



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD ZACATENCO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“EROSIÓN POR PARTÍCULA SÓLIDA DE HIELO SECO (CO₂)
PARA LA PISTA METÁLICA DE RODADURA DEL
NEUMÁTICO EN EL STCMETRO”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. CARLOS ANDRÉS QUINTO SAURE

DIRECTORES:

DR. EZEQUIEL ALBERTO GALLARDO HERNÁNDEZ

DR. MARTÍN DARÍO CASTILLO SÁNCHEZ

MÉXICO, D.F. JULIO 2015

Resumen

En el presente trabajo se analizó el efecto erosivo que genera la técnica de *limpieza criogénica*, la cual hace uso de la proyección de partículas sólidas de dióxido de carbono sobre un espécimen extraído de pistas metálicas de rodadura que utiliza el Sistema de Transporte Colectivo – Metro de la Ciudad de México. Los trabajos que han sido publicados con anterioridad dejan abierto el debate si esta técnica causa o no daño en las superficies impactadas.

En este estudio se evaluaron parámetros físicos como es: Velocidades de impacto a la salida de la boquilla; empleando para ello, un sistema de video de alta velocidad capaz de observar el desplazamiento de las partículas a través del tiempo, diferentes presiones de trabajo. Posteriormente, se realizaron análisis de tipo fenotípicos antes, durante, y al final de cada ensayo, por medio de análisis de perfilometría, rugosidad, dureza, y de microscopia óptica y electrónica de barrido.

Los resultados mostraron que se produce un daño en superficial del espécimen sometido a esta técnica, el cual va en aumento en relación al tiempo de trabajo. Además, se observó que los valores de dureza, rugosidad, y perfil de la probeta cambiaron después de los ensayos; por lo que al ser analizadas las huellas de desgaste por microscopía óptica y electrónica de barrido presentaron cavidades, deformación plástica y remoción del material entre otras.

Abstract

In the present work it was analyzed the erosive effect that can cause the technique of *dry ice blasting*, which makes use of the projection of solid particles of carbon dioxide on a specimen taken from metal railway tracks used by the Public Transport System – Metro. The works that have been published leave open to debate whether or not the technical cause damage to surfaces as some researchers say the existence of a superficial change and other deny it completely.

In this study it was evaluated impact speeds to the nozzle exit with a video system capable of high speed to observe the displacement of the particles over time at different working pressures; it was realized phenotypic tests before, during, and at the end of the process by profilometry analysis, roughness, hardness and microscopy.

The results showed that there is indeed damage to the specimen surface upon exposure technique, which is increasing in relation to working time. It was observed that the roughness values and profiles of the sample changed during the impact process, so when it was analyzed by microscope was observed cavity formation and removal of the base material in the work area.

Dedicatoria

En forma muy especial a mis queridos padres Griselda y Víctor, y a mi muy amada hermana Anita por su amistad y siempre apoyo en cada una de las metas que me he propuesto realizar.

A mis primos Alejandro y Fernando, y a mis buenos amigos Toño, Javier y Darío que me ayudaron a hacer esta aventura más fácil en una ciudad que no conocía y que juntos logramos conocerla más.

Agradecimientos

Agradezco a mi compañero Belizario Amin Morales Cabrera y a mis asesores el Dr. Ezequiel Alberto Gallardo Hernández, Dr. Martín Darío Castillo Sánchez, y Dr. Manuel Vite Torres por haberme apoyado y orientado tan acertadamente para la realización de este proyecto.

A las Instituciones: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y al Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías por su apoyo en este camino.

Índice

Introducción	I
Objetivos	II
Justificación	III
Capítulo I. Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	1
1.1 Condiciones de operación	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Acciones para mitigar la pérdida de adhesión	4
Capítulo II. Limpieza Criogénica.....	7
2.1 Dióxido de carbono.....	7
2.2 Sublimación	10
2.3 Mecanismo de limpieza criogénica.....	11
2.4 Riesgos del uso y manejo de la limpieza criogénica.....	12
2.4.1 Ruido durante el proceso	12
2.4.2 Temperatura	14
2.4.3 Partículas desprendidas de la superficie	14
2.4.4 Toxicidad	14
2.5 Impacto ambiental del CO ₂	14
2.6 Origen del CO ₂ y de la limpieza criogénica	15
2.7 Erosión por partícula sólida (EPS).....	18
2.8 Erosión por cavitación	20
Capítulo III. Diseño Experimental	23
3.1 Pruebas preliminares	23
3.2 Sistema de la limpieza criogénica.....	24
3.2.1 Dispositivos sujetadores.....	25
3.3 Selección de flujo.....	26

3.4 Cámara de alta velocidad.....	28
3.4.1 Calibración de cámara de alta velocidad	29
3.5 Preparación de la probeta.....	30
3.5.1 Peso.....	31
3.5.2 Dureza.....	32
3.5.3 Rugosidad	33
3.5.4 Perfil.....	33
3.5.5 Micrografías ópticas y electrónicas de barrido	34
3.6 Arreglo experimental	36
3.7 Parámetros de prueba.....	37
Capítulo IV. Resultados.....	39
4.1 Densidad de potencia	39
4.2 Pérdida de peso	40
4.3 Dureza	40
4.4 Rugosidad	41
4.5 Perfilometría	42
4.6 Micrografías e identificación de mecanismos de desgaste	45
Capítulo V. Análisis y Discusión de Resultados	51
Conclusiones.....	55
Trabajos Futuros	57
Referencias.....	59

