacial con todos los sistemas necesarios para la obtención de la presión requerida, así como ciclos simulados de radiación térmica generados por medio del incremento y disminución de temperaturas. Esto para que los pequeños satélites que orbitarán alrededor de la Tierra se sometan a ese ambiente antes de su lanzamiento, y así observar el comportamiento en cuanto a la resistencia de los materiales que lo componen, la emisión y recepción de datos de la electrónica utilizada verificando de manera segura y económica la eficacia de dichos dispositivos. Esta cámara alcanzó una presión mínima promedio de 1.27×10^{-7} Torr y un intervalo de temperaturas de -50.7 hasta 130.2 °C. Con estas condiciones se pudieron realizar los ciclos de simulación del día y la noche.

Una vez construida la cámara, se hizo un estudio para verificar su correcto funcionamiento, se analizó el comportamiento del nitinol (material empleado en las antenas de los femtosatélites de la compañía Thumbsat). Con especial énfasis en el estudio de la memoria de forma en condiciones espaciales simuladas, esto debido a los posibles cambios de fases que se pueden dar con los incrementos de temperatura y variaciones de presión.

Posterior al experimento se analizó el material en el MEB (Microscopio Electrónico de Barrido) para observar cambios en su morfología, también se realizaron ensayos de microdureza, así como pruebas mecánicas de tensión observando las propiedades obtenidas debido al esfuerzo-deformación de cada una de las muestras, y así, se determinó si el material es apto o no para el uso que se requiere. Al realizar los ensayos de tensión se obtuvieron esfuerzos máximos de 500 MPa para todas las muestras, sin embargo, tanto la resiliencia como la microdureza disminuyeron conforme los ciclos térmicos aumentaron lo que nos indica que poco a poco se va perdiendo su propiedad súper elástica.

Con las pruebas realizadas y las metas alcanzadas en cuanto a presión y temperaturas se corroboró el correcto funcionamiento de la cámara de simulación espacial.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
CAPITULO 1.	
INTRODUCCIÓN 1	
1.1 Satélites y su importancia	1
1.2 Condiciones del espacio	2
1.3 Cámaras simuladoras del espacio	2
CAPITULO 2.	
MARCO TEÓRICO	4
2.1 Diseño de una cámara simuladora del espacio	4
2.1.1 Cámara de vacío.	4
2.1.2 Bombas	5
• Mecánica	6
• Turbomolecular	6
2.1.3 Medidores de presión.	7
• Pirani	8
• De ionización de cátodo frío (Penning)	8
2.1.4 Sistemas térmicos	9
• Radiación térmica solar	9
• Enfriamiento	10
2.2 Nitinol como antena para satélites Thumbsat	11
2.2.1 Aleaciones con memoria de forma	13
2.2.2 Métodos de análisis a utilizar.	23
2.2.2.1 Pruebas mecánicas	23
▪ Ensayo de microdureza	24
▪ Ensayo de tensión.	26
2.2.2.2 Análisis morfológico	30
CAPITULO 3.	
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	32
3.1 Hipótesis	32
3.2 Objetivos generales	32
3.3 Objetivos específicos	32
CAPITULO 4.	
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÁMARA DE VACÍO	33
4.1 Ensamble general	33

4.2 Tipos de bombas	35
4.2.1 Bomba mecánica	35
4.2.2 Bomba turbomolecular	36
4.3 Tipos de medidores de presión	37
4.3.1 HPS series 947	37
4.3.2 De ionización de cátodo frío (Penning):	38
4.4 Sistemas térmicos	39
CAPITULO 5.	
CICLOS SIMULADOS DE RADIACIÓN TÉRMICA SOLAR SOBRE EL NITINOL	43
5.1 Entrenamiento del nitinol	43
5.2 Ciclos térmicos	45
5.3 Preparación de muestras	47
CAPITULO 6.	
RESULTADOS Y DISCUSIONES	49
6.1 Comportamiento ante cambios cíclicos	49
6.2 Ensayo de microdureza	50
6.3 Ensayo de tensión	51
6.4 Análisis morfológico	55
CAPITULO 7.	
CONCLUSIONES	61
MEJORAS FUTURAS	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	69
7.1 Control semántico	69
7.2 Material para construcción de las bases y ensamble de cámara.	72
7.3 Funcionamiento del MEB.	74
7.4 Procedimiento de encendido / apagado de bombas.	76
7.5 Tabla de ciclos térmicos sometidos en la cámara de UHV.	77
7.6 Especificaciones del durómetro tipo Vickers.	78
7.7 Especificaciones de la máquina universal Shimadzu.	80
7.8 Tabla de límites de velocidad en ensayo de tensión.	81

TABLA DE ILUSTRACIONES

Fig. 1 Cámara Telstar [5].	3
Fig. 2 Cámara LACO Technologies [6].	3
Fig. 3 Cámara de vacío típica [4].	5
Fig. 4 Intervalos de presión de operación para distintas bombas de vacío [4].	5
Fig. 5 Funcionamiento de la bomba mecánica [8].	6
Fig. 6 Bomba Turbomolecular [8].	7
Fig. 7 Intervalos de presión de operación de los distintos medidores de vacío [4].	7
Fig. 8 Medidor de Pirani [4].	8
Fig. 9 Medidor de ionización de cátodo frío (Penning) [8].	9
Fig. 10 Espectro de radiación solar [9].	10
Fig. 11 Serpentin [11].	10
Fig. 12 Satélite Thumbsat con antena de nitinol en su máxima expansión [12].	12
Fig. 13 Representación estructural de la fase austenítica (B2) [14].	13
Fig. 14 Esquema de la estructura de la martensita B19' en el sistema Ni-Ti [14].	14
Fig. 15 Gráfico de la estructura de la fase R [14].	14
Fig. 16 Esquemización de las curvas tensión-deformación en función de la fase en materiales con memoria de forma [13].	15
Fig. 17 Diagrama de fases de NiTi. [17]	16
Fig. 18 Diagrama de fases de NiTi en la composición equiatómica [18].	16
Fig. 19 Transformación de fase por temperatura sin carga mecánica [15].	18
Fig. 20 Esquema del efecto de memoria de forma de una AMF que muestra el desmaclado del material con una tensión aplicada [15].	18
Fig. 21 Esquema del efecto de memoria de forma que muestra la descarga y el subsiguiente calentamiento a austenita en condiciones sin carga [15].	19
Fig. 22 Datos de esfuerzo-deformación-temperatura que muestran el efecto de memoria de forma para una AMF de NiTi típico [15].	20
Fig. 23 Diagrama ejemplificando el efecto de la memoria de forma simple [14].	21
Fig. 24 Memoria de doble camino [13].	22
Fig. 25 Nanosatélite tipo Cubesat (entre 1 y 3 kg.) con antena de nitinol [20].	23
Fig. 26 Distancia de la muesca de la indentación [23].	26
Fig. 27 Durómetro Wilson hardness Tukon 1102.	26
Fig. 28 Curva esfuerzo-deformación identificando cada sección. [28].	28
Fig. 29 Diagrama de esfuerzo-deformación típico del nitinol [29].	29
Fig. 30 Shimadzu AG-IC-10 KN [30].	30
Fig. 31 Ejemplo de imagen en MEB [31].	30
Fig. 32 Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JIB-4500 [31].	31
Fig. 33 Vista expandida de la cámara en general mostrando los diferentes tamaños de bridas, los sellos de cobre, compuerta de entrada y soportes.	33

Fig. 34 Vista de la brida de 6 in con las líneas de entrada y salida del nitrógeno para el enfriador, además de los sellos y bridas de 2 ¾ y 1 1/3 in.	33
Fig. 35 Ensamble de bridas, válvulas y bomba turbomolecular.	34
Fig. 36 Base de análisis de muestras con serpentín y bombilla de halógeno.	34
Fig. 37 Vista expandida de la cámara y la base donde se encuentra la mayor parte del equipo y los componentes.	34
Fig. 38 Ensamble general mostrando cada una de las posiciones de los componentes que conforman el equipo.	34
Fig. 39 Bomba mecánica de la marca Edwards modelo E2M2.	35
Fig. 40 Indicador del nivel de aceite requerido para su funcionamiento.	35
Fig. 41 Bomba turbomolecular Alcatel ATP 100.	36
Fig. 42 Electrónica de bomba turbomolecular modelo ATC 200T.	36
Fig. 43 Diagrama en serie: bomba mecánica (bomba primaria) y turbomolecular (bomba secundaria) [33].	37
Fig. 44 Medidor Pirani HPS serie 947 en posición horizontal.	38
Fig. 45 Controlador de la marca MKS del medidor de alta presión.	38
Fig. 46 Medidor de ionización de cátodo frío (Penning) [35].	38
Fig. 47 Controlador electrónico AGD-100 Agilent [35].	38
Fig. 48 Geometría de la bombilla MR16 de la lámpara de halógeno [36].	39
Fig. 49 Comparación de las distribuciones espectrales de las lámparas de halógeno con filamento de tungsteno [36].	39
Fig. 50 Bombilla MR16 colocada dentro de la cámara.	40
Fig. 51 Fuente de voltaje que alimenta la bombilla.	40
Fig. 52 Serpentín de 1/4 in de cobre y extensiones de acero inoxidable.	41
Fig. 53 Serpentín colocado en la brida junto con el termopar tipo K.	41
Fig. 54 Pruebas con nitrógeno líquido en el serpentín.	41
Fig. 55 Recipiente para el nitrógeno líquido instalado en la cámara.	41
Fig. 56 Recipiente para el nitrógeno líquido aislado térmicamente.	41
Fig. 57 Temperatura máxima y mínima medida por el termopar en las pruebas.	41
Fig. 58 Ensamble final de la cámara con todos sus componentes.	42
Fig. 59 Medición de las temperaturas de transición.	43
Fig. 60 Morfología observada en el MEB a 1000x para todas las muestras con el fin de comparar y observar posibles cambios no apreciados para los diferentes ciclos de entrenamientos llevados a cabo de la siguiente manera; A-10, B-20, C-30 y D-40 ciclos respectivamente.	44
Fig. 61 Portamuestra con dos piezas de nitinol justado con alambre.	46
Fig. 62 Se colocó pasta térmica para favorecer la transferencia de calor.	46
Fig. 63 Expansión de nitinol revelando la fase austenita al ser irradiado con la lámpara de halógeno.	46
Fig. 64 Contracción de nitinol manifestándose la fase martensítica debido al nitrógeno líquido que circula por el serpentín.	46

Fig. 65 Cortadora de alta precisión ALLIED.	47
Fig. 66 Disco de diamante cortando el nitinol.	47
Fig. 67 Segmentos del nitinol fijados en el molde.	48
Fig. 68 Encapsulado del nitinol.	48
Fig. 69 Sistema de pulido Petropol.	48
Fig. 70 Lijado y pulido de cada una de las muestras.	48
Fig. 71 Acabado espejo de las muestras de NiTi.	48
Fig. 72 Ensayo de microdureza sobre las muestras de nitinol.	50
Fig. 73 Nano indentación tipo Vickers realizada a 500x.	50
Fig. 74 Planos de la base (A) y de la base chica (B) de la mordaza.	51
Fig. 75 Mordaza para sujeción de alambre de nitinol en la máquina Universal.	52
Fig. 76 Alambre de nitinol sujetado con las mordazas en la máquina universal.	52
Fig. 77 Gráfica de esfuerzo-deformación de muestras de cero ciclos a diferentes velocidades.	53
Fig. 78 Gráficas de esfuerzo-deformación a diferentes ciclos térmicos.	54
Fig. 79 Muestra de 0 ciclos (testigo) sección longitudinal, la imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.	55
Fig. 80 Sección transversal de la muestra testigo (0 ciclos). La imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.	56
Fig. 81 Muestra de 100 ciclos sección longitudinal, la imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.	57
Fig. 82 Muestra de 100 ciclos sección transversal, la imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.	57
Fig. 83 Imagen a 2000x correspondientes a secciones longitudinales de muestras sometidas a tratamientos térmicos durante un número diferente de ciclos. A-0, B-25, C-50 y D-100 ciclos.	58
Fig. 84 Imagen a 2000x correspondientes a secciones transversales de muestras sometidas a tratamientos térmicos durante un número diferente de ciclos. A-0, B-25, C-50 y D-100 ciclos.	59
Fig. 85 Proceso de trefilado para la obtención de alambre [41].	60
Fig. 86 Estructura con las ruedas soldadas.	72
Fig. 87 Aplicación de pintura base y esmalte.	72
Fig. 88 Ruedas y soporte de bloqueo.	72
Fig. 89 Ensamble con las bases y soportes de aluminio.	72
Fig. 90 Diferentes tipos y medidas de bridas.	73
Fig. 91 Tornillos, tuercas y arandelas.	73
Fig. 92 Sellos de cobre de diferentes medidas.	73
Fig. 93 Componentes del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) [44].	74
Fig. 94 Espectrómetro típico de un EDS [44].	75
Fig. 95 Cuerpo de ensayo de dureza Vickers tipo piramidal tetragonal de diamante con ángulo diedro de 136° [23].	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Características de satélites Thumbsat.	11
Tabla II Características en órbita de los satélites Thumbsat.	11
Tabla III Propiedades del nitinol [17].	21
Tabla IV Características bomba turbomolecular.	36
Tabla V Especificaciones significativas del medidor de presión.	38
Tabla VI Resultados de temperaturas y presiones mostrando los promedios en base a los 100 ciclos térmicos aplicados en la cámara de simulación espacial.	45
Tabla VII Resultados de pruebas de microdureza (tanto las diagonales como la dureza son resultados de un promedio de 5 muestreos realizados).	51
Tabla VIII Propiedades del nitinol obtenidas con los resultados del ensayo de tensión.	54
Tabla IX. Porcentaje atómico de Ni y Ti determinados por EDS correspondientes al nitinol sometido a 100 ciclos.	59
Tabla X Características de cada uno de los ciclos térmicos sometidos en la cámara de simulación espacial.	77
Tabla XI Especificaciones técnicas de Wilson Hardness Tukon 1102.	78
Tabla XII Especificaciones técnicas de máquina de tensión Shimadzu AG-IC-100 KN.	80
Tabla XIII Límites de velocidad en ensayo de tensión.	81

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de esta tesis se compone de dos partes: la primera consiste en el diseño, fabricación y ensamble de una cámara de vacío, que simule condiciones espaciales, para la prueba de femtosatélites. Durante la segunda parte se analizó el material nitinol (material empleado en la fabricación de las antenas en dichos satélites) dentro de la cámara para corroborar el correcto funcionamiento de la cámara y estudiar los cambios y/o defectos de las propiedades mecánicas del nitinol al ser sometido a ambientes espaciales simulados.

1.1 Satélites y su importancia

Los satélites son elementos que orbitan alrededor de un cuerpo celeste determinado. Existen satélites naturales y satélites artificiales. [1]

- ✓ Un satélite natural es un cuerpo de menor masa que orbita alrededor de otro de mayor masa debido a la atracción gravitacional descrita por Newton: La Luna es el satélite natural de la Tierra.
- ✓ Un satélite artificial es un aparato fabricado por el hombre el cual es enviado en una lanzadera espacial y que se mantiene en órbita alrededor de cuerpos del espacio. Los satélites artificiales orbitan alrededor de satélites naturales, asteroides o planetas.

Los satélites en órbita terrestre se utilizan para estudiar los océanos, la atmósfera, las nubes, el clima, las selvas subtropicales, los desiertos, las ciudades, las granjas, los glaciares y casi todo lo que está sobre la superficie terrestre e incluso debajo de ella. [2]

Los femtosatélites (del tamaño de una caja de pañuelos) son el futuro de las telecomunicaciones y una constelación de estos dispositivos tiene el potencial de llevar Internet a todo el mundo. El desarrollo de esta tecnología no es cualquier cosa pero la diferencia económica y física con los satélites tradicionales es abismal. El satélite Morelos III, que México envió al espacio en 2016, tiene el tamaño de un

camión de carga industrial, costó 300 millones de dólares, además de 100 mdd por el cohete empleado para ponerlo en órbita. Con este mismo dinero se podrían enviar 16,000 femtosatélites. Ahí radica la importancia del desarrollo de la siguiente generación satelital. [3]

1.2 Condiciones del espacio

La presión atmosférica a nivel del mar es de 760 Torr. La presión decrece con la altitud. Cerca de los 90 km de altitud la presión es de $\sim 10^{-3}$ Torr (troposfera y estratósfera). A los 1,000 km, la presión es de aproximadamente 10^{-10} Torr. Después de esta altura la presión decrece más lentamente, y a los 10,000 km la presión es $\sim 10^{-13}$ Torr. La temperatura a la que se ve sometido un satélite, dependiendo si éste recibe radiación térmica solar directa o no, oscila entre 377 °C y -269 °C. [4].

Las condiciones ambientales del espacio exterior son tan complejas y variables para su simulación en la Tierra que resulta tecnológicamente imposible, por lo que las cámaras de simulación espacial suelen restringir los ensayos a condiciones de vacío cercanos a 7.5×10^{-5} Torr y temperaturas entre -100 y 70 °C [5]. Por esta razón son importantes para la tecnología espacial las técnicas de ultra alto vacío, que ayudan en las pruebas de naves espaciales, trajes, materiales, satélites, autotransportes, equipo y herramienta en condiciones extremas de baja presión y microgravedad [4].

1.3 Cámaras simuladoras del espacio

Las condiciones en Tierra son drásticamente diferentes a las que un satélite se encontrará en la órbita de nuestro planeta. Afortunadamente, es posible recrear condiciones similares a las del espacio utilizando cámaras simuladoras del espacio.

En la Fig. 1 se muestra la cámara Telstar, la cual es una de las más grandes en el hemisferio sur, sus medidas internas son de 7 m de ancho, 8.5 m de altura máxima, 9 m de profundidad y un volumen total interior de 485 m³. Alcanza valores de vacío del orden de 7.5×10^{-7} Torr y temperaturas de -196 a 150 °C, muy por encima de la mayoría de los sistemas convencionales. [5].



Fig. 1 Cámara Telstar [5].

La compañía LACO Technologies ofrece una serie de cámaras para simulación espacial entre las cuales se encuentra *Space Simulation Vacuum System for Micro Satellite Testing* (Fig. 2). Dicha cámara cuenta con un diámetro de 60 cm y una altura de 40 cm, es fabricada en acero inoxidable y alcanza presiones de hasta 5×10^{-7} Torr. Esta cámara es ideal para probar micro y nanosatélites. [6]



Fig. 2 Cámara LACO Technologies [6].

CAPITULO 2.

MARCO TEÓRICO

2.1 Diseño de una cámara simuladora del espacio

El diseño de este tipo de cámara de vacío resulta complejo en cuanto a los componentes e instrumentos necesarios para la obtención de las situaciones de presión y temperaturas requeridos. A continuación se describe el equipo básico para llegar a tener tales condiciones.

2.1.1 Cámara de vacío.

De acuerdo con la definición de la Sociedad Americana de Vacío (1958), el término vacío se refiere a un espacio con gases en condiciones de presión menor que la presión atmosférica, por lo que el grado de vacío se incrementa en relación directa con la disminución de presión del gas residual. Esto significa que en cuanto más disminuimos la presión, mayor vacío obtendremos, lo que nos permite clasificar el grado de vacío. Entonces, podemos hablar de bajo, mediano, alto y ultra alto vacío, en correspondencia con intervalos de presiones cada vez menores. Cada intervalo tiene sus características propias. [7]

- Bajo y mediano vacío. El intervalo de presión atmosférica con estas características se manifiesta desde un poco menos de 760 Torr hasta 10^{-2} Torr.
- Alto vacío. El intervalo de presión se extiende desde cerca de 10^{-3} hasta 10^{-7} Torr.
- Ultra alto vacío. El intervalo de presión va desde 10^{-7} hasta 10^{-16} Torr.

Las cámaras, o contenedores, en los sistemas de vacío se construyen por lo general con vidrio o acero inoxidable (ver Fig. 3). La característica principal que debe tener el material de la cámara es su resistencia a la fuerza ejercida sobre ella por la presión atmosférica. Las cámaras de vacío son hechas, por lo general, en secciones cilíndricas, porque así la cámara puede resistir con mayor facilidad a la presión externa. [4]

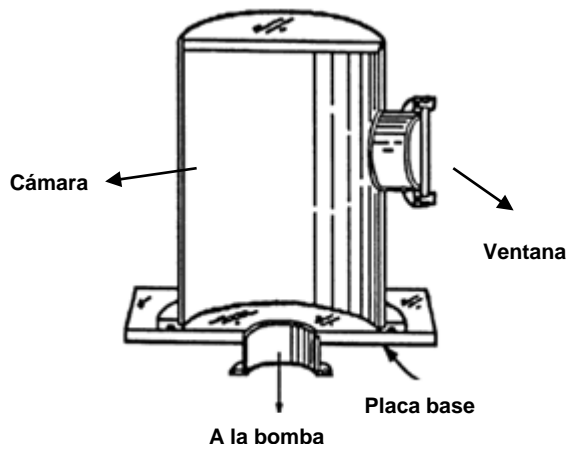


Fig. 3 Cámara de vacío típica [4].

2.1.2 Bombas

La selección de la bomba de vacío a emplearse para un cierto proceso es determinada por los siguientes parámetros: la presión más baja que se quiere lograr, el intervalo de presión aceptable, la velocidad de bombeo, la presión de descarga y el gas residual. En la Fig. 4 se presentan los intervalos de presión en las que trabajan distintos tipos de bombas.

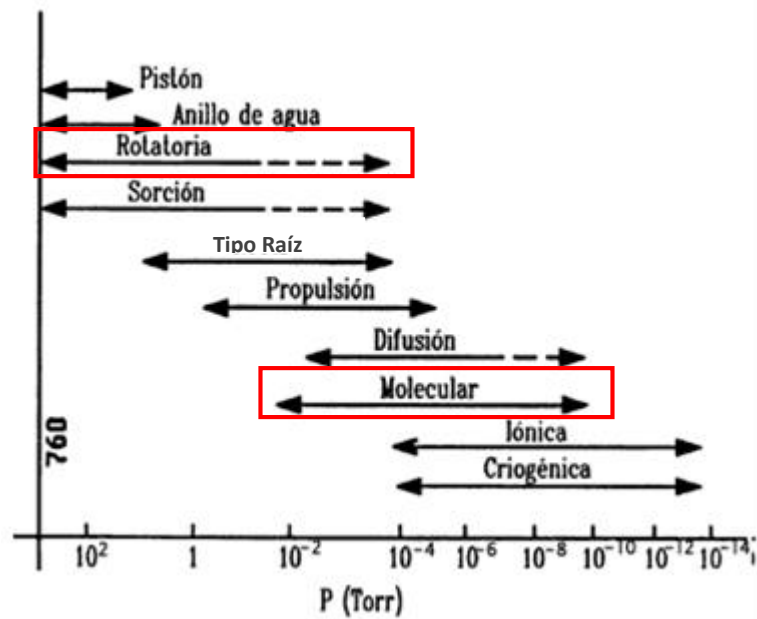


Fig. 4 Intervalos de presión de operación para distintas bombas de vacío [4].

Para lograr los niveles de vacío deseado se requieren específicamente las siguientes bombas:

- **Mecánica**

Esta bomba; también llamada rotatoria, consiste en un espacio cilíndrico (*estator*) en cuyo interior, gira excéntricamente un cilindro de diámetro menor (*rotor*). Las paletas son mantenidas en contacto con las paredes del estator por medio de resortes. El volumen encerrado entre la entrada y la paleta aumenta al girar el rotor, por lo tanto, el gas se mueve hacia esta área. Dicho gas es luego aislado y la paleta comienza a comprimirlo, y finalmente es expulsado al abrirse la válvula de descarga (ver Fig. 5). [8].

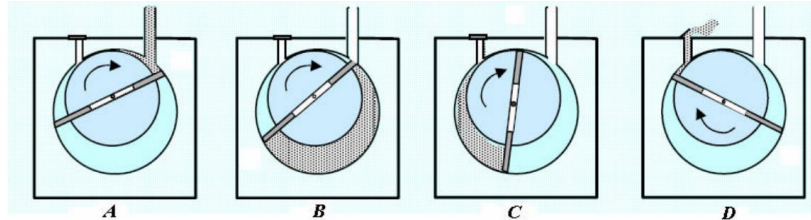


Fig. 5 Funcionamiento de la bomba mecánica [8].

- **Turbomolecular**

Su funcionamiento se basa en la transferencia de momento de los álabes impulsores de una turbina a las moléculas de gas (similar al efecto de un ventilador impulsando el aire, como se muestra en la Fig. 6). El giro de los álabes debe hacerse a gran velocidad ($\sim 30\,000$ rpm), y su orientación es tal que la mayor probabilidad de transmisión sea de la región de alto vacío a la de bajo vacío, originando así una fuerte diferencia de presión entre ambas regiones, determinada por la razón de compresión, que puede alcanzar valores de hasta 10^{-9} . Su velocidad de bombeo es alta por lo que necesita de una bomba rotatoria de apoyo. La bomba turbomolecular es muy versátil, puede producir diversos niveles de vacío, desde medio hasta ultra-alto (7.5×10^{-7} Torr) [8].

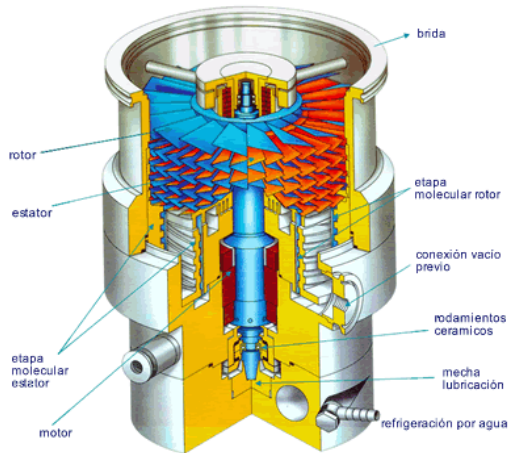


Fig. 6 Bomba Turbomolecular [8].

2.1.3 Medidores de presión.

De acuerdo con el intervalo de presión, se pueden utilizar diversos instrumentos de medición, en la Fig. 7 se observan sus intervalos de presión de funcionamiento. En el proyecto se utilizará un medidor de bajo vacío (Pirani) y uno de alto vacío (de ionización de cátodo frío).

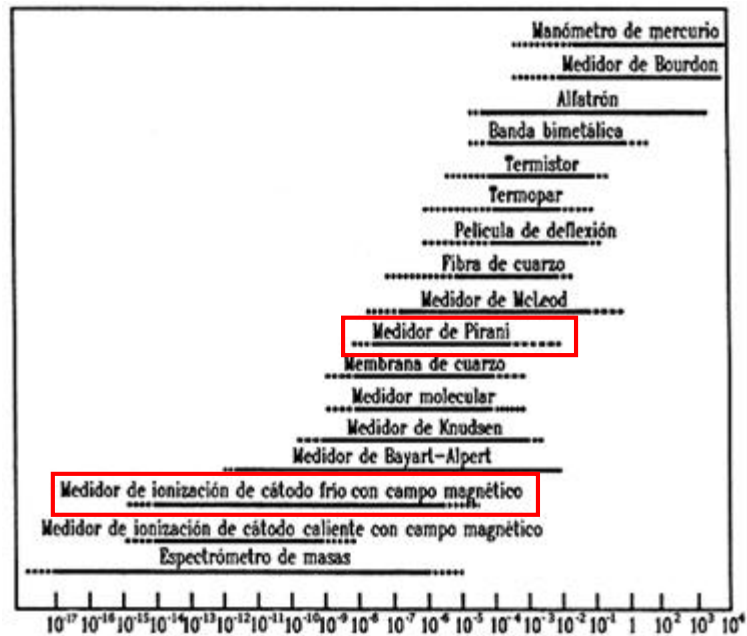


Fig. 7 Intervalos de presión de operación de los distintos medidores de vacío [4].

- **Pirani**

El medidor de Pirani nos da una medida de la presión a través de la variación de la conductividad térmica del gas. Este dispositivo consta de un filamento metálico suspendido en un tubo en el sistema de vacío y conectado a una fuente de voltaje o corriente constante. El alambre puede ser de tungsteno u otro material cuya resistencia varíe mucho con la temperatura. Al aumentar el vacío, se reduce la pérdida de calor por conducción a través del gas y aumenta la temperatura y la resistencia del conductor. En la Fig. 8 se observa un diagrama representativo de este medidor [4].

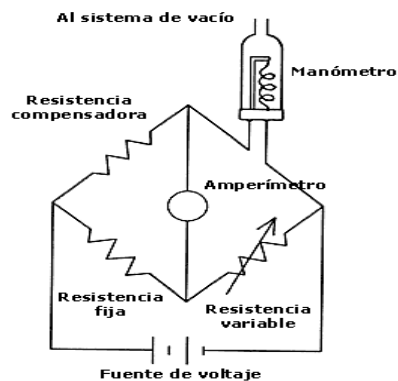


Fig. 8 Medidor de Pirani [4].

- **De ionización de cátodo frío (Penning)**

Basado en la ionización del gas provocada al aplicar un potencial de varios kV entre un ánodo en forma de anillo y un cátodo formado por dos placas paralelas a ambos lados del anillo (ver Fig. 9). Al mismo tiempo se aplica también un campo magnético. La presencia de este campo hace que los electrones describan trayectorias circulares en su recorrido hacia el cátodo, aumentando con ello el número de choques con los átomos del gas y los sucesos de ionización (esto permite que se produzcan iones aún a presiones muy bajas).

La corriente iónica depende de la cantidad de choques que se producen entre los electrones y el gas, lo cual está determinado por la presión en la cámara de vacío. Midiendo entonces la corriente se puede obtener la presión. Este manómetro funciona en el intervalo entre 7.5×10^{-2} a 7.5×10^{-9} Torr [8].

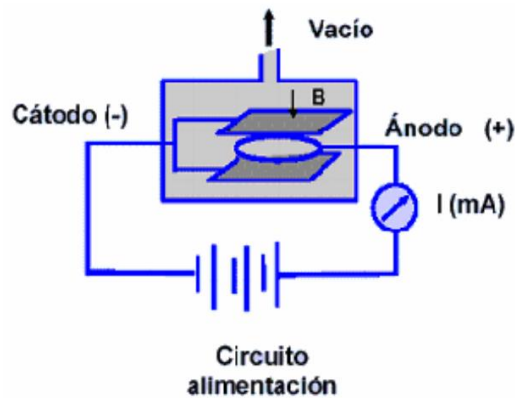


Fig. 9 Medidor de ionización de cátodo frío (Penning) [8].

2.1.4 Sistemas térmicos

Una vez que el satélite esté en órbita se someterá a cambios de temperatura extremos ya que si se encuentra en la posición donde la radiación del Sol le incida directamente su temperatura aumentará de manera proporcional a los rayos térmicos solares recibidos; en cambio sí se encuentra en la zona de eclipse, es decir, cuando la Tierra esté entre el Sol y el satélite, éste último sufrirá de temperaturas muy bajas. Por eso la importancia de tener un sistema que proporcione tales condiciones dentro de cualquier cámara de simulación espacial.

- **Radiación térmica solar**

Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. El Sol es una estrella cuya superficie se encuentra a una temperatura media de 6000 K (5727 °C) en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear que producen una pérdida de masa que se transforma en energía. La energía liberada por el Sol se transmite al exterior mediante la radiación térmica solar [9]. Otro factor que contribuye a la radiación sobre el satélite es el albedo; es el porcentaje de radiación que la Tierra refleja respecto a la que incide sobre ella, el albedo medio es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol [10]. Para su simulación se requiere de calentadores con un espectro de radiación lo más parecido al espectro de la radiación térmica solar mostrado en la Fig. 10.

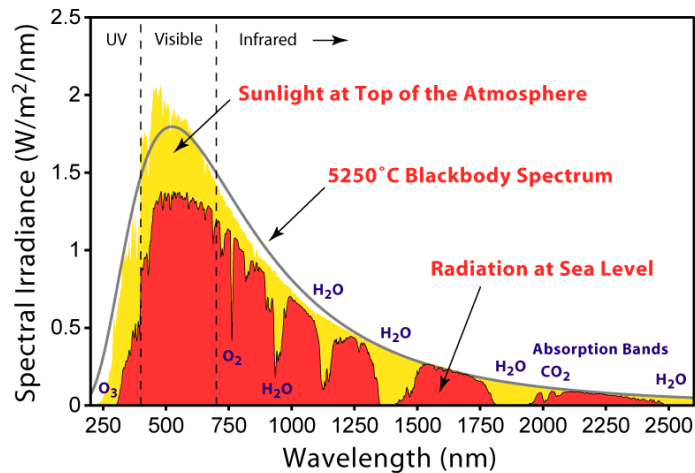


Fig. 10 Espectro de radiación solar [9].

- **Enfriamiento**

Enfriar a temperaturas criogénicas es sumamente complicado, lo más “sencillo” es sumergir en nitrógeno líquido lo que se requiera congelar, pero suele ser un problema ya que es casi imposible sumergir toda la cámara o inundar el interior de ésta ya que se perdería el vacío. En lugar de eso se utilizan intercambiadores de calor para tener las condiciones deseadas.

El serpentín es un equipo intercambiador de calor que al estar en contacto con la superficie a enfriar por medio del refrigerante a baja temperatura que circula por su interior lo envía de nuevo mediante los ductos transportadores a las instalaciones y mediante este proceso la temperatura presente se mantiene bajo condiciones de confort o tan bajas como se requiera. En la Fig. 11 se observa la geometría típica de un serpentín [11].

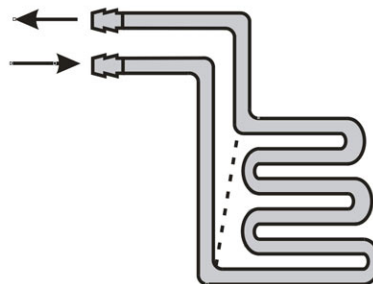


Fig. 11 Serpentín [11].

2.2 Nitinol como antena para satélites Thumbsat

Thumbsat es una empresa la cual pretende enviar experimentos al espacio de manera rápida, barata y eficiente por medio de femtosatélites, con las características que se muestran en la tabla I.

Tabla I Características de satélites Thumbsat.

Tu experimento / carga útil	Diversos tamaños y masas Típicamente: 48 x 48 x (15-32) mm Masa: Hasta 25 g
Ordenador principal	Microcontrolador interfaz de cámara digital incorporada
Cámara	Alta definición CMOS Matriz activa de 2048 (H) x 1536 (V) píxeles. Lentes y ubicaciones opcionales Usos: Microscopio, macrocámara y telescopio
Memoria	Flash de 128 MB y 512 MB
Convertidor de voltaje	Aumenta los voltajes bajos a 5 V Extrae la energía máxima de la batería
GPS	Usos: Experimentos sensibles a la posición y descarga dirigida de datos
Transmisor	100 mW operando en la banda de 400 MHz
Batería	Cloruro de Tionilo de Litio La mayor densidad de energía disponible
Cola desplegable / antena	De memoria de forma expandible.
Paleta desplegable	Usos: Estabilidad aerodinámica, mejora de la fricción y mejora de la firma del radar
Interfaz de experimento	Variable, pero típicamente: 3.6 V de potencia no regulada, 1.8 Wh 5 V de potencia regulada 6 x en analógica 2 x interfaces USART 1 x interfaz I2C

Una vez en órbita el satélite presenta las características mostradas en la tabla II.

Tabla II Características en órbita de los satélites Thumbsat.

Altitud Orbital Media:	500 km
Velocidad Orbital Media:	7.6 km/s
Período:	95 minutos
Tiempo en la luz del sol:	59 minutos
Tiempo en sombra:	36 minutos

El principal componente que se pretende para las antenas de estos femtosatélites es el material de memoria de forma con la composición de NiTi (nitinol), cuya función es la de emitir y recibir las señales hacia Tierra desde el espacio. Al ser la antena fabricada de una aleación con memoria de forma le permite al momento del lanzamiento reducirse lo más posible, logrando tener dimensiones mínimas requeridas en el satélite las cuales andan alrededor de los 5 cm por lado, una vez en el espacio y al ser sometido a radiación térmica solar la antena realizará su función de expansión logrando una longitud máxima la cual beneficia al satélite en cuanto a telecomunicación y estabilidad se refiere. En la Fig. 12 se observa un esquema representativo de los satélites que la empresa Thumbsat ofrece comercialmente en donde se muestra cada uno de sus componentes junto con la antena expandida debido al material de memoria de forma que la compone. Esta empresa requiere de un dispositivo de simulación espacial para probar tanto la transmisión electrónica como la resistencia de sus materiales y así verificar en tierra el correcto funcionar de todo su equipo con el que obtendrían la seguridad de que su satélite funcionará correctamente en la misión que se le asigne. [12].

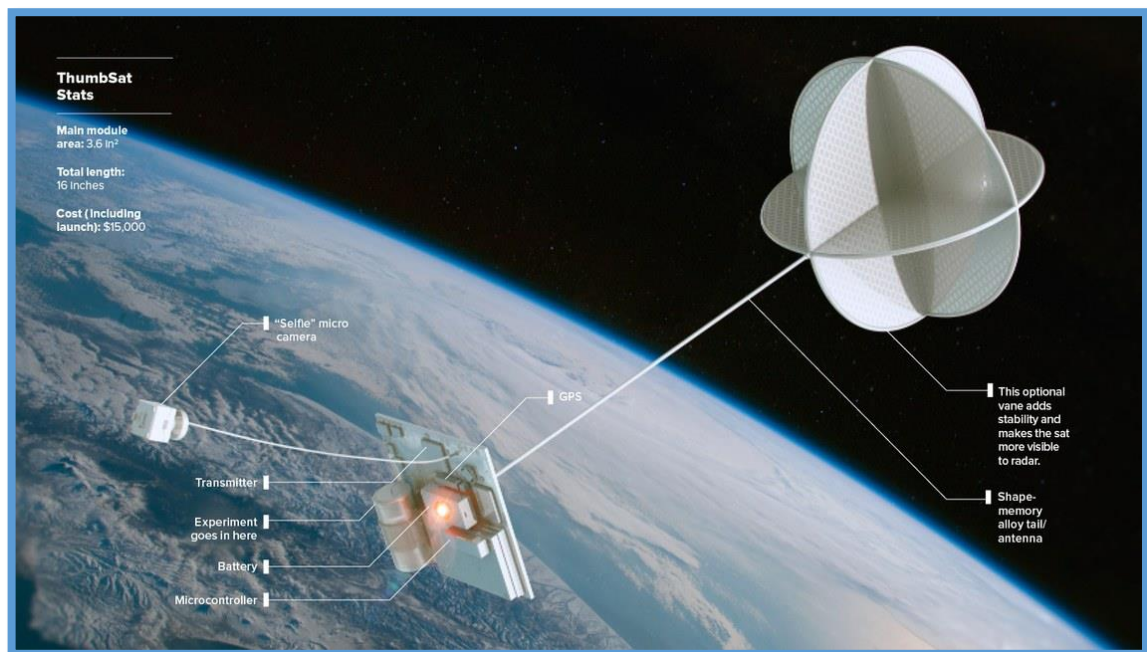


Fig. 12 Satélite Thumbsat con antena de nitinol en su máxima expansión [12].

2.2.1 Aleaciones con memoria de forma

El material que se requiere para las antenas de los femtosatélites es de una Aleación con Memoria de Forma (AMF o SMA por las siglas en inglés de *Shape Memory Alloys*) que tienen la capacidad de volver a una forma predeterminada cuando se calienta. Cuando se encuentran en frío, o por debajo de su temperatura de transformación, tiene un límite elástico muy bajo y se puede deformar con bastante facilidad en cualquier forma nueva que se mantendrá. Sin embargo, cuando el material se calienta por encima de su temperatura de transformación experimenta un cambio en la estructura de cristal que hace que se vuelva a su forma original. [13].

La aleación con memoria de forma más común es una de níquel 55%-56% y titanio 44%-45% llamada nitinol. Fue desarrollada en 1962 por William Buehler y Frederick Wang, mejorando el comportamiento de memoria de forma superior a las conocidas hasta entonces: aleaciones Au-Cd. Llamaron a este material nitinol, acrónimo de *Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory* (Níquel Titanio Laboratorio De Artillería Naval). [13].

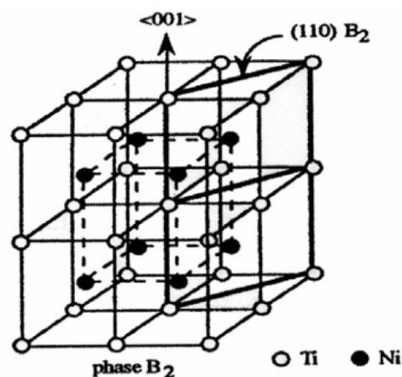


Fig. 13 Representación estructural de la fase austenítica (B2) [14].

La forma del ordenamiento atómico o estructura cristalina característica de la fase austenítica en las aleaciones con memoria de forma de NiTi se una tipo B2 y corresponde a una estructura cúbica centrada en el cuerpo (ver Fig. 13), donde los átomos de Ni ocupan el centro del cubo (en negro en Fig. 13), mientras que los

átomos de Ti están en los vértices (en blanco en Fig. 13). Los parámetros de red están comprendidos generalmente entre 2.9 y 3.1 Å. [14].

La estructura cristalina característica de la fase martensita es una tipo B19 o monoclinica, como se muestra en la Fig. 14.

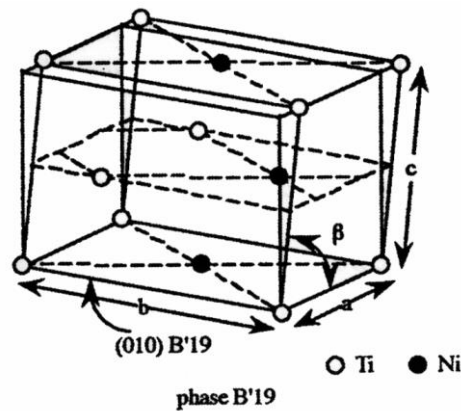


Fig. 14 Esquema de la estructura de la martensita B19' en el sistema Ni-Ti [14].

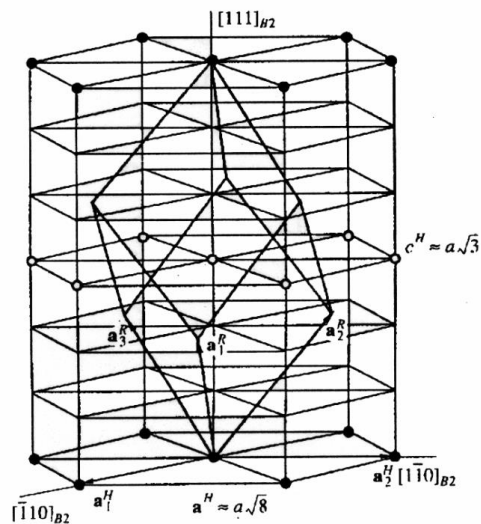


Fig. 15 Gráfico de la estructura de la fase R [14].

Sus parámetros de red son los siguientes:

$$a = 2.88 \text{ \AA}, \quad b = 4.12 \text{ \AA}, \quad c = 4.62$$

$\beta = 97^\circ$, para el caso de aleaciones binarias cercanas a la equiatómica.

Las fases intermedias a veces están presentes y son estables a temperaturas o esfuerzos entre las fases austenita y martensita. La fase R es una fase martensítica intermedia, tienen una alta densidad de dislocación (es decir, trabajo en frío), precipitados ricos en Ni o en algunas aleaciones ternarias. La fase R, es una estructura martensítica correspondiente a una distorsión ortorrómbica de la malla cúbica en la dirección $\langle 111 \rangle$ (Fig. 15), aunque es más común utilizar para su descripción una red de tipo hexagonal. Sus parámetros de red son: [14].

$$a = 7.38 \text{ \AA} \quad c = 5.32 \text{ \AA} \quad c/a = 0.7211$$

Las aleaciones con memoria de forma NiTi tienen un comportamiento mecánico distinto en función de la fase (ver Fig. 16). La *austenita* es la fase más dura y resistente, mientras la fase *martensítica* es fácilmente deformable y más blanda, siempre y cuando no contengan precipitados que podrían incluso invertir este comportamiento. [13]. La transformación de una estructura a otra no se produce por difusión de átomos, sino por distorsión de la red cristalina. [15]. Pequeños cambios en la composición pueden afectar significativamente las propiedades del material. [16]

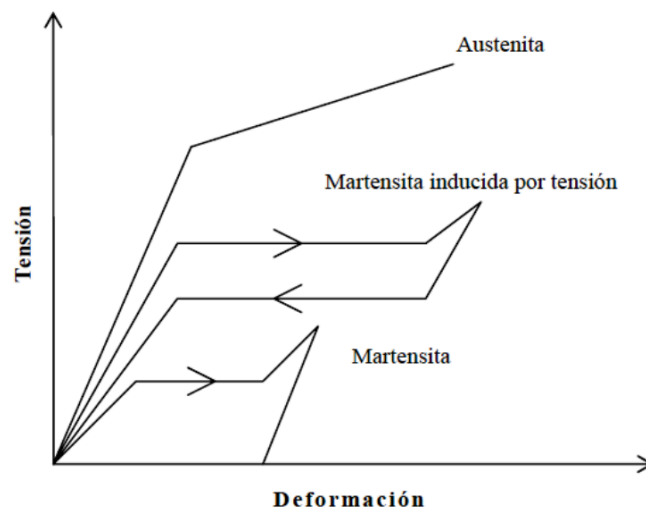


Fig. 16 Esquematización de las curvas tensión-deformación en función de la fase en materiales con memoria de forma [13].

En la Fig. 17 se muestra el diagrama de fases en equilibrio de este sistema de las aleaciones binarias Ni-Ti.