Índice de Figuras

Fig. 1.1. Modelos de trenes del STCMetro [7]	2
Fig. 1.2. Configuración de sistema motriz de rodadura neumática [4].....	3
Fig. 1.3. Contaminantes en estación Tacuba Línea 7	4
Fig. 1.4. Neumáticos del STCMetro con contaminantes	4
Fig. 1.5. Zona techada en pendiente entre terminales Oceanía y Terminal Aérea	5
Fig. 1.6. Pista metálica de rodadura con ranurado para mejorar adhesión	5
Fig. 2.1. Diagrama de fases del dióxido de carbono [15]	8
Fig. 2.2. Esquema de proceso de generación de pellets.....	9
Fig. 2.3. Pellets de hielo seco.....	10
Fig. 2.4. Sublimación del CO ₂ a temperatura y presión ambiental [63].....	10
Fig. 2.5. Mecanismo de la limpieza criogénica	11
Fig. 2.6. Esquema de ángulos de aplicación; a) partículas impactadas a 90°, b) partículas impactadas a 60°	12
Fig. 2.7. Efecto de la presión del compresor en el nivel de ruido [24].....	13
Fig. 2.8. Tiempos de exposición críticos para diferentes procesos [24]	13
Fig. 2.9. Aumento de temperatura y concentración de CO ₂ [32].....	15
Fig. 2.10. Mecanismo de densidad de potencia	17
Fig. 2.11. Gráfica de tasa de desgaste por erosión para materiales dúctiles y frágiles con respecto al ángulo de impacto [48]	18
Fig. 2.12 Mecanismo de erosión por partículas sólidas [47]	19
Fig. 2.13. Formación de burbujas y fenómeno de implosión de la erosión por cavitación [55].....	20
Fig. 3.1. Pruebas preliminares de la técnica; a) pista de rodadura, b) neumático.....	23
Fig. 3.2. Pruebas en laboratorio; a) pista de rodadura, b) neumático	24
Fig. 3.3. Sistema de limpieza criogénica; a) diagrama, b) equipo utilizado	25
Fig. 3.4. Dispositivo sujetador de boquilla y probeta; a) diagrama, b) equipo utilizado	25
Fig. 3.5. Captura de videos con cámara de alta velocidad; a) diagrama, b) equipo utilizado.....	26
Fig. 3.6. Imagen tomada a 1/10,000 s.....	26

Fig. 3.7. Gráfica de velocidad de las partículas con flujos de 1 y 2 kg/min	27
Fig. 3.8. Flujo a la salida de la boquilla; a) esquema de imagen, b) imagen 1/10,000 s.....	28
Fig. 3.9. Cámara de alta velocidad MotionXtra HG – 100 K Redlake	28
Fig. 3.10. Imagen tomada a granos de arroz a 1/10,000 s.....	30
Fig. 3.11. Dimensionamiento de pista metálica de rodadura utilizada en el STCMetro [62].....	30
Fig. 3.12. Báscula Scientech modelo SA – 120.....	31
Fig. 3.13. Manufactura final de probeta.....	32
Fig. 3.14. Microdurómetro LECO modelo LM – 700	32
Fig. 3.15. Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ – 210.....	33
Fig. 3.16. Perfilómetro Mitutoyo modelo CV – 500.....	33
Fig. 3.17. Perfil de la probeta antes de realizar la limpieza	34
Fig. 3.18. Microscopio Iroscope modelo MG – 30P.....	34
Fig. 3.19. Micrografías de la probeta; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X	35
Fig. 3.20. Microscopio electrónico de barrido Jeol modelo JSM – 7800F.....	35
Fig. 3.21. Micrografía obtenida por SEM; a) aumento a 200X, b) aumento a 1000X	36
Fig. 3.22. Proyección de partículas de CO ₂ sobre probetas; a) diagrama, b) equipo utilizado.....	36
Fig. 4.1. Gráfica de densidad de potencia por prueba.....	39
Fig. 4.2. Gráfica de pérdida de peso de la probeta analizada.....	40
Fig. 4.3. Gráfica de dureza Vickers	41
Fig. 4.4. Gráfica de valores de rugosidad (Ra)	42
Fig. 4.5. Perfil de la probeta al cumplir 1 minuto de aplicación de la técnica	42
Fig. 4.6. Perfil de la probeta al cumplir 2 minutos de aplicación de la técnica	43
Fig. 4.7. Perfil de la probeta al cumplir 3 minutos de aplicación de la técnica	43
Fig. 4.8. Perfil de la probeta al cumplir 4 minutos de aplicación de la técnica	43
Fig. 4.9. Perfil de la probeta al cumplir 5 minutos de aplicación de la técnica	44
Fig. 4.10. Perfil de la probeta al cumplir 6 minutos de aplicación de la técnica	44
Fig. 4.11. Comparación de perfiles de la probeta de 0 y 6 min.....	45
Fig. 4.12. Fotografía de probeta utilizada al término de 6 minutos	45
Fig. 4.13. 1 minuto de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X	46
Fig. 4.14. 2 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.....	46

Fig. 4.15. 3 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.....	46
Fig. 4.16. 4 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.....	47
Fig. 4.17. 5 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.....	47
Fig. 4.18. 6 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.....	47
Fig. 4.19. Aumento a 40X; a) antes de aplicar la técnica, b) al término de 6 minutos	48
Fig. 4.20. Aumento a 80X; a) antes de aplicar la técnica, b) al término de 6 minutos	48
Fig. 4.21. SEM con aumento a 200X; a) antes de la técnica, b, c, y d) al término de 6 minutos.....	49
Fig. 4.22. SEM con aumento a 1000X en diversas zonas al término de 6 minutos.....	50

Índice de Tablas

Tabla 1. Actividades emisoras de millones de toneladas de CO ₂ (MtCO ₂) por año [14].	8
Tabla 2. Especificaciones de cámara de alta velocidad [64]	29
Tabla 3. Composición química de la pista de rodadura metálica [62].....	31
Tabla 4. Parámetros de prueba.....	37
Tabla 5. Densidad de potencia a diferentes velocidades.....	39
Tabla 6. Dureza Vickers	41

Introducción

La limpieza criogénica es una técnica de impacto que combina aire a presión y partículas sólidas y gaseosas de dióxido de carbono sobre superficies, ya sea para limpiar o para aumentar la adhesión de recubrimientos. Esta técnica, es eficiente y limpia comparada con las tradicionales, tales como chorro de arena, chorro de agua (con y sin partículas abrasivas), y chorro con hielo húmedo [1, 2, 3].

Por su versatilidad y limpieza actualmente es utilizado en diferentes áreas de la industria, tales como: alimenticia, aeroespacial, naviera, automotriz, eléctrica, fundiciones, plásticos, madera, farmacéutica, y mantenimiento en general [1, 2, 3].

Este trabajo experimental, presenta los resultados obtenidos del efecto de aplicar la limpieza criogénica sobre superficies de material de la pista metálica de rodadura del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México; así como identificar los posibles mecanismos de desgaste generados.

El Capítulo 1, detalla las condiciones de operación del STCMetro, la pérdida de adhesión entre neumático y la pista metálica, y las consecuencias y acciones realizadas hasta la fecha. El Capítulo 2, describe la técnica de limpieza criogénica, define conceptos para su comprensión, muestra cómo ha evolucionado a través del tiempo, el impacto ambiental, y las medidas de seguridad y protección necesarias para hacer uso óptimo del proceso. En el Capítulo 3, se presenta el diseño experimental para analizar el efecto de la técnica, donde se describe la preparación y caracterización de la probeta, parámetros de prueba y el arreglo experimental. En tanto, en el Capítulo 4 exhibe los resultados experimentales, tales como: Pérdida de masa, dureza, rugosidad, perfilometría y micrografías que muestran los mecanismos de desgaste. Finalmente, en el Capítulo 5 se expone detalladamente un análisis y discusión de resultados obtenidos. También se describen en la parte final las conclusiones y trabajos futuros.