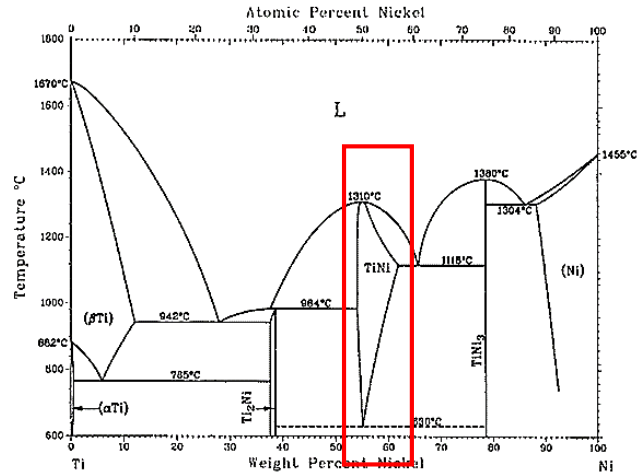


Fig. 17 Diagrama de fases de NiTi. [17]

Por debajo de los 650°C no existe un conocimiento claro del diagrama de equilibrio, aunque se acepta de manera general que la zona de estabilidad de la fase matriz es sumamente estrecha (entre 50.0 y 50.5 % at. Ni). Observando la Fig. 18 del diagrama de fases en equilibrio se pueden conocer datos como el punto de fusión del NiTi equiatómico o que el compuesto Ti₂Ni se puede formar por una reacción peritética y el TiNi₃ por una eutéctica.

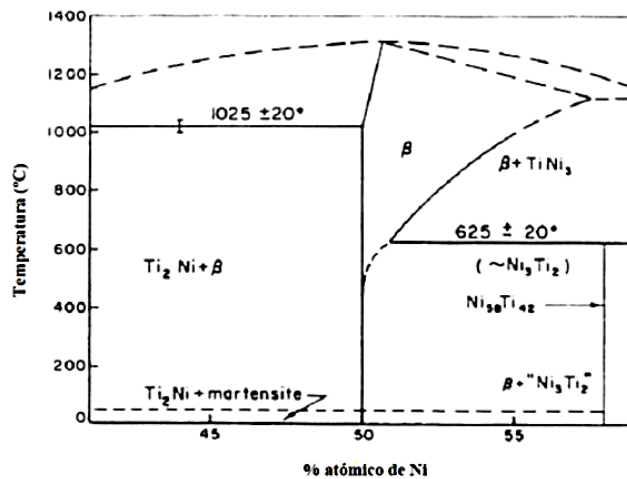


Fig. 18 Diagrama de fases de NiTi en la composición equiatómica [18].

También es fácil distinguir las fases de equilibrio que acompañarán al NiTi (la única que sufre la transformación martensítica) cuando las composiciones sean ricas en Ni o en Ti, pero no muy lejanas de la aleación equiatómica. Sin embargo, el diagrama no resulta suficiente para explicar de una manera detallada la secuencia de la aparición de estas fases adicionales en la matriz cuando se enfría lentamente desde una temperatura alta. [18].

La memoria de forma única y las propiedades superelásticas de nitinol resultan de transformaciones de fase de estado sólido reversibles que ocurren cuando el material está sujeto a estímulos externos, como un cambio en la temperatura o el esfuerzo aplicado. Una transformación de fase inducida por un cambio en la temperatura es el mecanismo responsable de la propiedad de memoria de forma, mientras que la transformación inducida por el esfuerzo es el mecanismo responsable de la propiedad superelástica. [19].

En la Fig. 19 se muestra un esquema de las estructuras cristalinas de martensita y austenita maclados para una AMF y la transformación entre ellas; el maclado también llamado gemelación ocurre cuando una agrupación de dos o más cristales idénticos o gemelos se encuentran orientados simétricamente con respecto a un eje o a un plano. Hay cuatro temperaturas características asociadas con la transformación de fase. Durante la transformación directa, la austenita, bajo carga cero, comienza a transformarse en martensita a la temperatura de inicio martensítica (M_i) y completa la transformación a martensita a la temperatura de acabado martensítica (M_f). En esta etapa, la transformación está completa y el material está completamente en la fase martensítica. De manera similar, durante el calentamiento, la transformación inversa se inicia a la temperatura de inicio austenítica (A_i) y la transformación se completa a la temperatura de terminación austenítica (A_f). [15].

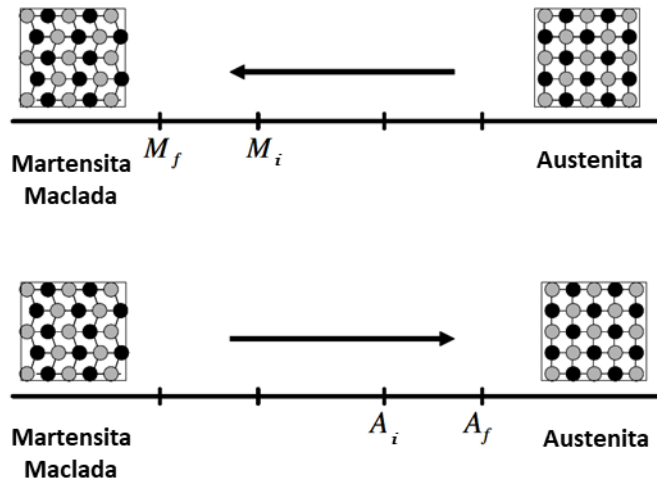


Fig. 19 Transformación de fase por temperatura sin carga mecánica [15].

Si se aplica una carga mecánica al material en la fase martensítica (a baja temperatura), es posible detectar la reorientación de la martensita (ver Fig. 20). El proceso produce un cambio de forma macroscópico, donde la configuración deformada se retiene cuando se libera la carga.

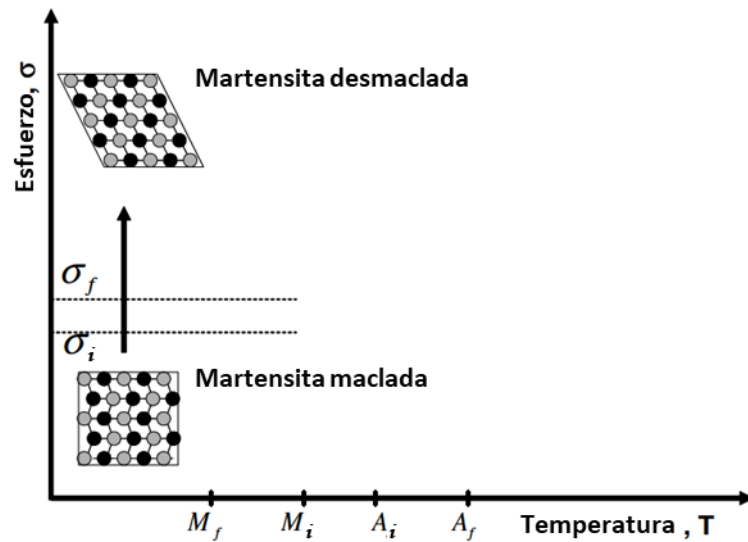


Fig. 20 Esquema del efecto de memoria de forma de una AMF que muestra el desmaclado del material con una tensión aplicada [15].

Un calentamiento posterior de la AMF a una temperatura superior a A_f resultará en una transformación de fase inversa (de martensita a austenita) y llevará a una recuperación completa de la forma (ver Fig. 21). El enfriamiento de nuevo a una temperatura inferior a M_f (transformación hacia adelante) conduce a la formación de martensita nuevamente sin que se observe un cambio de forma asociado. El proceso descrito anteriormente se conoce como el efecto de memoria de forma (SME por sus siglas en inglés *Shape Memory Effect*). [15].

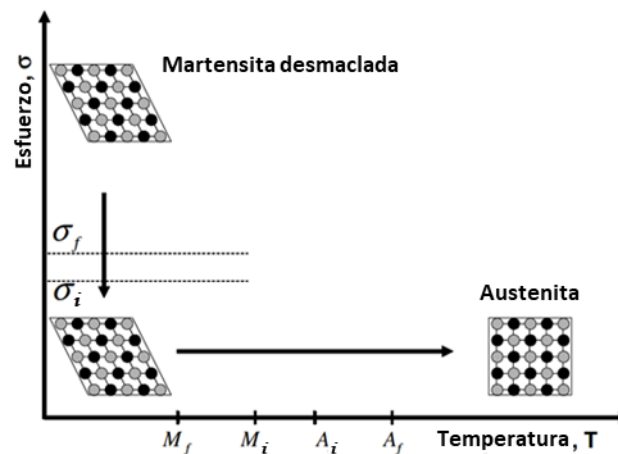


Fig. 21 Esquema del efecto de memoria de forma que muestra la descarga y el subsiguiente calentamiento a austenita en condiciones sin carga [15].

La naturaleza del SME se puede entender mejor siguiendo la trayectoria de carga termo mecánica en un espacio combinado de esfuerzo-deformación-temperatura como se muestra en la Fig. 22 donde representa datos experimentales para una muestra típica de NiTi probada bajo carga uniaxial. El esfuerzo σ es el esfuerzo uniaxial en la muestra debido a una carga aplicada. La deformación correspondiente ϵ es el cambio en la longitud de la muestra a lo largo de la dirección de la carga aplicada, normalizada por la longitud original. Comenzando desde la fase principal (punto A en la Fig. 22), el enfriamiento sin esfuerzo de la austenita por debajo de las temperaturas de transformación hacia adelante (M_i y M_f) da como resultado la formación de martensita (punto B). Cuando la martensita se somete a un esfuerzo aplicado que excede el nivel de esfuerzo inicial (σ_i), se inicia el proceso de

reorientación, lo que resulta en el crecimiento de ciertas variantes martensíticas orientadas favorablemente que crecen a expensas de otras variantes menos favorables. El nivel de esfuerzo para la reorientación de las variantes es mucho más bajo que el esfuerzo de rendimiento plástico permanente de martensita. El proceso desgemplación o desmaclado se completa a un nivel de esfuerzo σ_f , que se caracteriza por el final de la meseta en el diagrama $\sigma - \epsilon$ en la Fig. 22. [15]. Luego, el material se descarga elásticamente de C a D y se retiene el estado martensítico sin ayuda. Al calentarse en ausencia de tensión, la transformación inversa se inicia a medida que la temperatura alcanza A_i , (en E) y se completa a la temperatura A_f (punto F), por encima de la cual solo existe la fase austenítica principal. En ausencia de un esfuerzo plástico permanente generada durante el desmaclado, se recupera la forma original de la AMF (indicada por A).

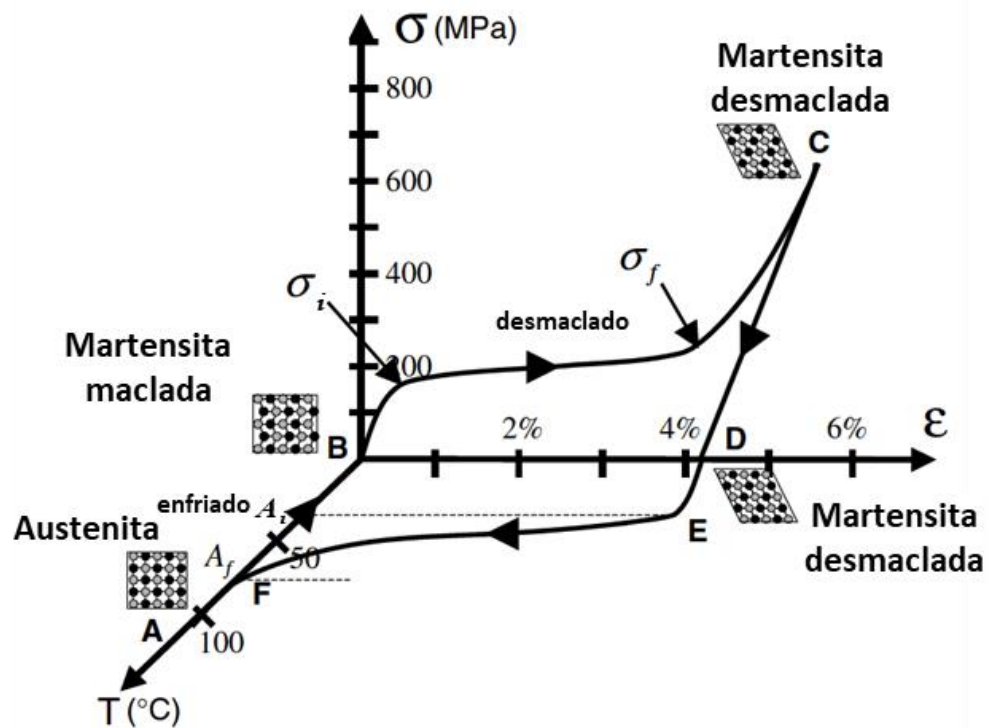


Fig. 22 Datos de esfuerzo-deformación-temperatura que muestran el efecto de memoria de forma para una AMF de NiTi típico [15].

La tabla III muestra las propiedades de las aleaciones binarias de memoria de forma de NiTi [17].

Tabla III Propiedades del nitinol [17].

PROPIEDAD	VALOR DE LA PROPIEDAD
Temperatura de Fusión, °C (°F)	1300 (2370)
Densidad, g/cm ³ (lb/in ³)	6.45 (0.233)
Resistividad, μΩ·cm	
Austenita	~100
Martensita	~70
Conductividad Térmica, W/m·°C (Btu/ft·h·°F)	
Austenita	18 (10)
Martensita	8.5 (4.9)
Resistencia a la Corrosión	Similar a serie 300 acero inoxidable o aleaciones de Titanio
Módulo de Young, GPa (10⁶ psi)	
Austenita	~83 (~12)
Martensita	~28-41 (~4-6)
Límite de elasticidad, MPa (ksi)	
Austenita	195-690 (28-100)
Martensita	70-140 (10-20)
Resistencia a la tracción, MPa (ksi)	895 (130)
Temperaturas de Transformación, °C (°F)	-200 a 110 (-325 a 230)
Histéresis, Δ°C (Δ°F)	~30 (~55)
Calor latente de transformación, kJ/kg·atom (cal/g·atom)	167 (40)
Tensión de memoria de forma o porcentaje de deformación	8.5% de la máxima

El efecto memoria de forma (SME) se puede dar de dos maneras; el efecto memoria de forma simple y el de doble camino. En el simple el material se deforma mediante un esfuerzo aplicado (aparentemente de manera plástica) y recupera posteriormente su forma original mediante un simple calentamiento. En la Fig. 23 se explica este efecto de manera esquemática para un cristal de austenita. [14].

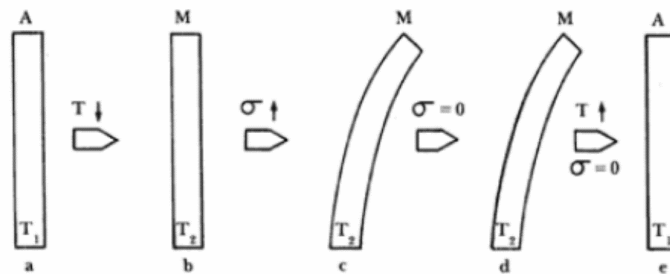


Fig. 23 Diagrama ejemplificando el efecto de la memoria de forma simple [14].

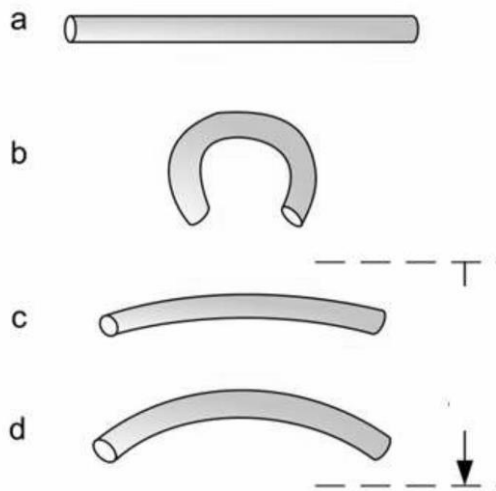


Fig. 24 Memoria de doble camino [13].

El fenómeno de la memoria de forma de doble camino se define como un cambio espontáneo de forma de un componente tanto al calentar como al enfriar (ver Fig. 24). No es un fenómeno intrínseco de estos materiales. Al contrario que el fenómeno de memoria de forma de un camino, el material debe ser sometido a tratamientos termo mecánicos llamados "entrenamientos". [13].

Las rutinas de entrenamiento empleadas para la memoria de forma de doble camino se describen a continuación.

El **método I** corresponde al desarrollado por sobredeformación de la fase martensítica. Los pasos a seguir en esta rutina son: enfriamiento del material por debajo de M_f , a continuación se deforma severamente excediendo el límite de completa recuperación y finalmente calentar por encima de A_f . Al volver a calentar hasta la fase austenítica, la aleación no recuperará completamente la forma original, debido a la excesiva deformación aplicada, lo que generará una deformación permanente acumulada.

El **método II** corresponde al entrenamiento por aplicación de ciclo térmico en martensita deformada y forzada. En este caso, los pasos a seguir son: se enfría la muestra por debajo de M_f , se deforma para obtener martensita inducida por tensión,

posteriormente se ancla la muestra en esa posición deformada y, por último, se calienta por encima de A_f .

El entrenamiento bajo tensión constante corresponde al **método III**. En este caso, el material es sometido a una tensión constante en la fase austenítica con objeto de obtener una cierta cantidad de martensita inducida por tensión. Manteniendo esa tensión, el entrenamiento consiste en enfriar por debajo de M_f y calentar por encima de A_f un número determinado de ciclos. [13]

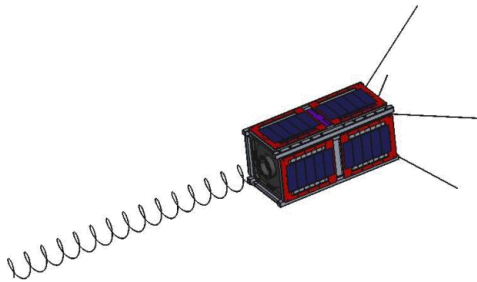


Fig. 25 Nanosatélite tipo Cubesat (entre 1 y 3 kg.) con antena de nitinol [20].

Los materiales con memoria de forma se usan para ortodoncia (aparatos ortopédicos, cables, etc.) y anteojos. La fabricación de estas aleaciones, son principalmente útiles en actuadores, se utiliza en muchos dispositivos mecánicos diferentes, una de las aplicaciones más recientes es como antena en satélites debido a sus propiedades de memoria de forma (Fig. 25). [20]

2.2.2 Métodos de análisis a utilizar.

2.2.2.1 Pruebas mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales sólidos usados en los diseños de ingeniería se determinan mediante pruebas destructivas, en muestras estandarizadas del material; esto quiere decir que las muestras se someten a la acción de un tipo de fuerza hasta que se fracturan y esto da lugar al término “propiedad mecánica”, que son las propiedades más importantes cuando se seleccionan los materiales en diseños, donde la función principal de las piezas es soportar fuerza.

Hay pruebas estándares de diversos tipos, en donde se le puede aplicar a la muestra una fuerza de tensión, compresión, torsión, flexión, etcétera. Los resultados de estas pruebas son una ayuda para que los diseñadores puedan determinar el uso apropiado de los materiales. [21] Los estándares internacionales usados para llevar a cabo las pruebas, especifican las características de las muestras y las condiciones de ejecución de cada prueba, a fin de que los resultados obtenidos sean válidos. [21] Las propiedades de los materiales, se tienen que determinar, entre otras razones, para:

- ✓ Determinar las características de nuevos materiales antes de que se puedan usar en forma confiable en los diseños.
- ✓ Asegurar y controlar la calidad de las materias primas y los productos que se obtienen de ellos, para que cumplan con los requerimientos especificados por los clientes.
- ✓ Comparar resultados obtenidos en diferentes partes del mundo.

- **Ensayo de microdureza**

Al aplicar un ensayo de dureza permite evaluar las propiedades de un material, tales como su fuerza, ductilidad y resistencia al desgaste. También ayuda a determinar si un material o el tratamiento de un material son adecuados para el propósito deseado.

El ensayo de dureza se define como "una evaluación que permite determinar la resistencia de un material a la deformación permanente mediante la penetración de otro material más duro". No obstante, la dureza no es una propiedad fundamental de un material. Sin embargo, cuando se extraen conclusiones de un ensayo de dureza, siempre se debe evaluar el valor cuantitativo en relación con:

- ✓ La carga aplicada en el penetrador
- ✓ Un perfil de tiempo de carga específico y una duración de carga específica
- ✓ Una geometría de penetrador específica

Por lo general, un ensayo de dureza consiste en presionar un objeto (penetrador) con unas medidas y una carga concretos sobre la superficie del material a evaluar. La dureza se determina al medir la profundidad de penetración del penetrador o bien midiendo el tamaño de la impresión dejada por el penetrador. [22]

- ✓ Los ensayos de dureza que miden la profundidad de penetración de dicho objeto son: Rockwell, ensayo de penetración instrumentado, y Brinell, dureza de penetración de bola.
- ✓ Los ensayos de dureza que miden el tamaño de la impresión dejada por el penetrador son: Vickers, Knoop y Brinell.

El ensayo de dureza Vickers es un método versátil, utilizado para macro y microensayos de dureza. Abarca un amplio intervalo de carga, y es idóneo para múltiples aplicaciones y materiales. Se considera más sencillo de utilizar que otros ensayos de dureza. El proceso se puede realizar en un ensayo de microdureza o dureza universal; los cálculos requeridos son independientes del tamaño del penetrador, y el mismo penetrador (de diamante piramidal) se puede utilizar en todos los materiales, sin importar su dureza. La dureza Vickers (HV) se calcula midiendo las longitudes diagonales causadas por una penetración realizada al introducir un penetrador piramidal de diamante con una carga concreta en un material de muestra (Ver Fig. 26). El tamaño de las diagonales de la penetración se lee ópticamente a fin de determinar la dureza usando una tabla o fórmula. [23]

El durómetro que se utilizará es el *Wilson Hardness Tukon 1102* (ver Fig. 27), ofrece una solución versátil además de facilidad de uso para una amplia gama de prueba de escala de microdureza. El *Tukon 1102 Tester* está equipado con una torreta de tres posiciones que incluye una posición de entrada, así como un objetivo de 10x y 50x. [24].

Para detalles y características del durómetro a utilizar así como las fórmulas para el cálculo de la microdureza ver la sección 7.6 de anexos.

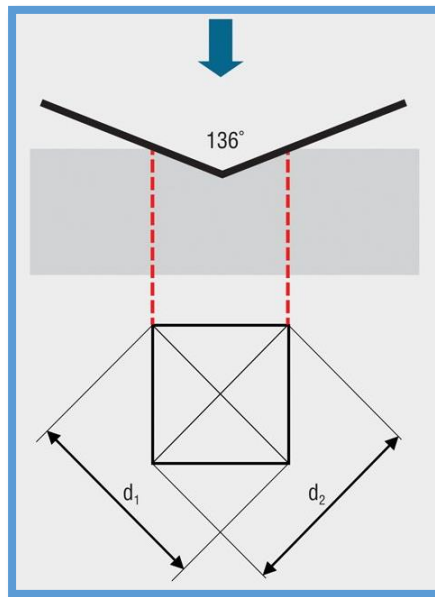


Fig. 26 Distancia de la muesca de la indentación [23].



Fig. 27 Durómetro Wilson hardness Tukon 1102.

▪ Ensayo de tensión.

Una prueba de tracción, también conocida como prueba de tensión, es probablemente el tipo más fundamental de prueba mecánica que puede realizar en el material. Las pruebas de tracción son simples, relativamente económicas y están completamente estandarizadas. Al jalar algo, se determina muy rápidamente cómo reaccionará el material a las fuerzas que se aplican en tensión. [25].

Es una prueba de ingeniería y ciencia de materiales fundamental en la que una muestra se somete a una tensión controlada hasta que falla. Las propiedades que se miden directamente a través de un ensayo de tracción son la resistencia a la tracción, la resistencia a la rotura, el alargamiento máximo y la reducción del área. A partir de estas mediciones, también se pueden determinar las siguientes propiedades: el módulo de *Young*, la relación de *Poisson*, el límite elástico y las características de endurecimiento por deformación. [26].

La máquina de prueba más común utilizada en la prueba de tracción es la máquina de prueba universal. La máquina debe tener las capacidades adecuadas para la

muestra de prueba que se está probando. Hay cuatro parámetros principales: capacidad de fuerza, velocidad, precisión y exactitud. La capacidad de fuerza se refiere al hecho de que la máquina debe ser capaz de generar suficiente fuerza para fracturar la muestra. La máquina debe ser capaz de aplicar la fuerza lo suficientemente rápido o lentamente para imitar correctamente la aplicación real. Finalmente, la máquina debe ser capaz de medir con precisión la longitud del calibre y las fuerzas aplicadas. [26].

La alineación de la muestra de prueba en la máquina de prueba es crítica, ya que, si la muestra está desalineada, ya sea en ángulo o desplazada hacia un lado, la máquina ejercerá una fuerza de flexión sobre la muestra. [27]

El proceso consiste en colocar la muestra de prueba en la máquina y extenderla lentamente hasta que se fracture. Durante este proceso, el alargamiento de la sección del medidor se registra contra la fuerza aplicada. Los datos se manipulan para que no sean específicos de la geometría de la muestra de prueba. La medida de alargamiento se utiliza para calcular la deformación de ingeniería ε utilizando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Donde ΔL es el cambio en la longitud, L_0 es la longitud inicial y L es la longitud final. La medida de fuerza se usa para calcular el esfuerzo de ingeniería σ utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F_n}{A}$$

Donde F es la fuerza de tracción y A es la sección transversal nominal de la muestra. La máquina realiza estos cálculos a medida que aumenta la fuerza, de modo que los puntos de datos pueden graficarse en una curva de tensión-deformación. [26].

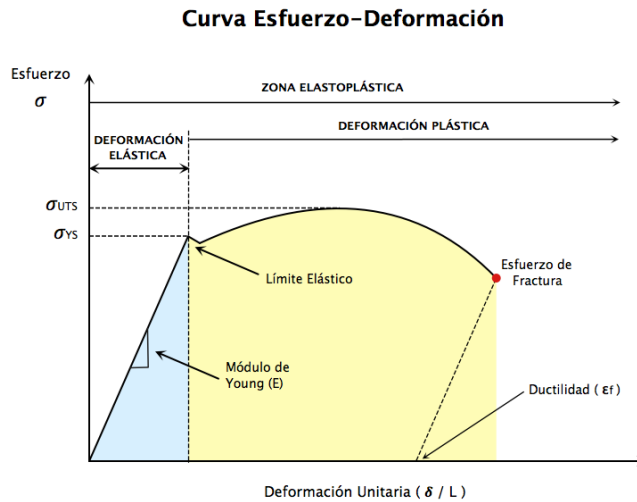


Fig. 28 Curva esfuerzo-deformación identificando cada sección. [28].

En la Fig. 28 se observa un diagrama típico de una curva de esfuerzo vs deformación de un material metálico. Para la mayoría de las pruebas de tracción de materiales en la parte inicial de la prueba la relación entre la fuerza aplicada o la carga y el alargamiento que se observa en la muestra es lineal. En esta región lineal, la línea obedece a la relación definida como "Ley de Hooke", donde la proporción de esfuerzo a deformación es una constante, o ley de Hooke. E es la pendiente de la línea en esta región donde el esfuerzo (σ) es proporcional a la deformación (ϵ) y se denomina "Módulo de elasticidad" o "Módulo de Young" [25]. En la gráfica de la Fig. 28 también se aprecia una zona de deformación elástica (zona azul) en donde se puede conocer la resiliencia que es la energía de deformación (por unidad de volumen) que puede ser recuperada de un cuerpo deformado cuando cesa el esfuerzo que causa la deformación y se calcula al obtener el área bajo la curva de la zona elástica de la siguiente manera $U_r = (\sigma_{YS} \times \delta_{YS})/2$. Pasando la zona elástica se encuentra la zona plástica (zona amarilla) de donde se obtiene la tenacidad que consiste en la capacidad de deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su intervalo elástico, es decir, por encima de su límite elástico y se calcula obteniendo el área bajo la curva de la zona de deformación plástica o $(\sigma_{UTS} \times \delta_{YS}) - 2U_r$ donde U_r es la resiliencia. Al área bajo toda la curva de σ vs ϵ se le conoce como plasticidad.

En la Fig. 29 se observa un diagrama de esfuerzo-deformación típico de un material de memoria de forma, en donde se aprecia que existe una “meseta” característica de la zona elástica. Esto debido a que estos materiales pueden deformarse hasta un 10% sin llegar a su zona plástica, a diferencia de la gran mayoría de los metales, que comienzan a deformarse plásticamente a partir de un 0.2% de elongación cuando son sometidos a un ensayo de tensión.

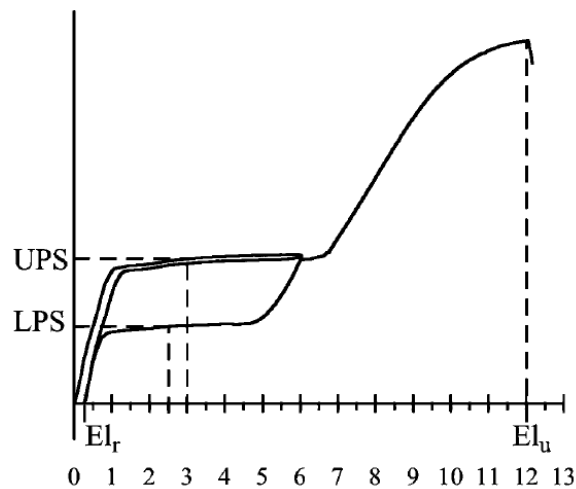


Fig. 29 Diagrama de esfuerzo-deformación típico del nitinol [29].

La máquina universal que se utilizará es la *Shimadzu AG-IC-100 KN* mostrada en la Fig. 30, para más información y características ver sección de anexos 7.7.

El procedimiento se sigue bajo la norma de la ASTM F2516 para pruebas de tensión de níquel titanio con los pasos que se detallan a continuación: [29].

1. A menos que se especifique lo contrario, la temperatura del ensayo será a 22 °C. La tolerancia será de 2 °C.
2. La velocidad del ensayo será de 0.01 mm/min en el primer ciclo cuando la carga este al 6% y se continuará con 0.1 mm/min durante el segundo ciclo hasta la ruptura, acorde a la tabla del anexo 7.7 de la norma ASTM F2516.
3. Colocar la muestra entre las mordazas verificando que esté bien aseguradas para evitar malas mediciones.
4. Asignar la carga inicial que se le aplicará.

5. Iniciar el ensayo.
6. Esperar a que el material llegue a la ruptura para obtener el esfuerzo último.
7. Guardar datos recibidos para generar el diagrama esfuerzo-deformación como el mostrado en la Fig. 29.



Fig. 30 Shimadzu AG-IC-10 KN [30].

2.2.2.2 Análisis morfológico

Este análisis se realizará en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB o SEM, por *Scanning Electron Microscope*). Es una técnica de microscopía electrónica capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen como la mostrada en la Fig. 31.

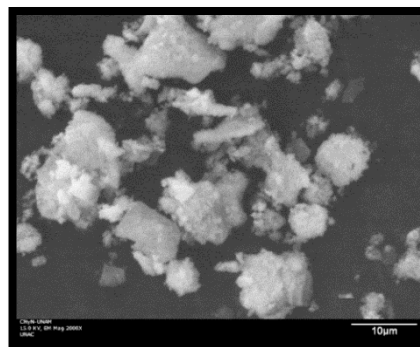


Fig. 31 Ejemplo de imagen en MEB [31].

El MEB permite analizar lo siguiente:

- ✓ Topografía: Características de la superficie.
- ✓ Morfología: Forma y tamaño de las partículas.
- ✓ Composición: Cantidad relativa de las partículas

El microscopio que se utilizará es el JEOL JIB-4500 *MultiBeam* SEM-FIB, expuesto en la Fig. 32, el cual tiene la capacidad de monitoreo y fresado en tiempo real. Ofrece un alto rendimiento y una mayor productividad con funciones de visualización, análisis y micromolienda simultáneas para una variedad de aplicaciones [31].

Para ver más detalles en cuanto al funcionamiento ver anexo 7.3.



Fig. 32 Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JIB-4500 [31].

CAPITULO 3.

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

El alambre de nitinol no presentará cambios en sus propiedades mecánicas al ser sometido a cambios cíclicos de temperatura, simulando la radiación térmica solar, en ambientes de bajas presiones.

3.2 Objetivos generales

Crear un sistema que permita probar equipo satelital en condiciones espaciales tales como bajas presiones y ciclos simulados de radiación térmica solar de forma cualitativa.

Estudiar los cambios en las propiedades mecánicas del nitinol al someterlo a las condiciones espaciales generadas en el sistema antes mencionado.

3.3 Objetivos específicos

Analizar por EDS (Espectrometría de dispersión de energía de rayos X) el nitinol para corroborar su estequiometría.

Estimular al nitinol para que adquiriera una forma predeterminada y analizar si sufre daños macroscópicos a raíz de la fatiga mecánica aplicada.

Aplicar eficientemente los cambios cíclicos de temperatura a bajas presiones al Nitinol con el fin de probar el sistema fabricado.

Preparar muestras a base de resina, lijar y pulir hasta obtener un acabado espejo.

Realizar microdureza para comparar si las muestras sufrieron cambios.

Realizar ensayos de tensión para medir propiedades mecánicas del nitinol.

Analizar en MEB para observar cambios morfológicos a raíz de las deformaciones.

CAPITULO 4.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÁMARA DE VACÍO

4.1 Ensamble general

El diseño preliminar se realizó con el software de dibujo asistido por computadora llamado SolidWorks en donde se ensamblaron cada uno de sus componentes ya sea para el vacío como para los cambios de temperatura en su posición ideal para el mejor manejo de los materiales a analizar dentro. En la Fig. 33 y 34 se muestran parte de los componentes que se utilizaron para sellar la cámara y realizar el vacío requerido.

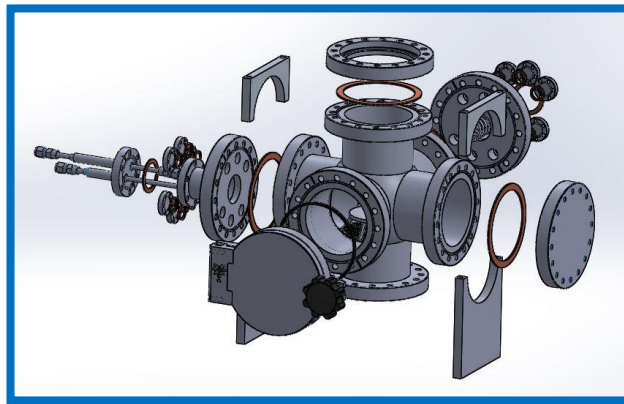


Fig. 33 Vista expandida de la cámara en general mostrando los diferentes tamaños de bridas, los sellos de cobre, compuerta de entrada y soportes.

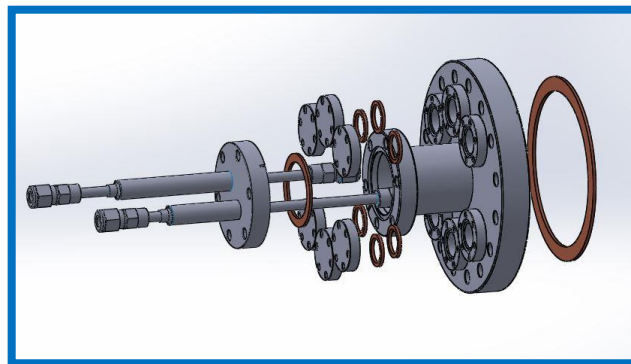


Fig. 34 Vista de la brida de 6 in con las líneas de entrada y salida del nitrógeno para el enfriador, además de los sellos y bridas de 2 ¾ y 1 1/3 in.

En la Fig. 35 se aprecia el sistema de la cámara de vacío unida a la bomba turbomolecular la cual permite llegar a las presiones deseadas. En la Fig. 36 se observa los sistemas térmicos que permitirán llegar a las temperaturas esperadas gracias al serpentín y la bombilla.

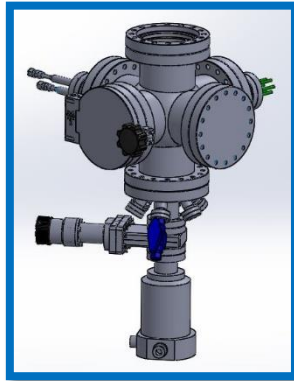


Fig. 35 Ensamble de bridas, válvulas y bomba turbomolecular.



Fig. 36 Base de análisis de muestras con serpentín y bombilla de halógeno.

Las Fig. 37 y 38 muestran el ensamble general del sistema de simulación espacial con cada uno de los componentes y equipos utilizados.

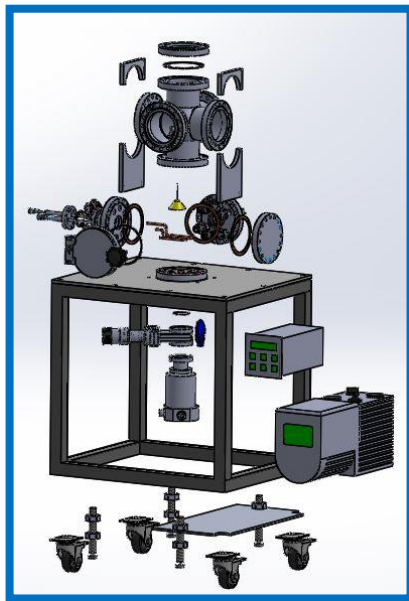


Fig. 37 Vista expandida de la cámara y la base donde se encuentra la mayor parte del equipo y los componentes.

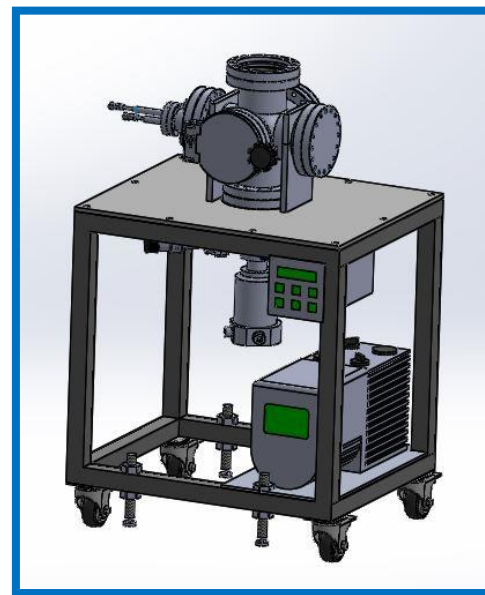


Fig. 38 Ensamble general mostrando cada una de las posiciones de los componentes que conforman el equipo.

Para más información relacionada el material y componentes de la fabricación de las bases y cámara ver anexo 7.2

4.2 Tipos de bombas

Las bombas que se utilizaron para lograr el vacío esperado son una mecánica y una turbomolecular conectadas en serie con las siguientes características.

4.2.1 Bomba mecánica

La bomba Edwards E2M2 (se muestran en la Fig. 39) es de accionamiento directo, está sellada con aceite y diseñada para un funcionamiento confiable a largo plazo en ambos ambientes tanto de laboratorio como de industria. Las bombas son unidades independientes.

Los motores están totalmente cerrados y refrigerados por el ventilador de refrigeración del motor que dirige el aire a las aletas del motor.

Los motores *monofásicos* tienen un dispositivo de sobrecarga térmica de reinicio automático o manual.

Un sistema de presión de aceite lubrica las superficies de apoyo del eje de la bomba y las caras de sellado del rotor, por lo que los niveles de aceite deben ser los adecuados para su correcto funcionamiento como se observa en la Fig. 40. [32]

Para ver el procedimiento de encendido y apagado ver anexo 7.4

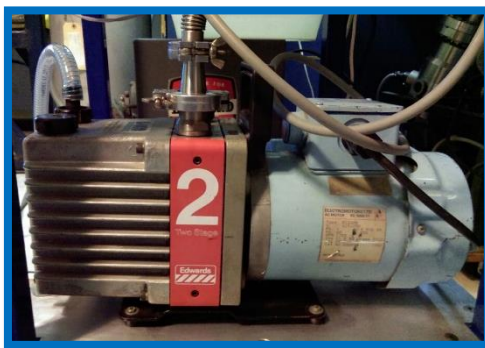


Fig. 39 Bomba mecánica de la marca Edwards modelo E2M2.



Fig. 40 Indicador del nivel de aceite requerido para su funcionamiento.

4.2.2 Bomba turbomolecular

La bomba utilizada es de la marca Alcatel modelo ATP 100 (ver Fig. 41) y su controlador electrónico modelo ACT 200 T (ver Fig. 42). Sus principales características se muestran en la tabla IV.

Tabla IV Características bomba turbomolecular.

Velocidad de rotación	27,000 rpm
Velocidad reducida	desde 6,000 rpm
Tiempo de inicio (0 a 27 000)	1 min 45 s
Presión límite medida	3.75×10^{-9} Torr

Durante el funcionamiento las moléculas de gas del sistema de vacío llegan a la entrada de la bomba, quedan atrapados entre los discos giratorios del rotor y los discos estacionarios del estator y transportados al escape de la bomba. En el escape de la bomba, los gases son evacuados a la atmósfera por una bomba primaria. [33]. Para ver el procedimiento de encendido y apagado ver anexo 7.4



Fig. 41 Bomba turbomolecular Alcatel ATP 100. Fig. 42 Electrónica de bomba turbomolecular modelo ATC 200T.

Para el sistema completo de vacío se requiere que ambas bombas, tanto la mecánica como la turbomolecular, se encuentren en serie esto debido a que a la segunda no le es posible trabajar a presiones ambientes y requiere de una primaria para extraer los gases que captura del interior de la cámara. Un diagrama que representa bien este proceso se observa en la Fig. 43.

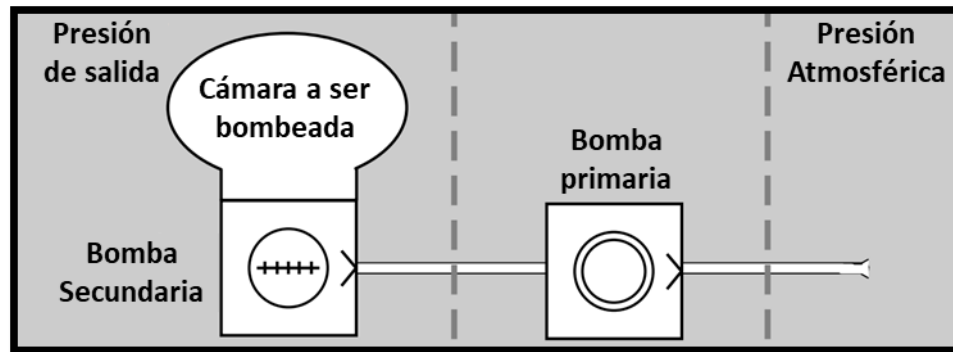


Fig. 43 Diagrama en serie: bomba mecánica (bomba primaria) y turbomolecular (bomba secundaria) [33].

4.3 Tipos de medidores de presión

4.3.1 HPS series 947

Es un manómetro de pérdida de calor que calcula la presión de un gas midiendo la pérdida térmica de un cable calentado.

Un cable caliente suspendido de soportes en un vacío parcial pierde energía térmica de tres maneras:

- Transporte de gas, que depende de la presión.
- Pérdida final de los soportes.
- Radiación a las superficies circundantes.

Un sensor de Pirani mejorado por convección puede funcionar a corriente constante, voltaje o resistencia (equivalente a la temperatura) en el filamento del sensor. Este sensor funciona a temperatura constante para aumentar la sensibilidad de alta presión. En la Fig. 45 se observa el controlador utilizado de la marca MKS para altas presiones. El sensor solo se puede instalar horizontalmente (como se observa en la Fig. 44) para trabajar de manera efectiva en la región de *convección*. La convección es un proceso de transferencia de calor efectivo a presiones superiores a 200 Torr de nitrógeno. [34] El sensor está calibrado de fábrica con el puerto de vacío hacia abajo. En la atmósfera, la calibración puede cambiar hasta un 10% si el puerto está orientado de otra manera. En la tabla V se detallan algunas características de este medidor.

Tabla V Especificaciones significativas del medidor de presión.

Intervalo de medida	1.0×10^{-3} a $1.0 \times 10^{+3}$ Torr
Intervalo de temperatura de operación	5° a 40 °C (41° a 104 °F)
Orientación de instalación	Solo horizontal



Fig. 44 Medidor Pirani HPS serie 947 en posición horizontal.



Fig. 45 Controlador de la marca MKS del medidor de alta presión.

4.3.2 De ionización de cátodo frío (Penning):

Una vez alcanzada la presión mínima de medida del Pirani 1.0×10^{-3} Torr se utiliza este medidor FRG-700/702 de *Agilent Technologies* para poder obtener medidas inferiores requeridas (ver Fig. 46). Este dispositivo se instaló a la cámara por medio de una brida de $2 \frac{3}{4}$ in con su respectivo sello de cobre. [35]

El controlador electrónico que se usó es el modelo AGD-100 de *Agilent* (ver Fig. 47).



Fig. 46 Medidor de ionización de cátodo frío (Penning) [35].



Fig. 47 Controlador electrónico AGD-100 Agilent [35].

Una vez que a la cámara se le instalaron todos los sistemas y dispositivos se procedió a detectar fugas; se aplicó acetona en todas las uniones y cuando el indicador detectó un aumento de presión se apretaron tornillos, cambiaron sellos o bridas según haya sido el caso.

4.4 Sistemas térmicos

El calor será irradiado por un calentador simulando el emitido por el sol sobre el nitinol hasta alcanzar las temperaturas deseadas. El calentador será una bombilla de halógeno con el filamento de tungsteno cuyo espectro es muy parecido al solar como se observa en las gráficas de la Fig. 49. La bombilla que se utilizó fue una del tipo MR 16 de halógeno con filamento de tungsteno con una potencia de 100 W y 12 V mostrada en la Fig. 48 y con su debida fuente de alimentación modelo DS-304M visible en la Fig. 51. [36].

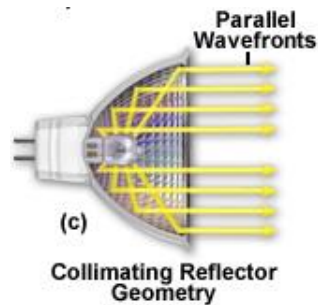


Fig. 48 Geometría de la bombilla MR16 de la lámpara de halógeno [36].