Objetivos

General:

- Evaluar la técnica de limpieza criogénica sobre la pista metálica de rodadura del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Particulares:

- Proponer una metodología experimental.
- Evaluar las diferentes presiones para determinar la velocidad de choque de partículas de dióxido de carbono.
- Determinar la velocidad promedio de las partículas de dióxido de carbono sólido con cámara de alta velocidad.
- Seleccionar el flujo adecuado de las partículas sólidas de dióxido de carbono.
- Definir el tiempo de exposición del flujo sobre la pista que ocasiona mayor daño superficial.
- Determinar la densidad de potencia y los esfuerzos superficiales a los que se encuentra sometido la probeta.
- Caracterizar el daño de la probeta después de haber sido expuesta a la técnica (pérdida de peso, cambio en la dureza, rugosidad, y perfilometría).
- Realizar análisis de la huella de desgaste por medio de microscopía óptica y electrónica de barrido a la probeta durante el ensayo.
- Identificar los mecanismos de desgaste ocurrido en los ensayos realizados.

Justificación

Se ha presentado durante varias décadas el problema no resuelto de pérdida de adhesión del neumático sobre la pista metálica de rodadura en el Sistema de Transporte Colectivo Metro; la pérdida de adhesión provoca patinaje y deslizamiento durante las operaciones al salir y al ingresar de estaciones y en pendientes.

Sus causas han sido previamente identificadas, como son: Partículas de desgaste tanto del neumático, como de las zapatas de frenado y de escobillas del sistema eléctrico, y basura acumulada, mismas que se depositan sobre la pista de rodadura. Al paso del neumático las partículas antes mencionadas se adhieren sobre la banda de rodadura del neumático formando protuberancias que impiden el contacto eficiente [4].

Anualmente, se generan gastos elevados en corrección de daños en neumáticos, programas de mantenimiento, consumo de energía y de material en general, debido a los problemas por la pérdida de adhesión [4]. Por lo que se ha propuesto aplicar la técnica de limpieza criogénica sobre la pista de rodadura metálica; para reducir la cantidad de partículas contaminantes depositadas. Para ello, la técnica tiene que ser evaluada en el laboratorio de Tribología de la SEPI – ESIME Unidad Zacatenco, IPN; para posteriormente implementar la técnica en la aplicación real del STCMetro de la Ciudad de México.

Capítulo I. Sistema de Transporte Colectivo Metro

En la segunda mitad del siglo XX la Ciudad de México presentó graves problemas de transporte público y congestión de la red vial, particularmente en la zona centro, donde se concentraba diariamente el 40 por ciento del total de los viajes realizados dentro de la ciudad. En las horas pico del tráfico, la velocidad de circulación de los vehículos era menor a la de una persona caminando [5, 6]. Después de evaluar diversas opciones para disminuir el tráfico, se realizaron una serie de estudios que permitieron generar un anteproyecto y más tarde un proyecto de construcción de un Sistema Metropolitano para la Ciudad de México [5, 6]; sin embargo, fue hasta el 29 de abril de 1967 que se publicó en el Diario Oficial el decreto presidencial mediante el cual se crea un organismo público descentralizado, el Sistema de Transporte Colectivo, con el propósito de construir, operar y explotar un tren rápido con recorrido subterráneo para el transporte público del Distrito Federal [5, 6]. Dos años más tarde, el 4 de septiembre de 1969, se realizó el recorrido inaugural, entre las estaciones de Insurgentes y Zaragoza [5, 6].

El Metro es, probablemente, la obra de ingeniería civil y de arquitectura más grande y compleja de la Ciudad de México. Su principal característica es el proceso permanente de transformación y crecimiento, por la incorporación de nuevas tecnologías y la ampliación de la red [5, 6].

En el 2006 ocupó el tercer lugar a nivel mundial en captación de usuarios, superado algunas ocasiones por los metros de Moscú, Tokio, y New York. En ese mismo año obtuvo el quinto lugar por su extensión de red [5, 6].

1.1 Condiciones de operación

El Sistema de Transporte Colectivo - Metro transporta alrededor de 5 millones de personas por día a distintos puntos del Distrito Federal y zona metropolitana a través de sus 12 líneas; posee un parque vehicular de 390 trenes; para producir el servicio en horas de operación se tiene un grupo compuesto por 282 trenes, los 108 trenes restantes se encuentran distribuidos

en mantenimiento mayor, rehabilitación, proyectos especiales y como reserva. La Figura 1.1 muestra los diferentes modelos de trenes que conforman el STCM.



Fig. 1.1. Modelos de trenes del STCMetro [7].

El parque vehicular con el que cuenta el STCMetro se divide en dos sistemas motrices; 321 trenes utilizan un sistema motriz de rodadura neumática, y 69 lo hacen con rodadura férrea [7].

La configuración de sistema motriz de rodadura neumática se muestra en la Figura 1.2; en el cual se observa una rueda metálica y un neumático acoplados a un eje. En la lateral, se encuentra montado los neumáticos guía que ruedan sobre la barra guía lateral manteniendo el vehículo en la pista. La rueda metálica y el riel solo se utilizan en caso de emergencia, cuando ocurren pinchaduras o baja presión en el neumático, y para conmutación de pista [4].

El sistema de rodadura neumática proporciona una rápida aceleración, viajes suaves, y una respuesta de frenado eficaz; así también, permite el desplazamiento en pendientes con ángulos mayores en comparación con el sistema motriz de rodadura férrea. Todas estas características particulares del sistema neumático han hecho que este sea mayormente utilizado para el servicio en la Ciudad de México.