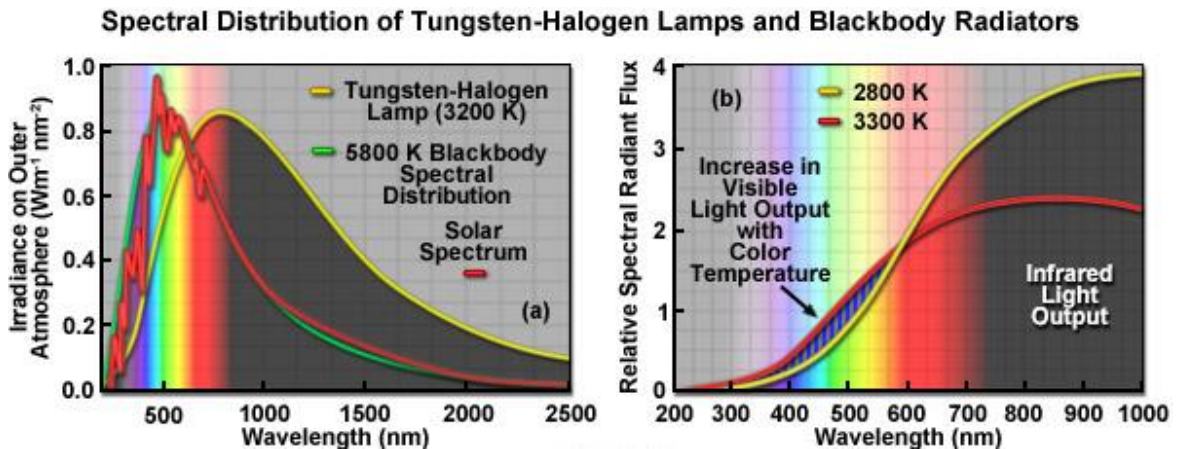


Fig. 49 Comparación de las distribuciones espectrales de las lámparas de halógeno con filamento de tungsteno [36].

Como enfriador se utilizó Nitrógeno líquido, el cual se hizo pasar por un serpentín ubicado debajo de la base donde las muestras se pondrán como se aprecia en la Fig. 50. Dicho serpentín está fabricado con líneas de ¼ in de cobre y extensiones

de acero inoxidable para facilitar la unión de la soldadura con la brida de 1 1/3 in así como se muestra en la Fig. 52 y 53.



Fig. 50 Bombilla MR16 colocada dentro de la cámara.



Fig. 51 Fuente de voltaje que alimenta la bombilla.

El sistema consiste en un pequeño recipiente externo aislado térmicamente el cual contendrá el nitrógeno donde circulará por el serpentín hasta llegar a la cámara y enfriará el portamuestras por convección logrando bajar la temperatura al alambre de nitinol tal como lo indican las Fig. 54 y 55. Se le aplicó espuma de poliuretano como aislante térmico alrededor de las paredes del depósito de nitrógeno líquido para evitar su evaporación, como se observa en la Fig. 56.

Para poder medir la temperatura dentro de la cámara se instaló un termopar tipo K, debido a que es uno de los que cubre el intervalo más amplio de medición que van desde -200 °C a 1260 °C. La aleación de 90% de níquel y 10% de cromo es el conductor positivo y la de 94% de níquel, 2% de Aluminio, 3% de manganeso y 1% de Silicio el conductor negativo. Se utilizan con mucha frecuencia en los hornos de tratamientos térmicos. Este termopar se instaló en contacto directo del portamuestras como se observa en la Fig. 53 [37].

Cuando todos los sistemas de la cámara estaban en funcionamiento se procedió a probar los sistemas térmicos mismos que arrojaron temperaturas máximas y mínimas medidas por el termopar tipo K como las que se observan en la Fig. 57.



Fig. 52 Serpentin de 1/4 in de cobre y extensiones de acero inoxidable.

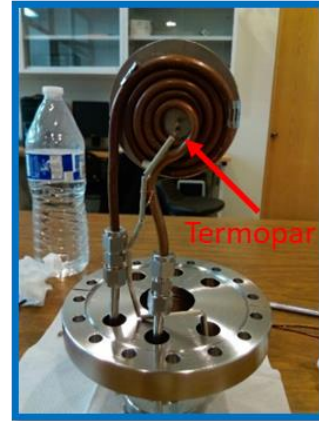


Fig. 53 Serpentin colocado en la brida junto con el termopar tipo K.



Fig. 54 Pruebas con nitrógeno líquido en el serpentin.



Fig. 55 Recipiente para el nitrógeno líquido instalado en la cámara.

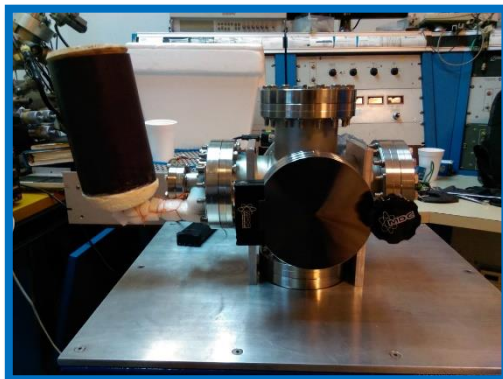


Fig. 56 Recipiente para el nitrógeno líquido aislado térmicamente.



Fig. 57 Temperatura máxima y mínima medida por el termopar en las pruebas.

En la Fig. 58 se muestra el ensamble final de la cámara, bombas y medidores que componen la primera etapa del proyecto de investigación que consistió en la elaboración de un dispositivo de simulación espacial que alcance tanto la presión como las temperaturas que se manifiestan a la altitud en donde los femtosatélites orbitan.

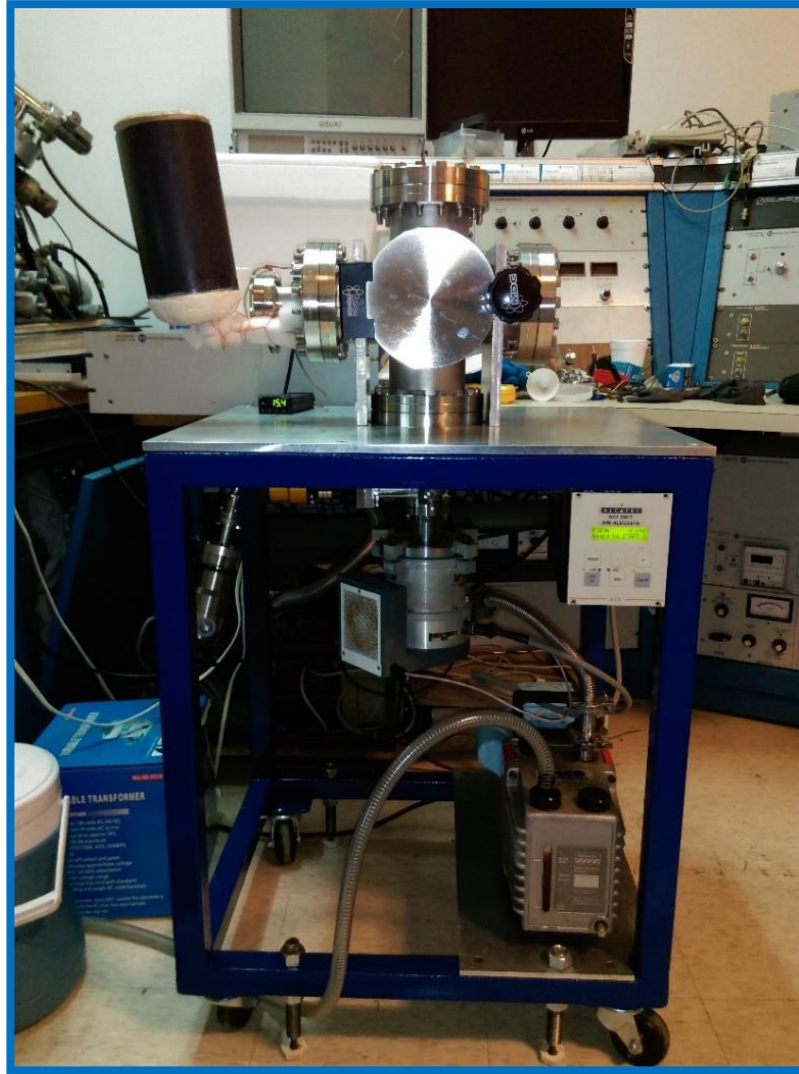


Fig. 58 Ensamble final de la cámara con todos sus componentes.

CAPITULO 5.

CICLOS SIMULADOS DE RADIACIÓN TÉRMICA SOLAR SOBRE EL NITINOL

5.1 Entrenamiento del nitinol

Para entrenar al material es necesario que estén definidas las temperaturas de transformación de la aleación con memoria de forma, para eso se siguió la norma de la ASTM F-2082. Ésta dice que para saber la temperatura cuando la austenita comienza se requiere un recipiente con agua fría donde se encuentre el nitinol e ir incrementando la temperatura y hasta que inicie el movimiento se tendrá A_i (*Inicio de Austenita*) y una vez terminado se captura A_f (*Final de Austenita*). Para encontrar M_i (*Inicio de Martensita*) y M_f (*Final de Martensita*) se realiza el mismo procedimiento pero a la inversa: en vez de calentar se enfría. En la Fig. 59 se observa cuál fue el procedimiento para obtener tales temperaturas [38].

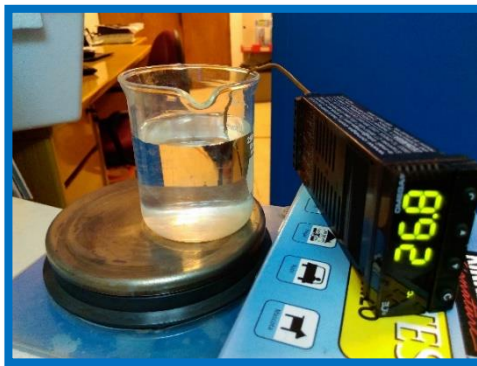


Fig. 59 Medición de las temperaturas de transición.

Las siguientes son las temperaturas de transición que se midieron siguiendo el procedimiento anterior.

$$M_i = 32 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Inicio de Martensita})$$

$$M_F = 22 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Final de Martensita})$$

$$A_i = 73 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Inicio de Austenita})$$

$$A_F = 83 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Final de Austenita})$$

El método de entrenamiento para la memoria de forma de doble camino que se eligió para el nitinol fue el de sobre-deformación de la fase martensítica; en donde se tenía que enfriar el material por debajo de M_F , después deformar excediendo el límite de completa recuperación y por último calentar por encima de A_F . Estos pasos se realizaron durante 10, 20, 30 y 40 ciclos. Se observó la morfología a través del MEB (Fig. 60) a un aumento de 1000x, en todas las muestras se apreciaron diferentes morfologías pero siguiendo un mismo patrón sin presentar cambios drásticos como fracturas, dislocaciones o grietas a excepción de la imagen D de 40 ciclos donde hay un relieve con más pliegues; al observar los resultados se decidió por someter todas las muestras a 40 ciclos de entrenamiento, ya que a mayores ciclos de entrenamientos el material adoptaba la forma con mayor eficiencia, logrando recuperarse hasta un 80% aproximadamente. Los entrenamientos se realizaron con agua a punto de ebullición y agua con hielo a 0 °C.

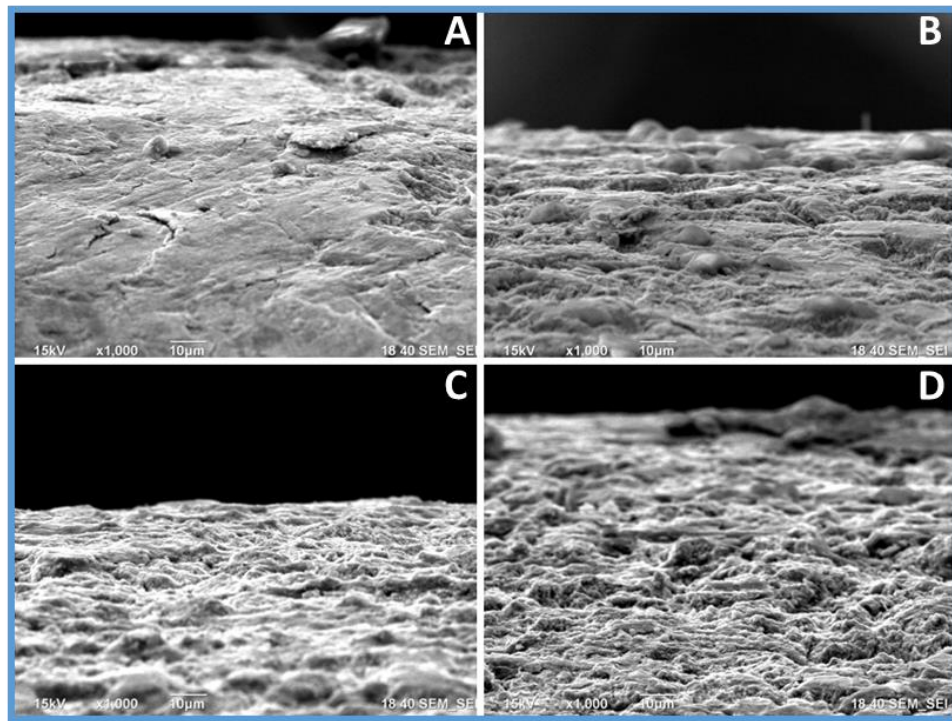


Fig. 60 Morfología observada en el MEB a 1000x para todas las muestras con el fin de comparar y observar posibles cambios no apreciados para los diferentes ciclos de entrenamientos llevados a cabo de la siguiente manera; A-10, B-20, C-30 y D-40 ciclos respectivamente.

5.2 Ciclos térmicos

Teniendo la cámara de vacío en funcionamiento se procedió a los cambios cíclicos. Se definieron 5 muestras, a cada una de ellas se le realizaron 0, 1, 25, 50 y 100 ciclos térmicos respectivamente bajo las siguientes características:

- Presión por debajo de 10×10^{-4} Torr.
- Un ciclo térmico consistió en 10 minutos a altas temperaturas y el mismo tiempo para bajas.
- Lograr un diferencial de temperaturas de al menos 80 °C.
- Cada ciclo debió superar las temperaturas de transición.

La tabla VI muestra los resultados en promedio de los 100 ciclos térmicos que se le aplicaron a las diferentes muestras. Los datos completos de cada uno de los ciclos se encuentran en el anexo 7.5.

Tabla VI Resultados de temperaturas y presiones mostrando los promedios en base a los 100 ciclos térmicos aplicados en la cámara de simulación espacial.

	Sol Promedio	Eclipse Promedio
Temp. (°C)	117.89	-26.64
Presión (Torr)	2.36E-05	6.87E-07

Durante la etapa nombrada como “Sol” se irradiaron las muestras con ayuda de la lámpara de halógeno, haciendo una simulación de la radiación térmica solar. De la misma manera en la etapa denominada “eclipse” se disminuyó la temperatura por medio de la circulación de nitrógeno líquido a través del serpentín, colocado debajo del portamuestras, creando una simulación de las condiciones de cuando la Tierra como planeta se encuentra entre el satélite y los rayos emitidos por el sol.

Tanto al serpentín como al portamuestras se le añadió pasta térmica gris de la marca *Lion chip* (ver Fig. 62) con un coeficiente de conductividad térmica: >1.9 W/MK y una resistencia térmica: >0.225 [39] lo que favoreció la transferencia de calor a las muestras de manera más efectiva. Éstas fueron sujetadas en el portamuestras como se observa en la Fig. 61.

En las Fig. 63 y 64 se muestran las simulaciones tanto de la radiación térmica solar como la etapa de eclipse. Al tener encendida la lámpara de halógeno el alambre de nitinol se expande presentándose la fase austenita. Con el nitrógeno líquido circulando por el serpentín; se tienen bajas temperaturas provocando que el alambre se contraiga y a su vez que el nitinol pase a la fase martensítica.



Fig. 61 Portamuestra con dos piezas de nitinol justado con alambre.

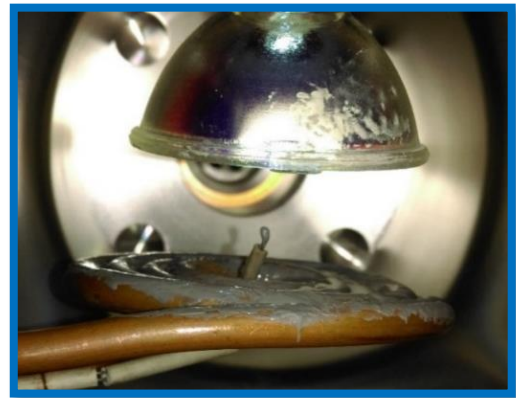


Fig. 62 Se colocó pasta térmica para favorecer la transferencia de calor.

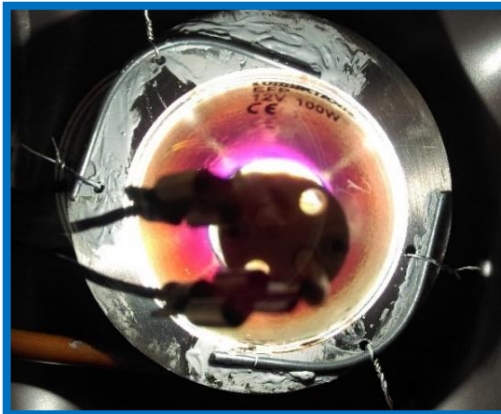


Fig. 63 Expansión de nitinol revelando la fase austenita al ser irradiado con la lámpara de halógeno.

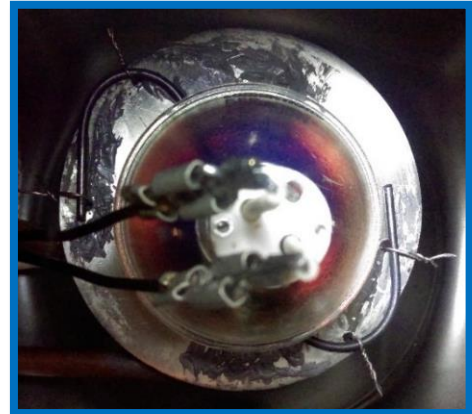


Fig. 64 Contracción de nitinol manifestándose la fase martensítica debido al nitrógeno líquido que circula por el serpentín.

5.3 Preparación de muestras

Después de aplicar los ciclos térmicos a las muestras se prepararon para analizarlas metalográficamente en el microscopio óptico y en el MEB. Se realizaron los procedimientos bajo la norma de la ASTM-E3-11 referente a la preparación de muestras para obtener resultados claros referentes a la microestructura del material. [40] A las muestras de nitinol se le hicieron cortes de aproximadamente 3 mm con ayuda de una cortadora de alta precisión de la marca ALLIED (Fig. 65) con un disco de diamante a 30 rpm utilizando un lubricante para proteger el alambre y la cortadora (Fig. 66).



Fig. 65 Cortadora de alta precisión ALLIED.



Fig. 66 Disco de diamante cortando el nitinol.

Cortados los segmentos se encapsularon para sujetarlos durante el lijado, realizando el siguiente procedimiento: se usaron moldes de plástico duro de 1 3/8 in de diámetro por 3/8 in de alto, se fijó con pegamento instantáneo de la marca Kola loka dos piezas en cada molde, uno de manera transversal y otro longitudinal al corte (Fig. 67), se utilizó jabón líquido como desmoldante, después se agregó resina poliéster previamente mezclada con 2% del volumen total de catalizador para su endurecimiento (Fig. 68).

Se desmoldó la resina y se procedió a lijar con ayuda del sistema de pulido de la marca Petropol (Fig. 69) aplicando agua destilada sobre la lija para metal, iniciando con lijas de grano medio a lija de grano fino siguiendo este orden: #400, #600, #1000, #1500 y #2000 como se aprecia en la Fig. 70. El agua destilada tiene por objeto refrigerar y barrer de la superficie las partículas del material de la muestra y del abrasivo.



Fig. 67 Segamentos del nitinol fijados en el molde.

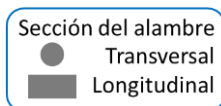


Fig. 68 Encapsulado del nitinol.

Posteriormente se realizó un pulido de 20 min a 150 rpm con pasta de diamante y alúmina de la marca Metadi de 0.3 y 0.1 μ de espesor de grano, con movimientos en forma de ocho para obtener un acabado espejo uniforme del metal. Al final se utilizó un limpiador ultrasónico Cole-Parmer diluyendo agua destilada con solución de limpieza alcalina concentrada Micro-90. Para revelar los posibles defectos y granos del metal se atacó químicamente con HF + Nital (HNO_3 + Alcohol) por 10 min y finalizando de nuevo con una limpieza ultrasónica. En la Fig. 71 se observa el acabado final de las muestras de nitinol.



Fig. 69 Sistema de pulido Petropol.



Fig. 70 Lijado y pulido de cada una de las muestras.

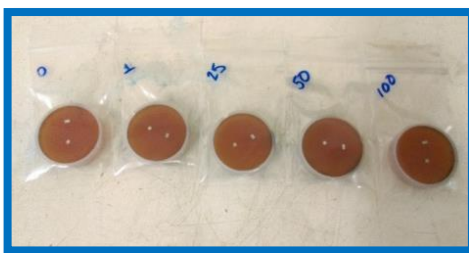


Fig. 71 Acabado espejo de las muestras de NiTi.

CAPITULO 6.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Comportamiento ante cambios cíclicos

La geometría del alambre de nitinol durante el entrenamiento tenía forma de herradura para observar fácilmente los cambios de fase; al cerrarse de los extremos debido al enfriamiento se obtuvo la fase martensita y al abrirse por el calentamiento se obtuvo la fase austenita. Al realizar el primer ciclo de entrenamiento, una vez deformado y posterior calentado, el alambre de nitinol no regresa a su forma inicial al 100% debido a que se excedió el límite elástico del material.

Debido a la geometría decidida en el entrenamiento del nitinol, se pudieron colocar dos muestras para realizar simultáneamente los ciclos térmicos. La muestra sometida a 100 ciclos siempre estuvo presente en la cámara, la de 50 ciclos se cambió por la de 25 y a su vez ésta última por la de un ciclo.

Conforme aumentaron los ciclos térmicos, se observó que el material es más eficiente, ya que al elevar la temperatura se expande más, de la misma manera al enfriarse se contrae llegando casi a tener la forma original. La muestra de 100 ciclos, después del ciclo 65, requirió menos tiempo de exposición a las diferentes temperaturas para poder lograr el cambio de forma, en contraste con la otra muestra que sólo tenía 15 ciclos.

La aplicación de la pasta térmica disminuyó el tiempo para alcanzar las temperaturas de transición de las fases martensita y austenita, pero la presión dentro de la cámara aumentó de 1×10^{-7} a 4×10^{-7} Torr.

Al momento de cambiar las muestras de nitinol, se pierde el vacío y la muestra se expone a la presión atmosférica. Esto ocasionó que durante los 2 a 3 ciclos iniciales las mediciones no se realizaron en condiciones similares de presión y temperatura.

Al comenzar los ciclos, la cámara se calentaba rápidamente y se enfriaba lento, debido a la temperatura provocada por la lámpara de halógeno. Éste proceso se fue equilibrando con la circulación del nitrógeno líquido a través del serpentín. A medida que los ciclos avanzaron fue menos el tiempo requerido para el enfriamiento.

6.2 Ensayo de microdureza

El ensayo fue realizado con un durómetro tipo Vickers de la compañía *Wilson Hardness* modelo *Tukon 1102* con una carga de 0.5 Kgf para todas las muestras. La Fig. 72 muestra el indentador colocado sobre la muestra. Las durezas obtenidas son en base a un promedio de 5 indentaciones realizadas a cada muestra como lo indica la norma de la ASTM E384 (ver procedimiento en la sección de anexos 7.6). En la Fig. 73 se observa la microindentación en forma de pirámide invertida producida por el durómetro.

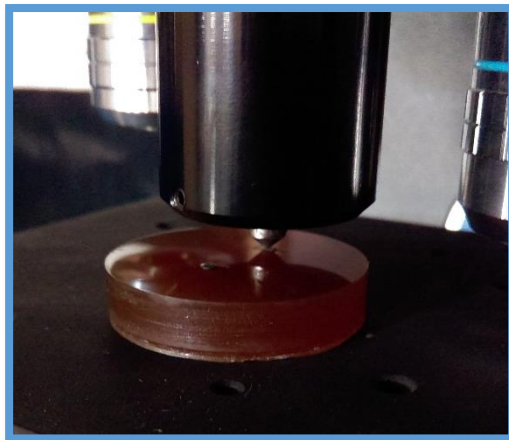


Fig. 72 Ensayo de microdureza sobre las muestras de nitinol.

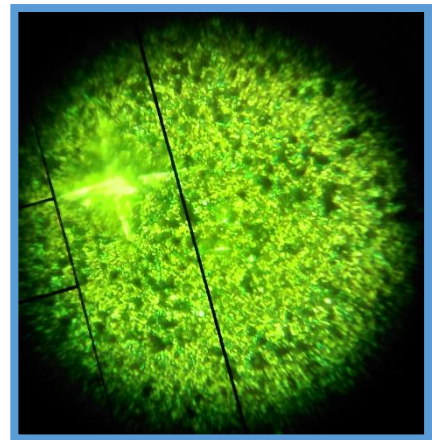
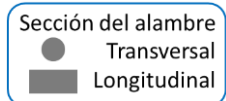


Fig. 73 Nano indentación tipo Vickers realizada a 500x.

Los resultados de los ensayos de dureza de las diferentes muestras se observan en la tabla VII. La dureza medida tiene unidades $HV_{0.5}$, en donde HV es la dureza Vickers (por sus siglas en inglés *Hardness Vickers*) y 0.5 por la carga aplicada. Al aumentar los ciclos térmicos, la dureza medida en la sección transversal del alambre tiende a disminuir. Por otra parte, las medidas de dureza realizadas en la sección longitudinal, muestran variaciones y no un comportamiento uniforme. Este

comportamiento se debe probablemente a inhomogeneidades derivadas del proceso de fabricación del alambre de nitinol, y al proceso de extrusión para obtener el diámetro deseado que genera cambios en su estructura y que se ven reflejados en variaciones en las medidas de durezas en la sección longitudinal y a su vez en valores más uniformes en la sección transversal.

Tabla VII Resultados de pruebas de microdureza (tanto las diagonales como la dureza son resultados de un promedio de 5 muestreos realizados).



Identificación de la muestra	Dureza Longitudinal (HV _{0.5})	Longitudes de las diagonales (µm)		Dureza Transversal (HV _{0.5})	Longitudes de las diagonales (µm)	
		D1	D2		D1	D2
100 ciclos	305.87	52.27	49.45	284.64	57.80	56.14
50 ciclos	350.27	51.17	51.85	300.20	55.87	55.29
25 ciclos	479.64	58.67	58.02	394.77	49.40	47.89
1 ciclo	469.26	43.67	45.19	390.60	47.19	48.78
0 ciclos	454.80	43.05	47.26	537.06	39.13	45.17

6.3 Ensayo de tensión

Para las pruebas se requirió la fabricación de un par de mordazas, con el fin de poder sujetar la muestra ya que las de la máquina universal son para probetas más grandes. Los planos correspondientes a su diseño se muestran en las imágenes A y B de la Fig. 74. Se utilizó acero inoxidable, tornillos 10-24 UNC tipo socket y una varilla roscada de 3/8 como se puede ver en la Fig. 75.

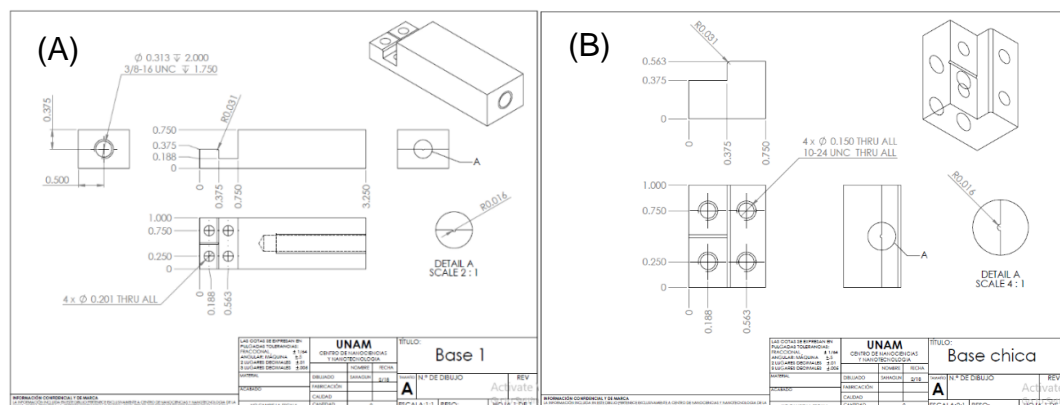


Fig. 74 Planos de la base (A) y de la base chica (B) de la mordaza.

Las pruebas de tensión se realizaron en la máquina universal de la marca y modelo *Shimadzu AG-IC-100 KN*. Para los ensayos se siguió la norma de la ASTM F2516-11 para materiales superelásticos de Níquel-Titanio donde se indica que la velocidad de tracción hasta la ruptura debe ser de 0.1 mm/min (ver tabla en la sección 7.8 de anexos) como se muestra en la Fig. 76, sin embargo, debido a la disponibilidad tanto de la máquina como del técnico encargado las pruebas se realizaron más rápido, es decir a 1 mm/min.



Fig. 75 Mordaza para sujeción de alambre de nitinol en la máquina Universal.

Para justificar esta decisión se compararon ambos resultados (ver Fig. 77) llegando a la conclusión de que la velocidad de deformación es importante, ya que impacta en la plasticidad (área bajo la curva). Sin embargo, se observa que no existe mucha discrepancia, debido a que ambas curvas son muy parecidas en relación al esfuerzo de la zona elástica, el esfuerzo de cedencia y el de ruptura.

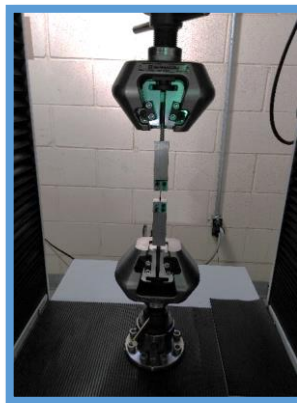


Fig. 76 Alambre de nitinol sujetado con las mordazas en la máquina universal.

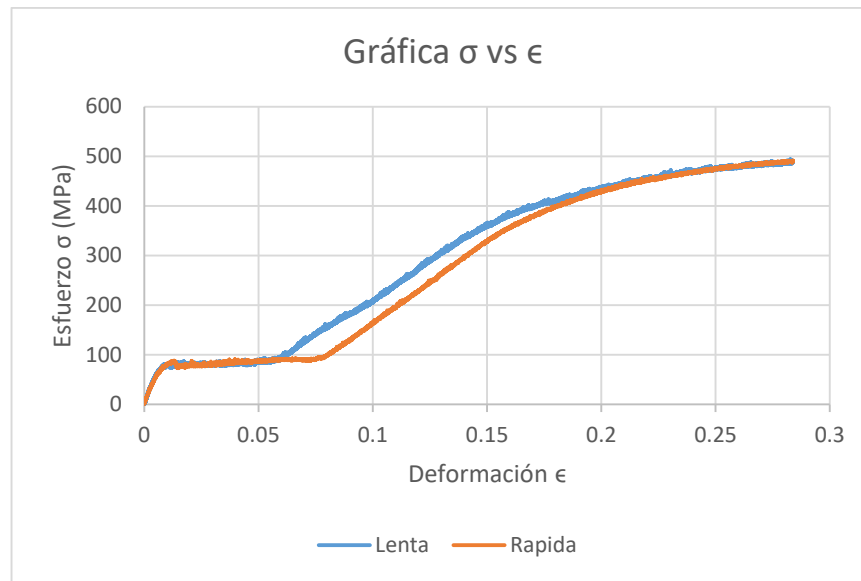


Fig. 77 Gráfica de esfuerzo-deformación de muestras de cero ciclos a diferentes velocidades.

Siguiendo el procedimiento indicado, se obtuvieron las curvas de esfuerzo-deformación de cada muestra con diferentes ciclos térmicos, como se muestra en la Fig. 78. Con el aumento de los ciclos se observa una resistencia a la deformación; comparando la curva de 0 ciclos (testigo) con las muestras con tratamiento térmico, se obtiene que sometidas al mismo esfuerzo, las muestras con un número mayor de ciclos térmicos presentan una deformación menor. Esto demuestra que con la combinación del número de ciclos y la temperatura, el material pierde su memoria de forma.

El esfuerzo máximo al que se sometió la muestra de 100 ciclos fue de 492 MPa. Las curvas correspondientes a las muestras con un menor número de ciclos, presentan un comportamiento similar y con un esfuerzo máximo muy cercano a los 500 MPa, que mostró la muestra testigo (a presión y temperatura ambiente). Esto indica que los choques térmicos no fueron lo suficientemente altos como para producir modificaciones en la estructura que pudieran ser debidos a la producción de maclas en los cristales. La resiliencia (área bajo la curva de la zona elástica) fue disminuyendo conforme los ciclos térmicos fueron aumentando, el material fue perdiendo su condición superelástica, y a su vez, su memoria de forma.

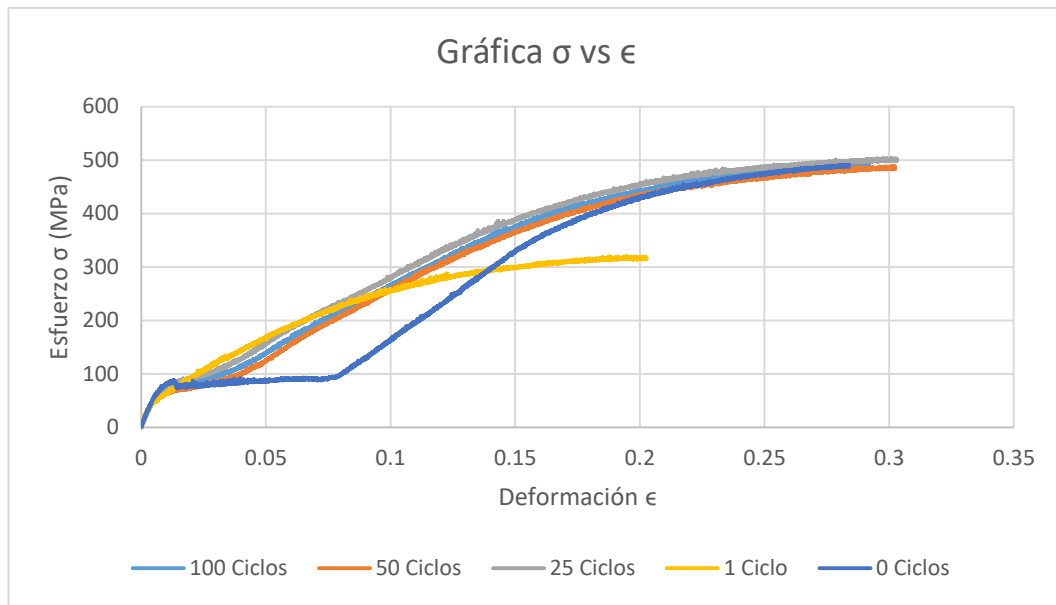


Fig. 78 Gráficas de esfuerzo-deformación a diferentes ciclos térmicos.

Tabla VIII Propiedades del nitinol obtenidas con los resultados del ensayo de tensión.

Ciclos	Módulo Elástico (GPa)	Resiliencia (J/m^3)	Tenacidad (J/m^3)
0	8.82	4.26E+06	1.31E+08
1	7.18	2.07E+06	6.00E+07
25	8.45	1.81E+06	1.48E+08
50	7.18	1.41E+06	1.44E+08
100	8.30	1.64E+06	1.37E+08

La tabla VIII muestra algunas de las propiedades calculadas en base a los resultados obtenidos. El módulo elástico o de Young de cada una de las muestras no cambia por lo que el nitinol mantiene su propiedad elástica a pesar de los cambios térmicos a los que fue sometido.

La resiliencia (área bajo la curva de la zona elástica) y la tenacidad (área bajo la curva de la zona plástica del diagrama de esfuerzo vs deformación) de las muestras de 25, 50 y 100 ciclos térmicos son muy parecidas entre sí, pero con valores menores en comparación con las muestras de uno y 0 ciclos, lo que indica que se requiere de mayor energía para poder deformarlas comparadas con las de tenacidad más pequeña.

6.4 Análisis morfológico

Las muestras preparadas anteriormente de forma transversal y longitudinal se analizaron en el MEB (Microscopio Electrónico de Barrido), para observar cambios morfológicos debidos a posibles deformaciones causadas por los tratamientos térmicos a bajas presiones, obteniendo los siguientes resultados. En la Fig. 79 se observa una muestra sin tratamiento térmico (0 ciclos) de la sección longitudinal. En la imagen A se muestra el aspecto general de la superficie del alambre con pequeñas picaduras de forma alargada y en mayor medida, un sector con un contraste más oscuro que el resto. En la imagen B se muestra una imagen ampliada donde se observan poros generados por la deformación a la que se sometió el alambre durante su fabricación. También hay zonas más claras que indican la presencia de huecos de forma alargada. La imagen C corresponde a una ampliación de 5000x donde los poros se observan con mejor definición, así como la ausencia de grietas y otros defectos del material.

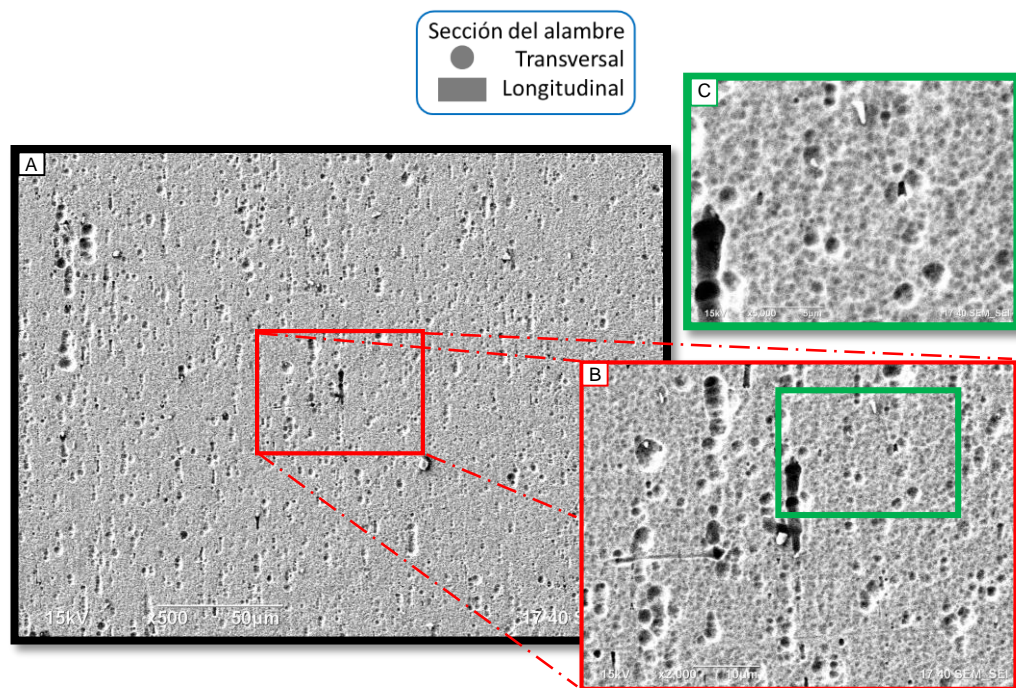


Fig. 79 Muestra de 0 ciclos (testigo) sección longitudinal, la imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.

En la fig. 80 es la misma muestra testigo (0 ciclos), pero, ahora la sección transversal al corte. Se observa que la morfología cambia totalmente con respecto a la de corte longitudinal de la Fig. 79. En lugar de los huecos de forma alargadas aquí se observan pequeños espacios vacíos de forma circular y estos, tal como sucedió en la otra sección, se presentan más oscuros que el resto de la superficie. La imagen B corresponde a 2000x en donde se ve como existen zonas claras, también zonas circulares más oscuras y otras con un contraste intermedio. La imagen C se tomó a 5000x y se observan con mayor nitidez las zonas donde se presentan los poros o huecos ya mencionados anteriormente.

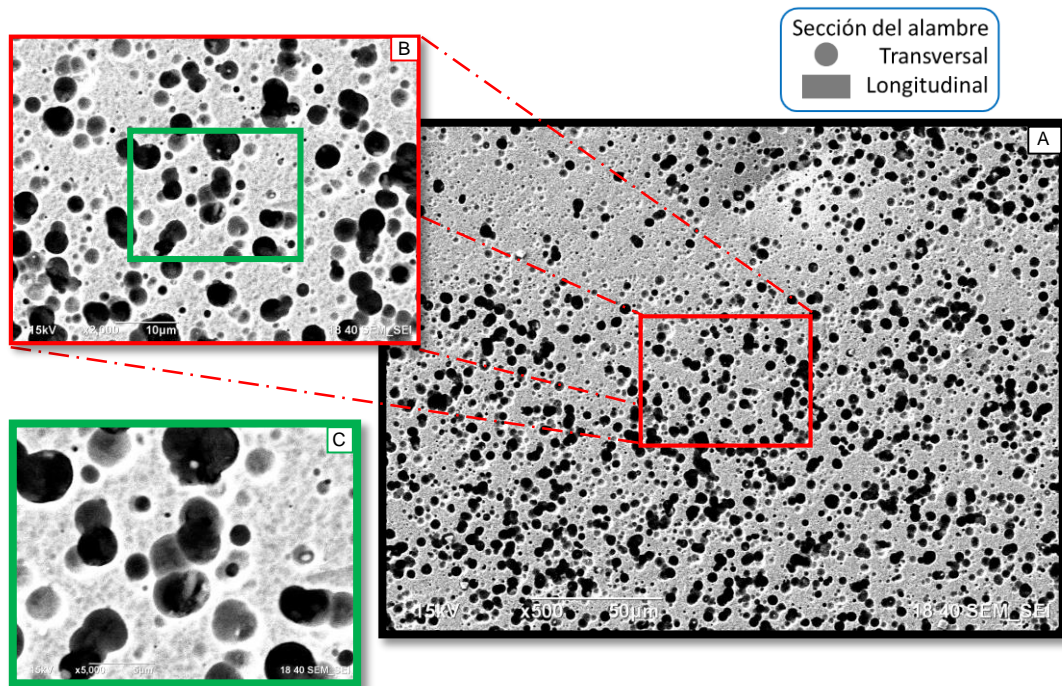


Fig. 80 Sección transversal de la muestra testigo (0 ciclos). La imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.

Comparando las muestras de 100 ciclos térmicos (ver Fig. 81 y 82) se observan resultados similares. A simple vista, se tiene la misma condición de la sección longitudinal con los huecos en forma alargada y en la transversal en forma circular. En la imagen B de la Fig. 81 es más notoria la presencia de pequeñas partículas blancas, éstas son restos del abrasivo utilizado en el lijado y pulido, para obtener el acabado espejo de la muestra, que no fueron removidos con la limpieza ultrasónica.

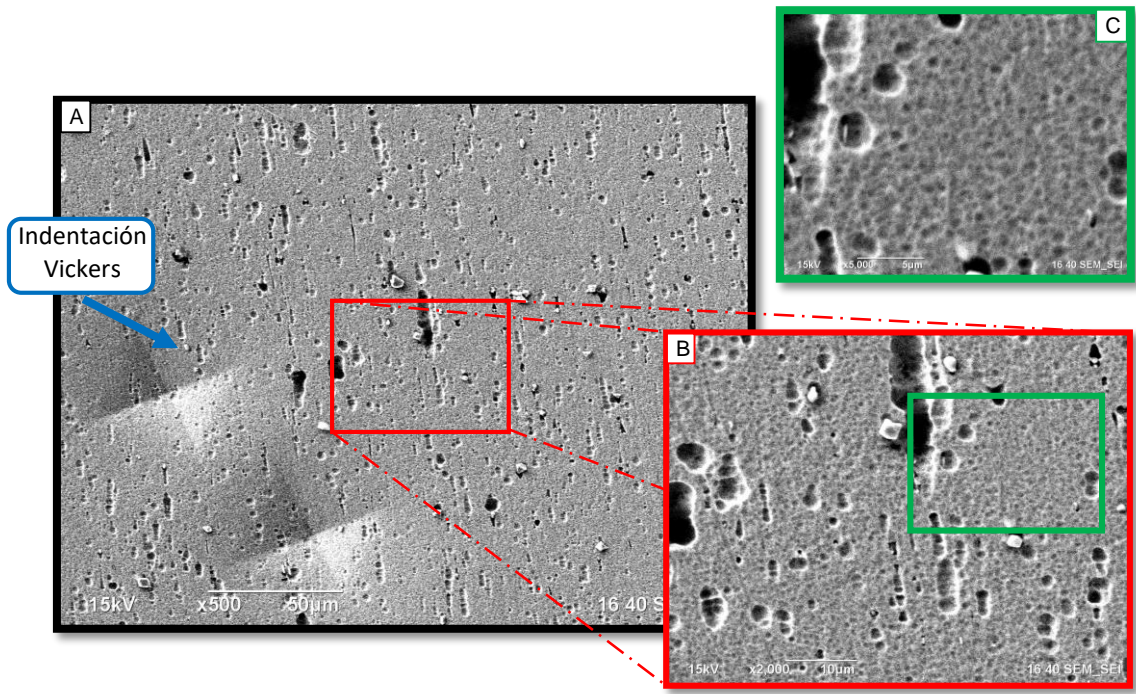


Fig. 81 Muestra de 100 ciclos sección longitudinal, la imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.