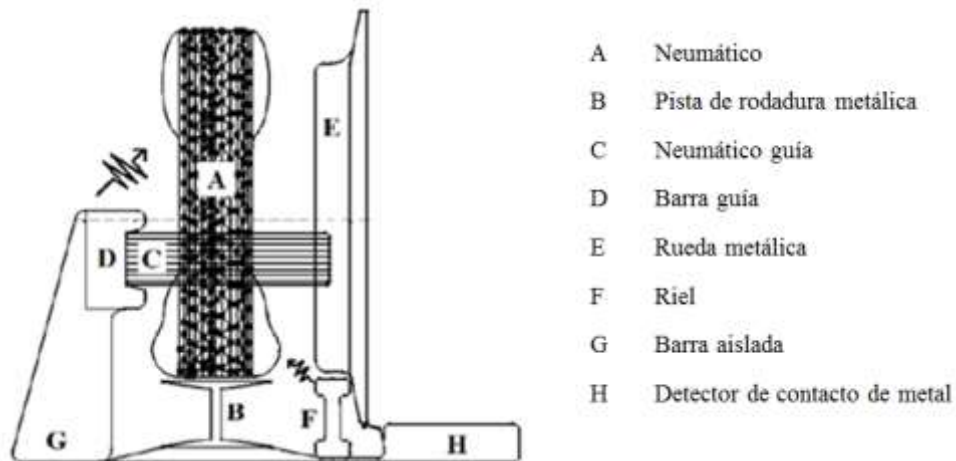


Fig. 1.2. Configuración de sistema motriz de rodadura neumática [4].

1.2 Planteamiento del problema

El sistema de rodadura neumática ha presentado pérdida de adhesión del neumático sobre la pista metálica durante los últimos 40 años. El problema se presenta en el ascenso y descenso de pendientes, así como en el arribo y partida de estaciones; los cuales se vuelven frecuentes y comunes en presencia de lluvia. Las consecuencias más comunes son: Retrasos en el servicio, lentos recorridos y sobrecupo entre estaciones, rebases de estación, alto consumo de energía, y estaciones concurridas, y muy probablemente la causa de accidentes [8].

La pérdida de adhesión provoca patinaje y deslizamiento durante la operación del tren; se presenta debido a que en la interfaz neumático/pista metálica de rodadura se encuentran depositados diversos contaminantes, tales como: Impregnaciones de grasa, aceite, polvo, contaminantes del medio ambiente, hule de las llantas, debris producidos por el desgaste natural de la pista, también basura acumulada en las estaciones, ver Figura 1.3. En muchas ocasiones, esta contaminación se queda en el contacto neumático/pista metálica generando una disminución importante en el coeficiente de fricción [9]. El trabajo de M. A. Cruz Gómez [4], determinó que los contaminantes que se depositan en la pista metálica de rodadura son la causa principal de la formación de protuberancias en la banda de rodadura de los neumáticos, dado que bloquean la zona de adherencia y las membranas de desalojo de agua, haciendo que el contacto superficial se reduzca entre un 20 y 30% [4]. La Figura 1.4, muestra recientes tomas fotográficas de las protuberancias que se generan sobre la banda de rodadura.

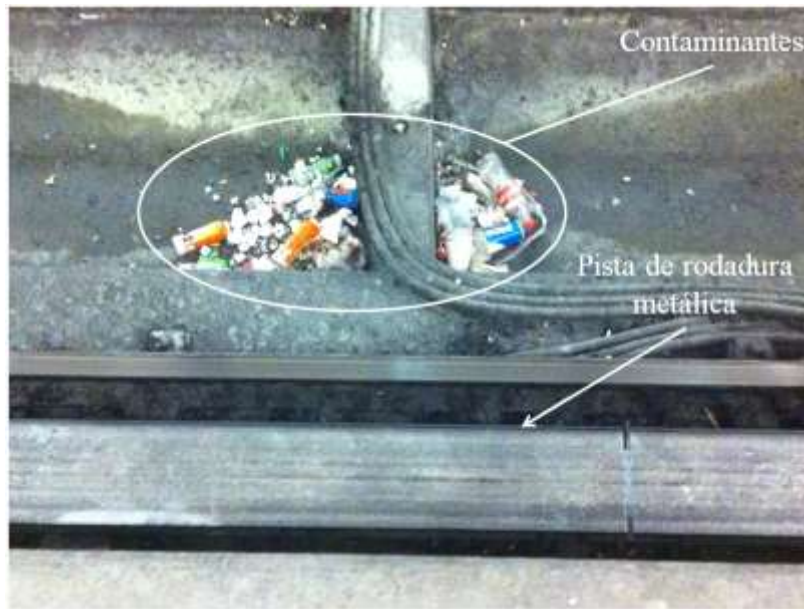


Fig. 1.3. Contaminantes en estación Tacuba Línea 7.



Fig. 1.4. Neumáticos del STCMetro con contaminantes.

1.3 Acciones para mitigar la pérdida de adhesión

A través de los años se han implementado acciones para disminuir el problema de adhesión, a fin de incrementar la seguridad y mejorar el servicio del metro. Entre las cuales se encuentran: Techar los tramos con pendientes a la intemperie, ver Figura 1.5, implantación de pilotaje automático, colocación de capas de diferentes modificadores de fricción sobre pistas de

rodadura, consignas de operación, ranurado de pistas metálicas, ver Figura 1.6, limpieza de pista metálica por medio de chorro de agua con partículas abrasivas, acoplamiento de cepillos rotatorios, rectificando de la cara superior de la pista de rodadura, y giro de pistas metálicas, aprovechando la rugosidad de su cara opuesta [4, 10].



Fig. 1.5. Zona techada en pendiente entre terminales Oceanía y Terminal Aérea.



Fig. 1.6. Pista metálica de rodadura con ranurado para mejorar la adhesión.

El departamento de ingeniería y nuevos proyectos del STCMetro, reporta que después de la evaluación de la aplicación de las soluciones, las acciones que dieron mejores resultados

fueron: Implantación de pilotaje automático, combinados con la limpieza y cambio de rugosidad de las pistas de rodadura [4].

Con todas estas acciones implementadas se ha logrado mitigar el problema entre el neumático y la pista, pero no se ha podido eliminar en su totalidad, además de los efectos secundarios que las soluciones presentaron. Ejemplos de ello, fue durante la limpieza con chorro de agua con partículas abrasivas, así como ranurado en pistas metálicas, logrando incrementar el coeficiente de adhesión en la interfaz neumático/pista metálica. Sin embargo, causaron daños y erosionaron la superficie de la pista metálica, lo que ocasiona una disminución considerable de su vida útil, reemplazando estas prematuramente [4].

Capítulo II. Limpieza criogénica

La limpieza criogénica es conocido por varios nombres, tales como: limpieza con chorro de CO₂, limpieza con chorro de hielo seco, o limpieza respetuosa con el medioambiente [1, 2, 3].

Es un método de limpieza en el cual se proyecta a presión un flujo de hielo seco en forma de pellets de tamaño de un arroz aproximadamente; los cuales son acelerados al combinarse con un flujo de aire a presión en un sistema mecánico de impulsión.