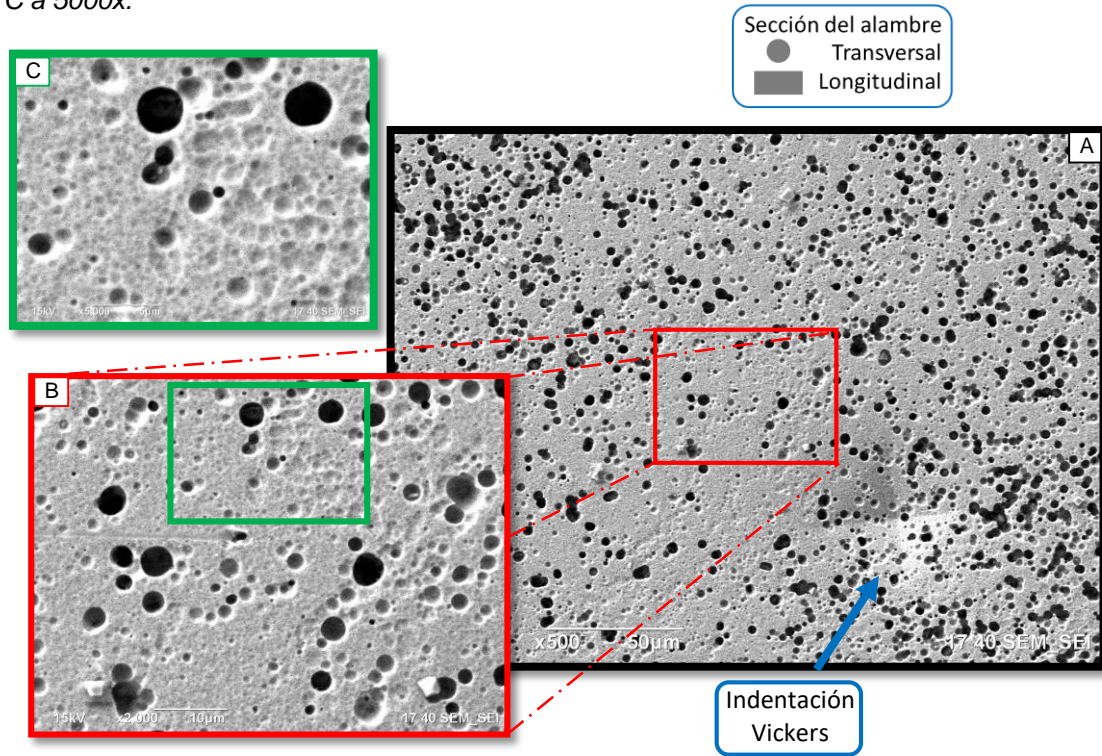


Fig. 82 Muestra de 100 ciclos sección transversal, la imagen A corresponde a 500x, la B a 2000x y la C a 5000x.

También en las imágenes “A” de las Fig. 81 y 82 se observan unas pequeñas marcas de las indentaciones en forma de pirámide invertida que fueron provocadas al realizar el ensayo de dureza tipo Vickers con el durómetro Tukon.

En la Fig. 83 presenta 4 muestras de nitinol sometidas a números diferentes de ciclos térmicos. La imagen A es a 0 ciclos, la B a 25, la C a 50 y la D a 100. Ninguna de ellas presentó cambio sustancial alguno que pueda asociarse con la radiación térmica solar simulada. Las posiciones y formas de las cavidades de contraste más oscuros, se atribuyen al método de fabricación del alambre. Se observa de igual manera la diversidad en el contraste de los huecos.

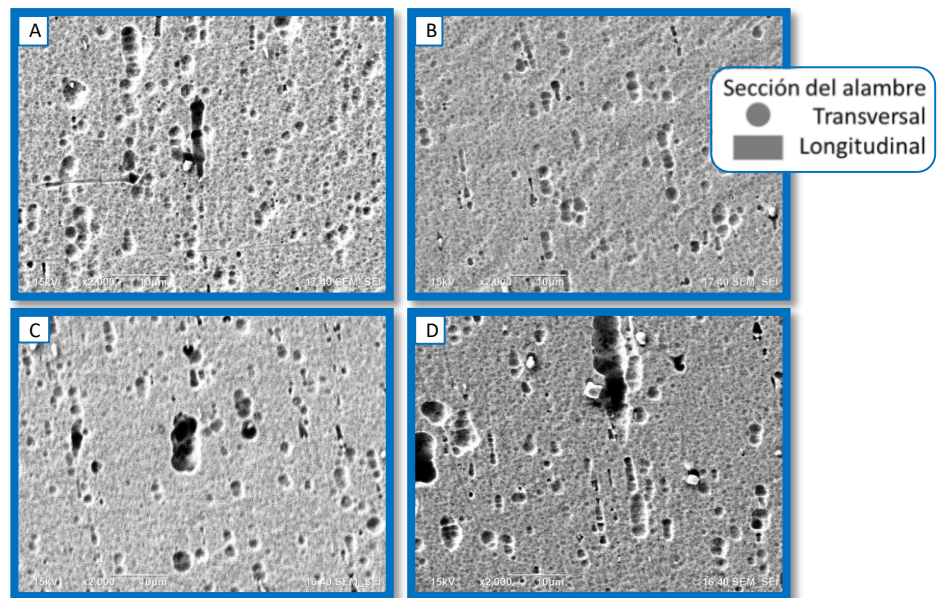


Fig. 83 Imagen a 2000x correspondientes a secciones longitudinales de muestras sometidas a tratamientos térmicos durante un número diferente de ciclos. A-0, B-25, C-50 y D-100 ciclos.

En la Fig. 84 se muestra imágenes tomadas en MEB con exactamente la misma amplificación que en la Fig. 83, es decir a 2000x. En las imágenes se observa que a 0 ciclos (imagen A) la corrosión es más severa que en las de 25, 50 y 100 ciclos (imágenes B, C y D respectivamente). Este resultado se atribuye a la generación de fases precipitadas con mayor estabilidad química debida a los cambios producidos por los tratamientos térmicos a los que se sometieron las muestras dentro de la cámara de vacío.

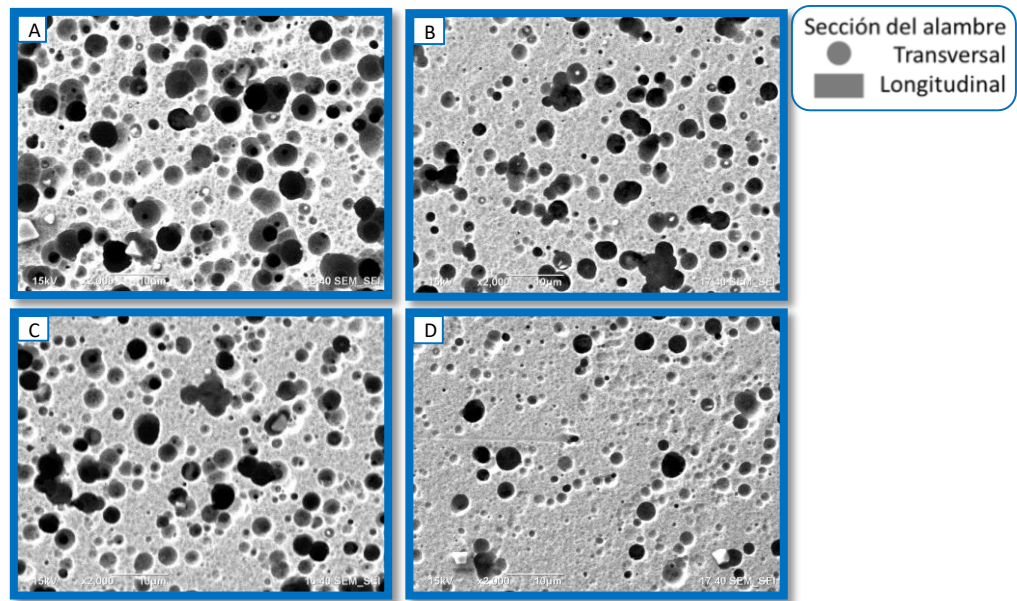


Fig. 84 Imagen a 2000x correspondientes a secciones transversales de muestras sometidas a tratamientos térmicos durante un número diferente de ciclos. A-0, B-25, C-50 y D-100 ciclos.

Complementando las imágenes del MEB se realizó un análisis químico mediante EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectrometer*). Se presenta más información en el anexo 7.3. Los resultados en cuanto a la estequiometría de bulto del material se muestran en la tabla IX. Se analizaron las secciones longitudinales y transversales de las muestras de 100 ciclos en las zonas claras, así como en los huecos oscuros de cada uno de los especímenes.

Tabla IX. Porcentaje atómico de Ni y Ti determinados por EDS correspondientes al nitinol sometido a 100 ciclos.

% Atómico	Longitudinal		Transversal	
	Clara	Oscura	Clara	Oscura
Ti	53.07	55.56	53.31	53.96
Ni	46.92	44.44	46.69	46.03

En base a los resultados de la tabla IX, el material conserva su estequiometría al presentar la composición química del material base sin mostrar efecto alguno por los tratamientos térmicos ni las bajas presiones. El análisis por EDS también presentó una ligera contaminación en la zona oscura debido al ácido con el que fue

atacado para revelar la microestructura y que no fue debidamente removido con la limpieza ultrasónica.

Durante el análisis de todas las muestras se observó que no hay cambios muy significativos. Las propiedades del material no se alteraron como para que de forma microscópica se detectaran cambios.

En las imágenes de las secciones longitudinales (Fig. 83) se observan las formas alargadas tipo cometa y en de las secciones transversales (Fig. 84) las formas circulares de contraste más oscuro. Los resultados de las pruebas de microdureza correspondientes a la sección longitudinal, presentaron mayor variación que las correspondientes a la sección transversal. Se propone que éstos resultados se deben al proceso de fabricación de este tipo de alambres.

Durante la etapa de fabricación de los alambres de nitinol existe un proceso llamado trefilado (ver Fig. 85), que consiste en el alargamiento del alambre mientras está frío. Además de disminuir el diámetro de la varilla y aumentar la longitud de la misma, se mejoran las propiedades mecánicas del material. Generalmente el trefilado se realiza varias veces para garantizar la integridad del proceso [41]. Debido a éste alargamiento, las imágenes tomadas con el MEB muestran pequeños cilindros, que vistos a través de un corte longitudinal se observan con geometrías alargadas, mientras que en la sección transversal son circulares. De la misma manera, este proceso afectó la medición de la dureza, ya que la sección longitudinal se caracterizó por la variabilidad de los resultados.

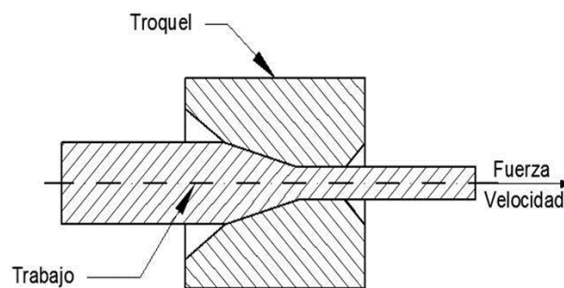


Fig. 85 Proceso de trefilado para la obtención de alambre [41].

CAPITULO 7.

CONCLUSIONES

Se eligieron y diseñaron los componentes adecuados en la construcción de la cámara de vacío de simulación espacial, que permitió tener condiciones de bajas presiones de hasta 1.27×10^{-7} Torr trabajando en un intervalo de temperaturas de -50.7 °C a 130.2 °C simulando el día y la noche. Las condiciones logradas son muy similares a las que la empresa *LACO Technologies* ofrece en su cámara de simulación espacial para prueba de microsátélites, con la ventaja de que la construida en este proyecto es más económica y la presión mínima obtenida es mejor que la ofrecida por ellos. Debido al buen funcionamiento de la cámara, se logró cumplir uno de los objetivos principales de esta investigación; el de crear un sistema que permita probar equipo satelital en condiciones espaciales.

Se analizó el nitinol por medio de EDS y el resultado que arrojó fue una estequiometría de 53 - 47 en porcentaje atómico, en donde la presencia de Titanio es ligeramente mayor a la de Níquel. Este valor está de acuerdo con lo que reporta el fabricante.

Se cumplió con el objetivo de educar al nitinol hasta adquirir una forma predeterminada conforme a la norma de la ASTM F-2082. Se midieron las temperaturas de transición y realizaron los 40 ciclos de entrenamiento con el método de sobredeformación de la fase martensítica. Además se observó que a mayores ciclos de entrenamientos el material adopta la forma con mayor eficiencia.

A cada muestra se le aplicaron: 0, 1, 25, 50 y 100 ciclos simulados de radiación térmica solar a bajas presiones, y se logró un diferencial de temperaturas de al menos 80 °C en un intervalo de -26.64 a 117.89 °C y con una presión de 2.36×10^{-5} a 6.87×10^{-7} Torr, como se describe en la tabla VI de los resultados correspondientes a todos los ciclos térmicos aplicados en la cámara de simulación espacial. Así se cumplió con otro de los objetivos específicos propuestos.

Las muestras con pulido a espejo preparadas para los estudios de microscopia, les faltó una limpieza ultrasónica profunda, debido a que se presentaron componentes de los ácidos con los que fue atacado químicamente, pero de manera sorpresiva fue una ventaja ya que permitió observar con más claridad las zonas oscuras de las muestras haciendo que los huecos fueran más perceptibles a la vista.

La máxima microdureza obtenida de las muestras con el durómetro *Tukon* 1102 fue la de 0 ciclos (testigo) en sección transversal, con un valor de 537.06 HV_{0.5}. A su vez, la de 100 ciclos también transversal fue la de menor dureza con 284.64 HV_{0.5} y con tendencia a disminuir en medida que los ciclos térmicos aumentaron. Tal comportamiento no se reflejó en la sección longitudinal ya que se presentaron variaciones debido al proceso de fabricación del alambre (trefilado), como se puede observar en la tabla VII de los resultados de microdureza.

Con los ensayos de tensión se obtuvieron los esfuerzos máximos que rondan los 500 MPa (ver grafica de esfuerzo vs deformación de la Fig. 78) mismos que el material poseía sin tratamientos térmicos sometido a bajas presiones, lo que indica que los choques de temperatura no fueron lo suficientemente altos como para generar modificaciones en la estructura. El módulo elástico que ronda en 7.98 GPa no presenta grandes cambios con respecto a todas las muestras, la resiliencia (área bajo la curva de la zona elástica) fue disminuyendo conforme los ciclos térmicos fueron aumentando, es decir, el material fue perdiendo su condición superelástica y su memoria de forma (ver tabla VIII).

Otro de los objetivos logrados fue el de determinar los cambios microscópicos al analizar los especímenes en el MEB. Las muestras transversales presentaron pequeños huecos tipo picaduras de forma circular con un contraste más oscuro. Las muestras de la sección longitudinal presentaron huecos de forma alargada en una sola dirección. Se propone que éstos son debido al proceso de fabricación llamado trefilado, que consiste en disminuir el diámetro de la varilla y aumentar su longitud por medio de un troquel.

Con los resultados obtenidos se comprueba la hipótesis de ésta investigación. Comparando la muestra testigo con las muestras de diferentes ciclos térmicos, se observó que no existen variaciones morfológicas, tampoco en el módulo elástico, ni en el esfuerzo máximo. Sin embargo, tanto la resiliencia como la microdureza disminuyeron conforme los ciclos térmicos aumentaron, esto indica que poco a poco va perdiendo su propiedad de memoria de forma. Ésta pérdida no afecta el comportamiento a corto plazo del alambre de nitinol, simplemente va disminuyendo su efectividad al cambio de forma, al menos durante los primeros 100 ciclos.

En conclusión el nitinol como tal si funcionará como antena para los femtosatélites Thumbsat, pero su vida útil se limitará a la cantidad de cambios de forma en el comportamiento de expansión y retracción que éste pueda tener.

MEJORAS FUTURAS

Para hacer más eficiente el proceso de los cambios cíclicos hay que automatizar procesos, evitar sistemas manuales como agregar nitrógeno líquido o encender la lámpara de halógeno que simula la radiación térmica solar. Para esto, es necesario hacer un programa computacional que por medio de válvulas neumáticas e interruptores abra, cierre, encienda y apague cada uno de los componentes utilizados, para hacerlo ya sea a una determinada temperatura o en un tiempo establecido. El congelamiento debido a la humedad presente en el ambiente de las líneas del nitrógeno líquido, se puede evitar al adaptar un recirculador para pase de mejor manera por el serpentín y así disminuir la evaporación del nitrógeno y que la temperatura en el portamuestras se mantenga baja.

Es necesario aumentar de tamaño de la cámara prototipo fabricada ya que es muy pequeña en relación a la expansión que puede llegar a tener la antena de nitinol diseñada para los satélites de la compañía Thumbsat.

Para evitar pérdidas de vacío al abrir y cerrar la cámara, se sugiere que se tenga una cámara de introducción previa a la de análisis, de esta manera la presión en la cámara de pruebas se mantendría casi intacta, favoreciendo el tiempo que se tardaría en llegar a las presiones deseadas. Otra opción es la de añadir una bomba iónica, que permitiría tener condiciones de vacío más cercanas a las presentadas en el espacio.

Complementando la investigación sobre el nitinol, se propone un análisis profundo considerando los esfuerzos a que se someterá una vez en el espacio. Este estudio se puede realizar mediante simulaciones computacionales aplicando el método de elementos finitos. De esta manera es posible comparar diferentes aleaciones y diámetros hasta obtener el de las propiedades ideales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Importancia, "Importancia," 2017. [Online]. Available: <https://www.importancia.org/satelites.php>.
- [2] S. Place, "Space Place," 08 10 2018. [Online]. Available: <https://spaceplace.nasa.gov/review/dr-marc-earth/space-tech.sp.html>.
- [3] F. Mier-Hicks, Interviewee, *Ingeniero mexicano crea simulador espacial en el MIT*. [Interview]. 07 Junio 2017.
- [4] M. F. Laura Talavera, "El Vacío y sus Aplicaciones," Fondo de la cultura Económica USA, 2003.
- [5] Telstar, "Telstar," 08 10 2018. [Online]. Available: <https://www.telstar-lifesciences.com/comunicacion/noticias/telstar+ha+construido+la+mayor+camara+de+simulacion+del+espacio+del+hemisferio+sur.htm?language=nl>.
- [6] L. Technologies, "LACO Technologies," 12 10 2018. [Online]. Available: <https://www.lacotech.com/products/economical-high-vacuum-system-for-satellite-builder?from=204>.
- [7] r. k. F. a. B. h. chambers, "Basic vacuum technology," CRC Press, 1998.
- [8] D. d. Física, "Universidad de Buenos Aires," 12 10 2018. [Online]. Available: http://materias.df.uba.ar/l4ba2017c2/files/2012/07/vacio_lab04_Acha.pdf.
- [9] J. M. Muñiz and R. Cuervo García, *Energía solar temica*, Fundación Confemetal, 2009.
- [10] R. Peyrou-Lauga, "Using real Earth Albedo and Earth IR Flux for Spacecraft Thermal Analysis," 47th International Conference on Environmental Systems, Charleston, South Carolina , 2017.
- [11] BOHN, "BOHN," 12 10 2018. [Online]. Available: <http://www.bohn.com.mx/serpentes.html>.
- [12] Thumbsat, "Thumbsat," 14 08 2018. [Online]. Available: <https://www.thumbsat.com/thumbsat>.

- [13] F. D. d. C. R. Algo Gómez López, Nitinol un biomaterial con memoria de forma, Cuautitlán Izcalli: Facultad de estudios superiores Cuautitlán (UNAM), 2011.
- [14] D. R. S. Martínez, "CARACTERIZACIÓN DE ALEACIONES BASE NI-TI PRODUCIDAS POR SOLIDIFICACIÓN RÁPIDA (MELT-SPINNING)," Palma de Mallorca, España, 2001.
- [15] D. C. Lagoudas, Shape Memory Alloys, Modeling and Engineering Applications, New York, NY, USA: Springer, 2008.
- [16] L. J. Clarke, "Surface crystallography: an introduction to low energy electron diffraction," The University of Michigan, 1985.
- [17] J. R. (. R. Davis and A. I. H. Committee., ASM Specialty Handbook, Nickel, Cobalt, and Their Alloys, United States of America: Materials Park, OH : ASM International, 2000.
- [18] N. R. a. C. K., "Intermetallic Ti₂Ni/TiNi nanocomposite," *ScienceDirect*, 1994.
- [19] M. Corporation, "Introduction to Nitinol," 08 10 2018. [Online]. Available: https://daks2k3a4ib2z.cloudfront.net/59fcbaf103e295000131288b/5a4bb3895344bc000191bac9_Introduction%20to%20Nitinol_V5.pdf.
- [20] C. M. W. K. Otsuka, "Shape Memory Materials," Cambridge University Press, 1999.
- [21] M. C. G. Pineda, "Contexto UDLAP," 20 09 2018. [Online]. Available: <https://contexto.udlap.mx/la-importancia-de-las-pruebas-mecanicas-estandares-de-materiales/>.
- [22] Struers, "Struers Ensuring Certainty," 31 10 2018. [Online]. Available: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing#>.
- [23] Struers, "Struers Ensuring Certainty," 31 10 2018. [Online]. Available: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Vickers#>.
- [24] Reicherter, Wolpert and Wilson, "Wilson Hardness," 18 10 2018. [Online]. Available: http://www.spectro-lab.pl/wp-content/uploads/2017/04/1202_WilsonHardnessREV3.pdf.
- [25] Instron, "Tensile Testing," 04 10 2018. [Online]. Available: <http://www.instron.us/en-us/our-company/library/test-types/tensile-test>.

- [26] J. R. Davis, Tensile Testing, 2nd Edition, ASM International, 2004.
- [27] C. Horst, S. Tetsuya and S. Leslie, Springer Handbook of Materials Measurement Method, Stürtz AG, Würzburg: Springer, 2006.
- [28] O. A. Valdés Rdgz, "DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SOBRE CARGAS AXIALES DE UNA RAÍZ TROPICAL," Instituto Tecnológico de Veracruz, Universidad Autónoma Metropolitana, Veracruz, Ver., 2014.
- [29] F2516-07, "Standard Test Method for Tension Testing of Nickel-Titanium Superelastic Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 2008.
- [30] Shimadzu, "AG-Xplus Series," 16 10 2018. [Online]. Available: <https://www.shimadzu.com/an/test/universal/ag-xplus/ag-xplus3.html>.
- [31] JEOL, "JIB-4500 MultiBeam SEM-FIB," [Online]. Available: <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JIB-4500.html>. [Accessed 19 10 2018].
- [32] E. H. V. International, "Instruction Manual," De Edwards , 1998.
- [33] Adixen, "User's manual," De Alcatel Vacuum Technology, 2007.
- [34] I. MKS Instruments, "HPS® Series 947 OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL," De MKS Instruments, 1997.
- [35] A. Technologies, "FRG-700/702 Pirani Inverted Magnetron Gauge," 30 10 2018. [Online]. Available: <https://www.agilent.com/en/products/vacuum-technologies/vacuum-measurement/active-gauges/frg-700-702-pirani-inverted-magnetron-gauge#support>.
- [36] M. W. Davidson, "Education in Microscopy and Digital Imaging," 11 Mayo 2018. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20110303211343/http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>.
- [37] T. Corporation, "Thermocouple Type K," 13 Mayo 2018. [Online]. Available: <http://www.thermometricscorp.com/thertypk.html>.
- [38] A. F2082-06, "Standard Test Method for Determination of Transformation Temperature of Nickel–Titanium Shape Memory Alloys by Bend and Free

Recovery," ASTM International, West Conshohocken, PA. United States, 2006.

- [39] Lionchip, "Pasta Térmica," [Online]. Available: <https://www.lionchipmexico.com/product-page/pasta-t%C3%A9rmica-30grs-procesador-placa-peltier-chip>. [Accessed 8 10 2018].
- [40] A. E3-11, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA. United States, 2017.
- [41] C. Vila Pastor, F. Romero Subirón , G. M. Bruscas Bellido and J. Serrano Mira, Tecnología Mecánica: Metrología y procesos de conformado de metales sin arranque de viruta., Publicacions de la Universitat Jaume I, 2005.
- [42] R. A. Española, "Asociacion de Academias de la Lengua Española," [Online]. Available: <https://dle.rae.es/>. [Accessed 6 11 2018].
- [43] Significados, "Significados," [Online]. Available: <https://www.significados.com>. [Accessed 6 11 2018].
- [44] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott and D. C. Joy, Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Springer, 2017.
- [45] A. E384, "Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA. United States, 2012.