Por otro lado, en teoría la principal característica es que las partículas de CO₂ utilizadas pasan de estado sólido a gaseoso al impactar con una superficie. El resultado es la remoción de partículas contaminantes y menor cantidad de residuos al limpiar dicha superficie.

Esta técnica a diferencia del lavado con agua a presión y a otros métodos tradicionales de chorro en los que se utilizan agentes como micro esferas de vidrio o plástico, y agua a alta presión, es mucho más eficaz en la limpieza [11, 12].

2.1 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas incoloro, inodoro, químicamente inerte, no inflamable y no conduce electricidad; su estructura molecular está compuesta por 2 átomos de oxígeno y 1 átomo de carbono, y se encuentra en la atmósfera en una proporción de 0.036% [13]. Se produce de diversas fuentes, gran parte se genera por la combustión de hidrocarburos utilizados en el transporte y generación de energía, también es producto de la respiración de los seres humanos y animales, es empleado como nutriente por los vegetales. Para fines comerciales se recupera como sub – producto de refinerías de petróleo y gas, y de la producción de cemento, amoníaco y etanol. La Tabla 1, muestra los procesos que emiten mayor cantidad de CO₂ al ambiente [14].

Tabla 1. Actividades emisoras de millones de toneladas de CO₂ (MtCO₂) por año [14].

PROCESO	EMISIONES (MtCO ₂ /AÑO)
Combustibles Fósiles	
Energía	10,539
Producción de Cemento	932
Refinerías	798
Industria Siderúrgica	646
Industria Petroquímica	379
Refinamiento de Petróleo y Gas	50
Otras Fuentes	33
Biomasa	
Bioetanol y Bioenergía	91
Total	13,468

La Figura 2.1, muestra un diagrama de fases del dióxido de carbono, en el cual se puede observar cómo cambia de fase dependiendo de la presión y temperatura a la cual se encuentre; ilustra los valores de presión y temperatura a la cual se puede obtener pellets de CO₂ [15].

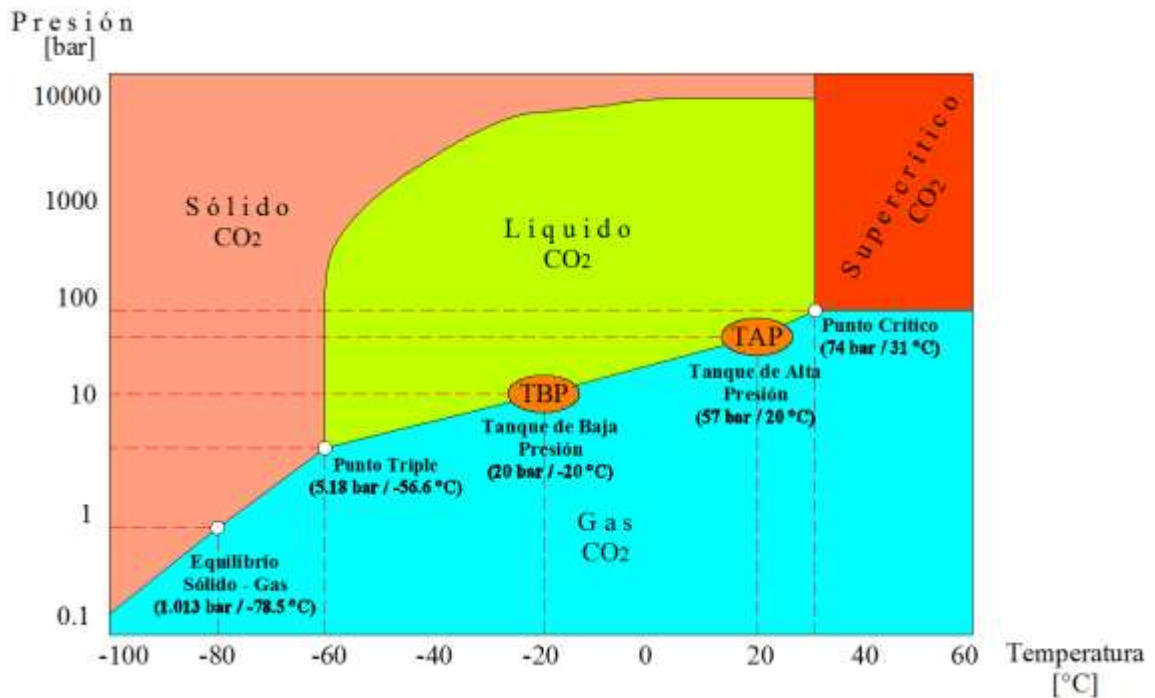


Fig. 2.1. Diagrama de fases del dióxido de carbono [15].

La Figura 2.2, muestra el proceso de generación de pellets; en donde el dióxido de carbono se encuentra en estado gaseoso a temperatura y presión ambiente con una densidad de 1833 kg/m^3 y un peso molecular de 44.01 g/mol . Para su almacenamiento es necesario comprimir el gas pasando a estado líquido y posteriormente se deposita en tanques a una presión y temperatura de 20 bares y $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente, o en tanques a una presión de 57 bares y una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ alcanzando un tiempo casi ilimitado de almacenamiento, de acuerdo al diagrama de fases [14, 16, 17]. Al liberar el dióxido de carbono líquido almacenado en el ambiente a presión ambiental de 1.013 bares, este se expande y se enfría por el efecto Joule – Thomson, generando dióxido de carbono en estado sólido o también llamado hielo seco sin forma definida a temperatura de $-78.5 \text{ }^\circ\text{C}$ [16, 17, 18]. Posteriormente, el dióxido de carbono sólido o hielo seco se comprime por medio de extrusor y molde para así generar pellets de forma cilíndrica como se observan en la Figura 2.3. Presentan un diámetro de 3 mm y una longitud entre 5 – 15 mm, que alcanzan una dureza de 2 – 3 Mohs similar a 60 – 100 Vickers, con densidad de 1560 kg/m^3 [19, 20].

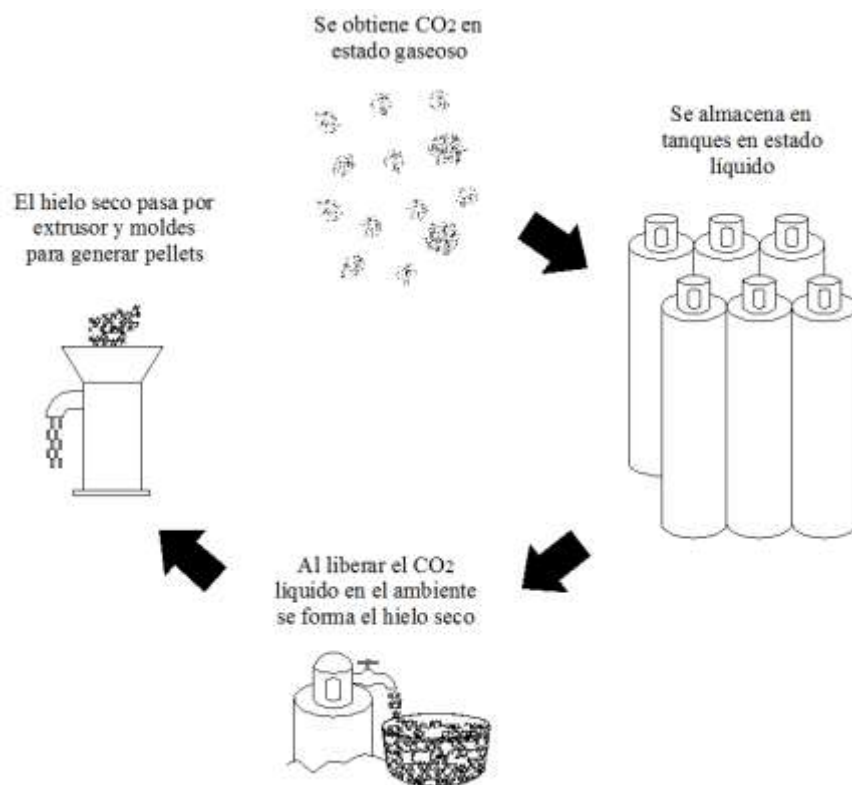


Fig. 2.2. Esquema de proceso de generación de pellets.

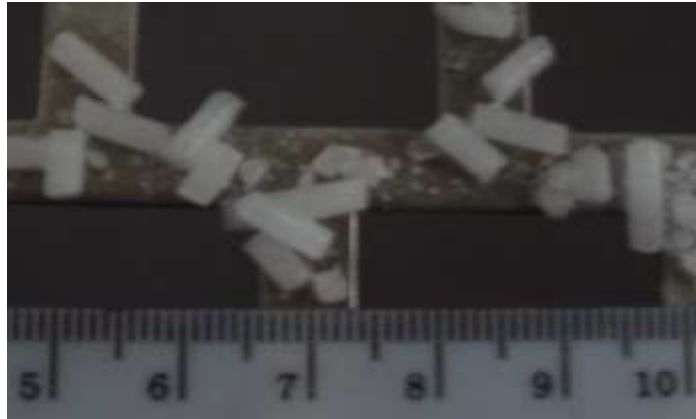


Fig. 2.3. Pellets de hielo seco.

2.2 Sublimación

En general los materiales se pueden presentar en diferentes estados físicos los cuales son: Sólido, líquido, gas y plasma. Éstos pueden cambiar de un estado a otro dependiendo de sus características químicas de cada material como es el punto de fusión y ebullición. En algunos casos, saltan del estado sólido a gaseoso sin pasar por el estado líquido, a este fenómeno se le conoce como *sublimación*. La limpieza criogénica, es un ejemplo típico de ello, donde es normal que ocurra este hecho de forma natural, ya que la temperatura del material a presión atmosférica es muy baja. Al ocurrir un cambio de temperatura en el ambiente se alcanza súbitamente como se observa en la Figura 2.4 [17, 18, 19].

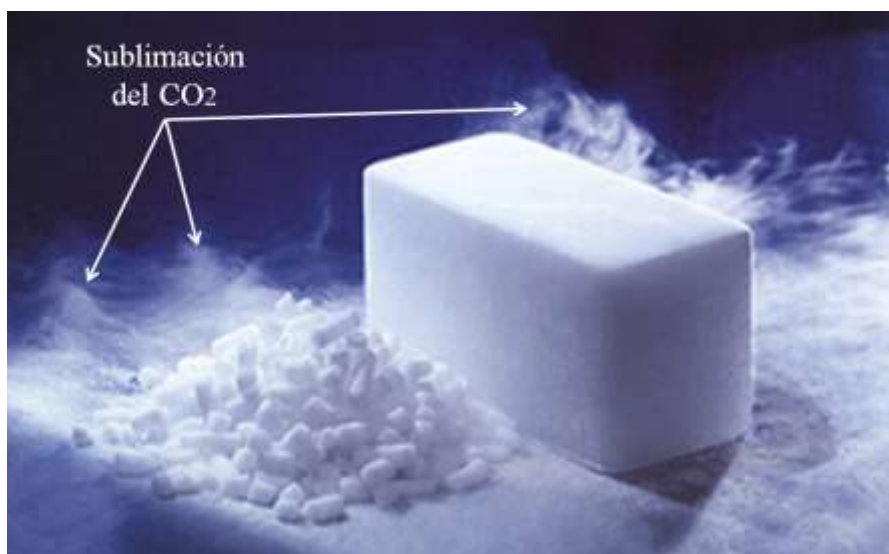


Fig. 2.4. Sublimación del CO₂ a temperatura y presión ambiental [63].

2.3 Mecanismo de la limpieza criogénica

En esta técnica, el elemento que impacta las superficies son partículas de dióxido de carbono (CO₂) en estado sólido con aire a presión, por lo cual posee una característica única ya que las partículas se subliman por el cambio de temperatura al tocar la superficie; el gas que se genera, se expande en milisegundos produciendo microexplosiones en el punto de impacto [19].

Los contaminantes y recubrimientos son desprendidos cuando la energía de adhesión es superada por la combinación de los mecanismos termo – mecánicos [11, 21]. El efecto térmico es causado por la temperatura que poseen los pellets de dióxido de carbono, que se encuentran a una temperatura promedio de -78.5 °C, produciendo a la vez que la superficie del sustrato se enfríe. Debido a esto, los contaminantes se fragilizan y se contraen, perdiendo adherencia sobre el sustrato, ver Figura 2.5.a) [22, 23]. Mientras que el efecto mecánico, es causado por el impacto de los pellets sobre las superficies, ver Figura 2.5.b), y por el incremento de presión durante la sublimación, ya que al pasar en fracciones de segundo al estado gaseoso, se generan ondas de choque por la expansión rápida de su volumen, creciendo cerca de 800 veces, ocasionando a la vez, microexplosiones sobre el material, ver Figura 2.5.c) [17, 18, 19].