ANEXOS

7.1 Control semántico

Álabe: Un álabe es la paleta curva de una turbomáquina o máquina de fluido fotodinámica.

Ánodo: Electrodo positivo.

ASTM (*American Society for Testing and Materials*): es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

Austenita: también conocida como acero gamma (γ) es una forma de ordenamiento específica de los átomos de hierro y carbono. Esta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 °C a 1400 °C.

Balastro: sirve para mantener estable y limitar la intensidad de la corriente para lámparas.

Brida: es el elemento que une dos componentes de un sistema de tuberías, permitiendo ser desmontado sin operaciones destructivas, gracias a una circunferencia de agujeros a través de los cuales se montan pernos de unión.

Cátodo: Electrodo negativo.

Convección: consiste en la transferencia de las partículas que forman un líquido, gas o fluido, debido a las diferencias de presión y temperatura.

Cuantitativo: Perteneciente o relativo a la cantidad.

Cuerpo Negro (*Blackbody*): cuerpo que absorbe completamente las radiaciones que inciden sobre él.

Dislocación: Discontinuidad en la estructura de un cristal.

Divergente: Se conoce como divergente el irse apartando sucesivamente unas de otras, dos o más líneas o superficies.

Equiatómica: Una Aleación equiatómica es una aleación de diferentes elementos, tal como el acero, que puede ser modificado con titanio y toma el nombre de acero al titanio.

Estator: parte fija de una máquina rotativa y uno de los dos elementos fundamentales para la transmisión de potencia o corriente eléctrica, siendo el otro su contraparte móvil, el rotor

Estratósfera: Capa intermedia de la homósfera, desde los 12 a los 50 km de altura.

Estructura cristalina: es la forma sólida de cómo se ordenan y empaquetan los átomos, moléculas, o iones. Estos son empaquetados de manera ordenada y con patrones de repetición que se extienden en las tres dimensiones del espacio.

Fases: Cada una de las partes homogéneas físicamente separables en un sistema formado por uno o varios componentes.

Grupo espacial: es el grupo simétrico de una configuración en el espacio, generalmente en tres dimensiones. Existen 219 tipos distintos. En cristalografía, los grupos espaciales también se suelen denominar grupos de *Fedorov* o cristalográficos, y representan la descripción de la simetría del cristal.

Gemelación/desgemelación (Maclado/desmaclado): se produce cuando dos cristales separados comparten algunos de los mismos puntos de la red cristalina de manera simétrica. El resultado es un crecimiento de dos cristales separados en una variedad de configuraciones específicas.

Indentación: Muesca o escotadura en un borde.

Ley de Hooke: establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo F

$$\epsilon = \delta/L = F/AE$$

Siendo δ el alargamiento, L la longitud original, E módulo de Young, A la sección transversal de la pieza estirada. La ley se aplica a materiales elásticos hasta un límite denominado límite elástico.

Martensita: es el nombre que recibe la fase cristalina BCT, en aleaciones ferrosas. Dicha fase se genera a partir de una transformación de fases sin difusión (infiltración de partículas ajenas al material procesado), a una velocidad que es muy cercana a la velocidad del sonido en el material.

Ortorrómbica: es uno de los siete sistemas cristalinos existentes en cristalografía. Muchos minerales cristalizan en este tipo de red, como por ejemplo el olivino o el topacio.

Parámetros de red: hace referencia a la distancia constante de las celdas unitarias o "dimensión de cada celda" con respecto a su estructura cristalina. Las estructuras o redes en tres dimensiones generalmente tienen tres parámetros de red, a , b y c .

Superelásticas: es una respuesta elástica (reversible) a una tensión aplicada, causada por una transformación de fase entre las fases austenítica y martensítica de un cristal. Se exhibe en aleaciones con memoria de forma.

Temperatura de transformación: aquella a la que ocurren cambios de fase; algunas veces define los límites de un intervalo de transformación.

Troposfera: Capa inferior de la homósfera, hasta la altura de doce kilómetros, donde se desarrollan los meteoros aéreos, acuosos y algunos eléctricos.

[42] [43]

7.2 Material para construcción de las bases y ensamble de cámara.

Para la estructura se utilizó PTR (Perfil Tubular Rectangular) de 1 ½ x 1 ½ calibre 12 unida con soldadura de arco con material de aporte E6011 con medidas de 20" x 24" y de alto 27 como se aprecia en la Fig. 86 y 87, además se incluyeron placas de aluminio con espesor de 3/8" para la base principal, de ¼" para la base de la bomba mecánica y de ½" para los soportes verticales a los costados de la cámara cada una debidamente atornillada (ver Fig. 89), también se incluyeron ruedas giratorias para su mejor transporte y un soporte de bloqueo para inmovilizar cuando se hagan las pruebas (ver Fig. 88).



Fig. 86 Estructura con las ruedas soldadas.



Fig. 87 Aplicación de pintura base y esmalte.



Fig. 88 Ruedas y soporte de bloqueo.



Fig. 89 Ensamble con las bases y soportes de aluminio.

Se utilizaron sellos de cobre y *bridas* de medidas que van desde 1 1/3, 2 3/4 y 6", además de un *view port* para poder observar dentro así como ver el comportamiento de los materiales (ver Fig. 90 y 92). Como una manera de facilitar el ingreso a ésta se usó una brida tipo puerta. Para unirlos a la cámara se usó tornillos que van de las medidas desde 8-32, 1/4-28 y 5/16-24 con su respectiva tuerca y rondanas como se muestran en la Fig. 91.



Fig. 90 Diferentes tipos y medidas de bridas.



Fig. 91 Tornillos, tuercas y arandelas.



Fig. 92 Sellos de cobre de diferentes medidas.

7.3 Funcionamiento del MEB.

La técnica consiste en colocar la muestra en la cámara de vacío del MEB y retirar todo el aire que se encuentra dentro de ella. De manera inmediata se enciende el emisor de electrones para bombardear la muestra. Los electrones viajan a través del arreglo de lentes diseñados para obtener un haz convergente de electrones. Las bobinas ubicadas bajo el arreglo de lentes dirigen al haz de electrones de izquierda a derecha y de arriba a abajo de tal forma que se realiza un barrido en toda la superficie de la muestra que se encuentra en la base de la cámara de vacío. Los electrones que golpean la muestra salen difractados hacia el detector. Este último capta esa señal y la manda a un procesador donde se convierte en imagen. En la Fig. 93 se muestra un esquema de los componentes básicos del MEB.

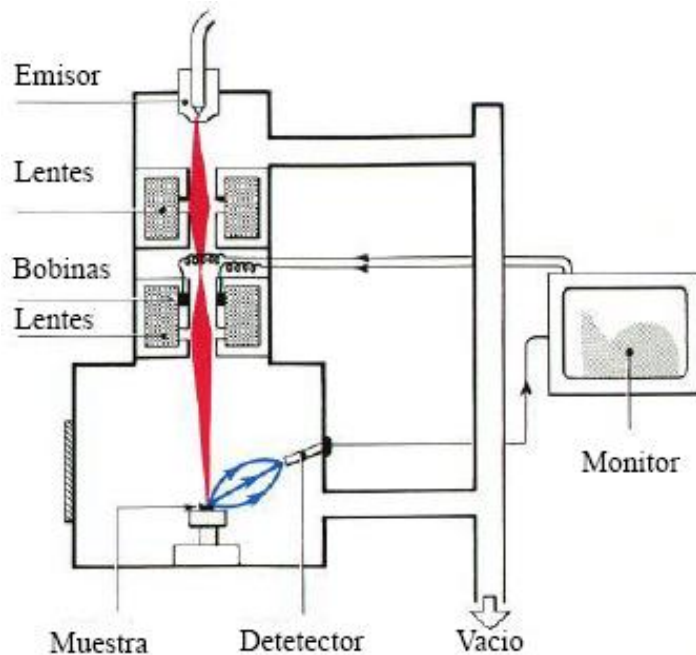


Fig. 93 Componentes del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) [44].

EDS (Energy dispersive X-Ray Spectrometer)

El detector EDS convierte la energía individual de cada uno de los rayos x en una señal de voltaje proporcional a la energía de los rayos x. Esto ocurre en tres pasos. En el primero se convierte los rayos x en una carga debido a la ionización de los átomos en el cristal semiconductor. En el segundo paso la carga se convierte a una señal de voltaje mediante un preamplificador y finalmente la señal de voltaje entra a un procesador que realizará la medición. La Fig. 94 muestra un espectrómetro típico de un análisis de EDS. [44]

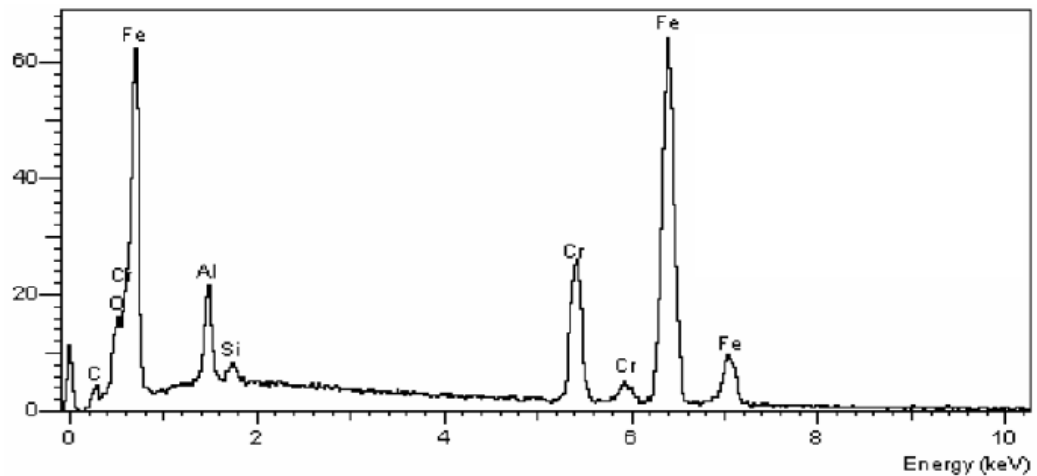


Fig. 94 Espectrómetro típico de un EDS [44].

7.4 Procedimiento de encendido / apagado de bombas.

Mecánica

Encendido

1. Verifique que el nivel de aceite de la bomba esté entre las marcas MAX y MIN en el borde de la abertura de nivel de aceite.
2. Ponga el control del *balastro* de gas en la posición requerida.
3. Encienda el suministro eléctrico a la bomba.
4. Compruebe que el nivel de aceite en el visor desciende ligeramente (3 a 5 mm) después de la puesta en marcha.
5. Si la bomba no cede, opere la bomba con la entrada abierta a la atmósfera para aproximadamente 30 segundos. Luego aísle la entrada y verifique que el nivel de aceite caiga 3-5 mm.
6. Abra la válvula de aislamiento del sistema de vacío.

Apagado

1. Cierre la válvula de aislamiento del sistema de vacío (si no está cerrada).
2. Cierre el balastro de gas (es decir, el control del balastro de gas en el sentido de las agujas del reloj).
3. Desconecte el suministro eléctrico a la bomba.

Turbomolecular.

Encendido

1. Encender la bomba primaria (mecánica).
2. Abrir válvula principal que conecta las bombas con la cámara.
3. Esperar a que la presión llegue a 1.0×10^{-2} Torr.
4. Encender el interruptor principal en la parte trasera.
5. Si no existe ningún problema dar clic en *Start* en el botón frontal del *display*.
6. Esperar a que llegue a 27000 rpm.

Apagado

1. Dar clic el botón *Stop* del *display* frontal.
2. Esperar a que las revoluciones lleguen entre 6000 y 8000 rpm.
3. Apagar la bomba primaria (mecánica).
4. Ventear poco a poco con la válvula de venteo hasta llegar a igualar la presión interna con la presión atmosférica.
5. Cerrar la válvula principal que une las bombas a la cámara.
6. Apagar el interruptor de la parte trasera.

7.5 Tabla de ciclos térmicos sometidos en la cámara de UHV.

Tabla X Características de cada uno de los ciclos térmicos sometidos en la cámara de simulación espacial.

No. Cido	Sol		Eclipse		No. Cido	Sol		Eclipse	
	Temp (°C)	Presion (μTorr)	Temp (°C)	Presion (μTorr)		Temp (°C)	Presion (μTorr)	Temp (°C)	Presion (μTorr)
1	130	750	-50	7.38	51	130	1380	-20	10.1
2	130	100	-25	10.9	52	128	93	-32	7.8
3	130	84.5	-20	5.67	53	108	80.1	-40	5.83
4	110	108	-30	5.33	54	114	88.1	-36	5.46
5	110	44.8	-20	6.15	55	120	99	-18	5.33
6	115	64.9	-35	1.85	56	115	77.5	-33	4.73
7	108	56.6	-35	2.52	57	130	76.3	-20	4.42
8	108	53.7	-35	7.39	58	133	62.4	-19	4
9	110	56.6	-30	4.21	59	105	87.2	-15	4.72
10	110	53	-30	5.1	60	106	79.5	-13	4.21
11	110	54.5	-30	4.97	61	109	128	-20	4.51
12	111	53.4	-34	2.7	62	107	130	-22	4.34
13	108	44.6	-36	2.64	63	105	137	-20	1.27
14	108	84.5	-35	2.26	64	105	128	-12	1.5
15	107	45.5	-35	2.68	65	98	89.4	-10	1.33
16	111	48	-35	2.25	66	120	427	-20	5.26
17	110	35.5	-30	4.41	67	95	60.1	-18	4.62
18	120	41	-30	2.71	68	94	57.7	-18	3.97
19	130	952	-20	28.5	69	98	96.5	-16	3.41
20	108	240	-32	7.28	70	96	59	-18	4.62
21	114	162	-35	5.95	71	95	77.1	-14	4.55
22	112	129	-35	4.4	72	93	58.8	-13	3.59
23	105	110	-30	6.22	73	94	74.3	-19	3.4
24	107	102	-30	4.32	74	95	113	-21	3.56
25	105	60	-31	3.1	75	98	118	-16	3.55
26	106	82	-36	2.44	76	130	987	-18	54
27	103	81.5	-40	2.06	77	135	687	-30	16.5
28	118	110	-20	4.5	78	140	263	-36	5.52
29	130	230	-30	5.2	79	134	157	-43	4.27
30	110	62.6	-32	2.7	80	136	127	-38	4.41
31	100	54.5	-31	2.58	81	138	118	-40	3.73
32	109	62.9	-27	2.3	82	131	89.2	-39	3.72
33	116	54.7	-20	2.17	83	136	90	-34	4.06
34	111	51.1	-15	2.11	84	138	5100	-15	75
35	116	55.5	-18	2.15	85	140	497	-32	12.8
36	109	44.3	-15	3.4	86	139	268	-34	7.53
37	132	131	-20	5.45	87	140	183	-28	8.75
38	120	53.8	-18	2.54	88	139	140	-38	4.39
39	121	60.6	-15	4.43	89	136	121	-35	4.87
40	122	65.9	-12	2.22	90	139	120	-30	4.81
41	120	60.6	-20	5.22	91	139	108	-33	5.14
42	115	50	-10	5.26	92	138	118	-32	5.6
43	118	68.5	-14	5.44	93	140	171	-36	9.05
44	130	213	-14	14.5	94	138	117	-29	4.67
45	133	63.1	-30	3.21	95	134	94	-35	2.44
46	108	55.8	-25	5.71	96	132	100	-28	5.32
47	108	59.1	-27	5.29	97	130	2300	-25	19.8
48	107	58.8	-32	4.57	98	129	276	-28	18.3
49	105	52.2	-30	7.8	99	135	594	-26	14.5
50	108	59.8	-30	7.88	100	130	1420	-30	26.1

Sol Promedio		
Temp	°C	117.89
Presion	Torr	2.36E-05

Eclipse Promedio		
Temp	°C	-26.64
Presion	Torr	6.87E-07

7.6 Especificaciones del durómetro tipo Vickers.

Tabla XI Especificaciones técnicas de Wilson Hardness Tukon 1102.

Tukon 1102	
<i>Escalas de dureza</i>	Vickers y Knoop
<i>Carga de prueba (gf)</i>	10, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 (2000)
<i>Cumplimiento de Normas</i>	EN-ISO 6507, ASTM E384 & E92, and JIS
<i>Duración de la carga (Tiempo de permanencia)</i>	5 - 99 segundos
<i>Torreta automática</i>	3 posición; 1 indentador, máx. 2 obj.
<i>Ampliación del ocular</i>	10x
<i>Magnificación Total</i>	100x, 500x
<i>Objetivos Estándar</i>	10x, 50x
<i>Iluminación de Espécimen</i>	LED
<i>Monitor</i>	5.7 in (144.8 mm) pantalla táctil
<i>Salida de datos</i>	USB tarjeta de memoria (Formato CSV), RS232
<i>Conversiones</i>	Brinell, Vickers, Rockwell y Resistencia a la tracción acorde a ASTM E140, ISO 18625 y GB
<i>Máxima altura del Espécimen</i>	130 mm (4.7 in) / con XY-stage 95 mm (3.7 in)
<i>Profundidad desde la línea central</i>	130 mm (5.1 in)
<i>Intervalo de temperatura de funcionamiento</i>	10° a 38°C (50° a 100°F)
<i>Dimensiones de la máquina (L x W x H)</i>	520 mm (20.4 in) x 230 mm (9.1 in) x 520 mm (20.4 in)
<i>Peso</i>	40 kg (88.1 lbs.)
<i>Fuente de alimentación</i>	110 - 220V AC, 60/50 Hz

Se utilizó conforme a la normativa ASTM E384 para medir dureza Vickers bajo los siguientes pasos [45]:

- 1 Colocar la muestra sobre la mesa.
- 2 Ajustar y centrar con ayuda de los micrómetros en la posición que se quiera hacer la indentación.
- 3 Enfocar con la manivela que se encuentra del lado inferior derecho.
- 4 Seleccionar el tipo de ensayo y la carga.
- 5 Iniciar el ensayo.
- 6 Para la medición ajuste la diagonal de la indentación entre las líneas mostradas por el objetivo y después medir la distancia.

7 Una vez medida una diagonal girar el objetivo de manera que este perpendicular a la medición anterior, reajustar la muesca entre las líneas y volver a medir. Al tener las dos longitudes se desplegara la dureza obtenida de la medición. Para obtener una dureza más precisa se sugiere que se realicen al menos 5 muestreos seguido de un promedio de los datos. [24].

Cálculo de dureza Vickers

La dureza Vickers (HV) se calcula midiendo ópticamente las longitudes diagonales de la impresión dejada por el penetrador. Las mediciones se convierten en HV mediante una tabla o fórmula como se describe a continuación.

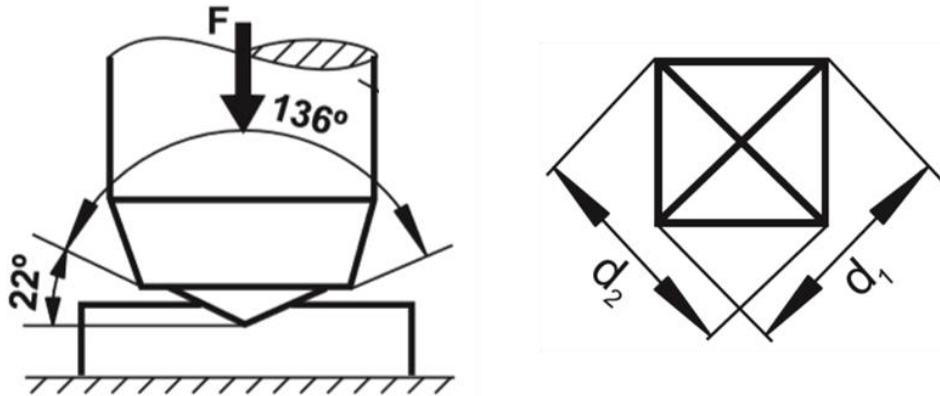


Fig. 95 Cuerpo de ensayo de dureza Vickers tipo piramidal tetragonal de diamante con ángulo diedro de 136° [23].

$$HV = \frac{0.102 \times F}{A} \quad \text{ó} \quad \frac{0.189 \times F}{d^2}$$

$$A = \frac{d^2}{2\cos 22^\circ} = \frac{d^2}{1.854}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

En donde HV es la dureza Vickers, F valor numérico de la fuerza en Newton (N), A valor numérico de la superficie huella en mm^2 y d valor medio de las diagonales. [23]

7.7 Especificaciones de la máquina universal *Shimadzu*.

Tabla XII Especificaciones técnicas de máquina de tensión *Shimadzu AG-IC-100 KN*.

Nombre del modelo	AG-100 KN
<i>Max. Capacidad de carga</i>	100 KN
<i>Método de carga</i>	Directo, de alta precisión.
<i>Intervalo de velocidad de cruceta</i>	0.0005 a 1000 mm/min
<i>Velocidad máxima de retorno</i>	1200 mm/min
<i>Precisión de velocidad de cruceta</i>	±0.1%
<i>Tasa de captura de datos</i>	5000 Hz
<i>Funciones estándar</i>	<p>Funcionalidad de ahorro de energía durante el modo de espera.</p> <p>Lectura automática de las propiedades de la celda de carga.</p> <p>Ajuste fino de la posición de la cruceta.</p> <p>Prueba de fuerza y visualización de carrera.</p> <p>USB interface (por PC)</p> <p>Control automático de fuerza de ensayo y deformación.</p> <p>Fuerza de prueba auto cero/auto calibración.</p> <p>Detección de roturas / retorno automático.</p> <p>Visualización del valor del esfuerzo.</p> <p>Detección de límite suave.</p>
<i>Dimensiones del marco principal W x D x H (mm)</i>	1186 x 752 x 2914
<i>Dimensiones del Controlador inteligente W x D x H (mm)</i>	80 x 50 x 250
<i>Peso (aprox. Kg)</i>	834
<i>Requerimientos de energía</i>	3-phase, 200 a 230 V, 50 a 60 Hz, 7 kVA (2.0 kW)
<i>Ambiente de instalación</i>	<p>Temp.: 5 a 40 °C.</p> <p>Humedad: 20 a 80 % (sin condensación)</p> <p>Fluctuación de voltaje: ±10% máx.</p> <p>Vibración: Frecuencia 10 Hz máx., amplitud 5 mm máx.</p>

[30]

7.8 Tabla de límites de velocidad en ensayo de tensión.

Tabla XIII Límites de velocidad en ensayo de tensión.

d , diameter or thickness (mm) ^A	Maximum crosshead speed in mm/min per mm† of initial length of reduced section (or initial distance between grips for specimens not having reduced sections)	
	First Cycle (load to 6 % strain and unload)	Second Cycle (load to failure)
$d \leq 0.2$	0.08	0.8
$0.2 < d \leq 0.5$	0.04	0.4
$0.5 < d \leq 2.5$	0.02	0.2
$d > 2.5$	0.01	0.1

^A For tubing, use d that gives equivalent surface area to diameter ratio; for round tubing, $d = (\text{outer diameter}) - (\text{inner diameter})$.

† Editorially corrected.