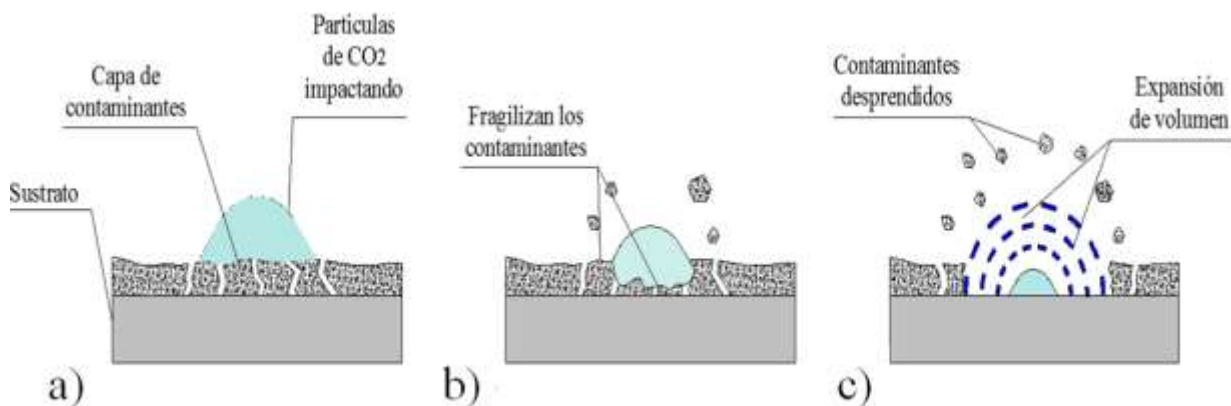


Fig. 2.5. Mecanismo de la limpieza criogénica.

Se han evaluado diversos ángulos de aplicación de la técnica entre 60° y 90°, se concluyó que el ángulo de 90°, presenta el mejor desempeño de limpieza [1, 37, 42]. Este resultado fue debido a la fuerza con la que se proyectan las partículas de CO₂, las cuales chocan en dirección normal aprovechando los efectos mecánicos que proporciona el impacto de los pellets sobre las superficies; mientras que al variar el ángulo, las partículas son proyectadas en una dirección

resultante que a su vez distribuye las partículas en sentido X y Y, como se indica en la Figura 2.6.a) y 2.6.b). La distancia de trabajo es independiente, ya que las componentes estáticas y dinámicas de la fuerza máxima de impacto no se encuentran relacionadas con éste [1, 37, 42].

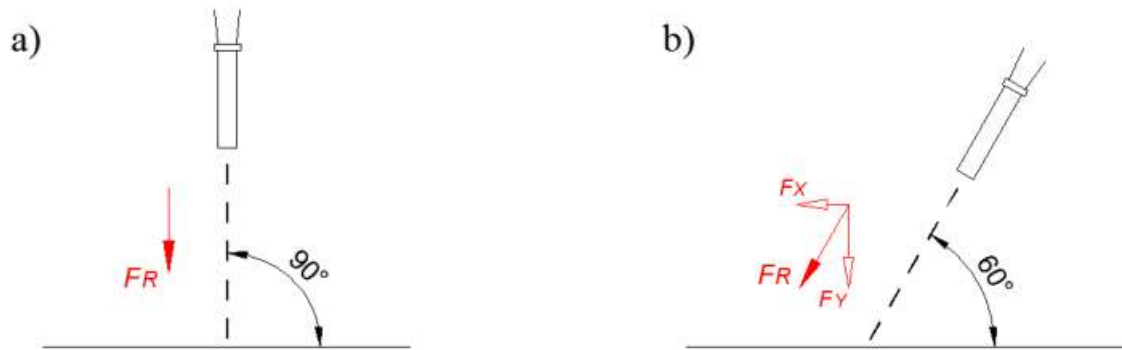


Fig. 2.6. Esquema de ángulos de aplicación; a) partículas impactadas a 90° , b) partículas impactadas a 60° .

2.4 Riesgos del uso y manejo de la limpieza criogénica

El proceso de limpieza criogénica cuenta con una serie de elementos que si no se hace un uso adecuado al realizar la tarea pueden ocasionar lesiones; ya sea por ruido, toxicidad de la materia prima, la extrema temperatura de trabajo y las partículas dispersadas.

2.4.1 Ruido durante el proceso

El ruido o emisiones acústicas pueden ser ocasionados como resultado de tres factores:

- Compresor o equipo de generación de presión; éstos mantienen un promedio entre 70 – 75 dB [24, 25, 26].
- El chorro que viaja a través del aire, se genera debido a la alta velocidad de éste y el aire del medio ambiente, que además puede causar turbulencias. En consecuencia, el nivel de ruido del aire aumenta con la presión de trabajo, de manera casi lineal como se muestra en la Figura 2.7 [24, 25, 26].
- El choque sobre el elemento a limpiar; se presenta durante el impacto de la herramienta, y depende de las propiedades acústicas del material a ser sometido y del dióxido de carbono [24].

Al comparar los niveles de ruido de otros procesos que se llevan a cabo en la industria, se ha encontrado que en algunas ocasiones se logra alcanzar niveles muy altos; por lo que la exposición de tiempo permisible del ser humano sin protección es muy corta, como lo indica la Figura 2.8 [24, 26].

Para reducir los efectos del ruido es necesario hacer uso de protectores para evitar daños irreversibles al sistema auditivo. Para ello se recomienda utilizar ya sea tapones u orejeras, los cuales aíslan el pabellón auditivo externo [24, 25, 26, 27].

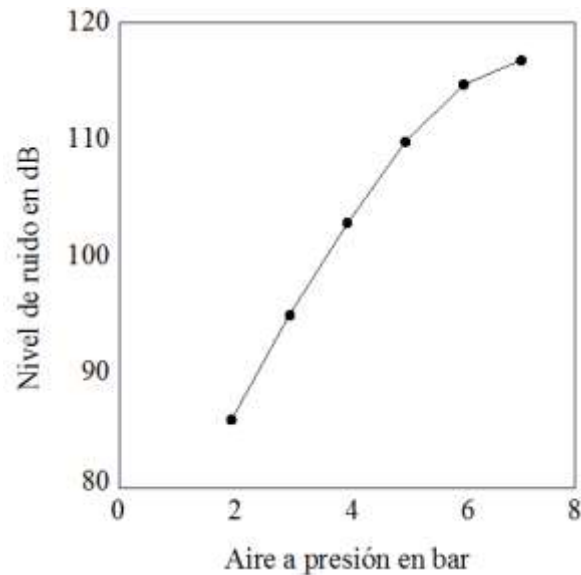


Fig. 2.7. Efecto de la presión del compresor en el nivel de ruido [24].

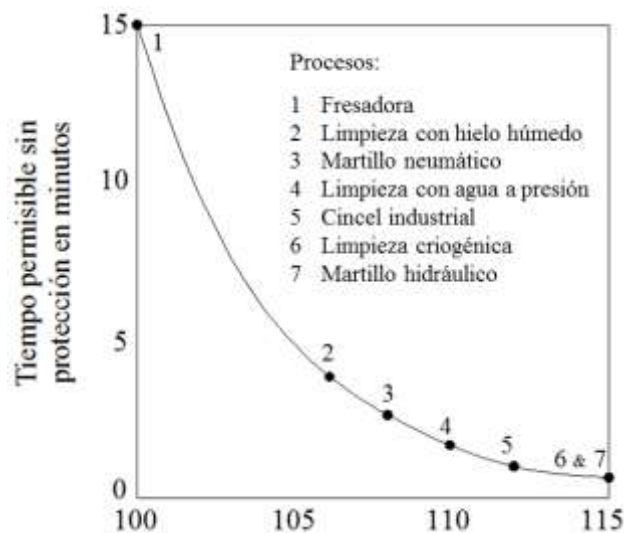


Fig. 2.8. Tiempos de exposición críticos para diferentes procesos [24].

2.4.2 Temperatura

Las partículas o pellets de dióxido de carbono sólido como materia prima, se encuentran a una temperatura promedio de $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; por lo que es necesario hacer uso de equipo de protección personal, como careta, guantes, polainas, de manera preventiva [27, 28].

2.4.3 Partículas desprendidas de la superficie

Existe un riesgo potencial, ya que las partículas de los contaminantes que se retiran del sustrato salen proyectadas en diferentes ángulos.

2.4.4 Toxicidad

El dióxido de carbono no es tóxico en pequeñas concentraciones, pero si se supera el contenido de oxígeno en áreas cerradas el riesgo de asfixia es grande; donde una concentración en el volumen de CO_2 del 3 – 5% puede afectar la frecuencia cardiaca y la respiración, en algunos casos causar mareo y dolor de cabeza. En concentraciones superiores al 7% del volumen, ocasiona pérdida de conciencia y con un aumento mayor en la concentración puede conducir a la muerte [27, 28].

Por ello, es necesario mantener una buena ventilación en el área de trabajo; pero a la vez se debe tomar en cuenta la captura y almacenaje de CO_2 para no producir emisiones de dañinas a la atmósfera, y no causar un impacto ambiental.

2.5 Impacto ambiental del CO_2

Los gases como el CH_4 , el N_2O , y el CO_2 que se encuentran en la atmósfera, son denominados *gases de efecto invernadero* (GEI) y tienen mayor impacto en la temperatura, ya que alteran el flujo natural de energía, de manera que al existir mayor cantidad de GEI la temperatura que alcanza la superficie del planeta es mayor [29, 30, 31].

El gas de GEI más abundante que se encuentra en la atmósfera es el CO_2 , su concentración ha aumentado en 31% desde el inicio de la revolución industrial en 1750, la del CH_4 en 151% y la

del N₂O en 17% a partir del mismo año [14]; la Figura 2.9, muestra el aumento de temperatura y concentración de CO₂ con el paso del tiempo.

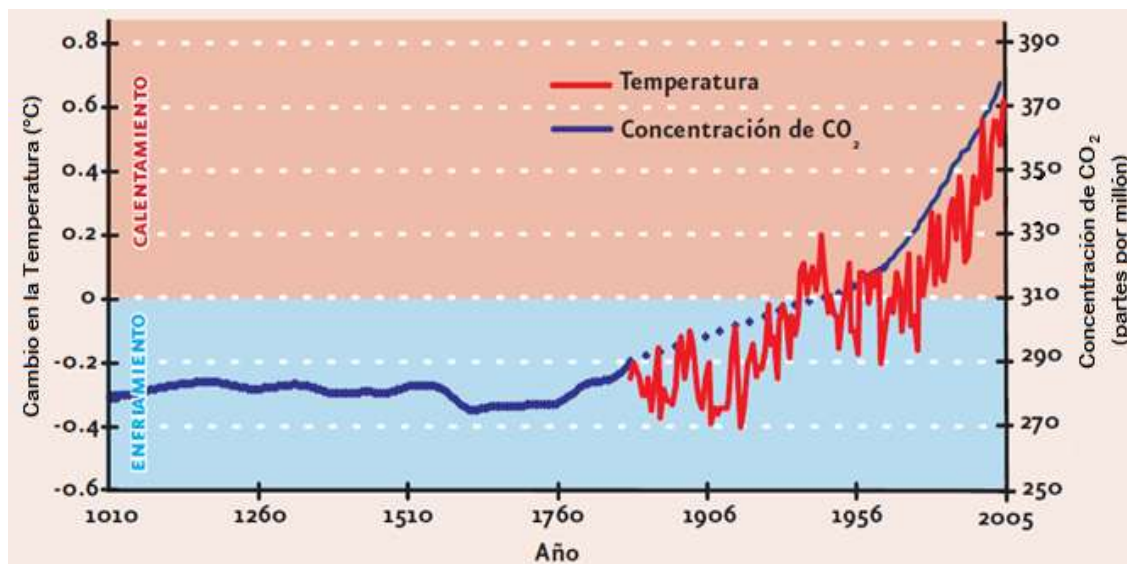


Fig. 2.9. Aumento de temperatura y concentración de CO₂ [32].

Asimismo, el *Protocolo de Kioto* que entró en vigor el 16 de febrero del 2005; establece que las naciones contribuyan a la reducción de las emisiones de GEI, definiendo compromisos obligatorios para los países industrializados con el fin de que reduzcan un promedio de 5.2% sus emisiones con respecto de los niveles del año 1990 [33, 34, 35, 36].

2.6 Origen del CO₂ sólido y de la limpieza criogénica

A principios de la década de 1930 se manufacturó con fines experimentales, por primera vez, una máquina para producir el dióxido de carbono en estado sólido. Posteriormente, se desarrollaron aplicaciones industriales, usadas principalmente para la industria alimenticia y para el envasado y protección de alimentos percederos. En 1945, la marina de Estados Unidos experimentó utilizando el hielo seco en chorro a presión para aplicaciones de desengrase; en el año de 1963 el R. Lindall obtuvo una patente con el nombre de “Método para remover porciones de carne adheridas al hueso” usando un proceso similar basado en la proyección de partículas de dióxido de carbono sólido a chorro, dando inicio así a la técnica de limpieza criogénica que hoy en día se conoce. A finales de la década de los 70’s se desarrolló la técnica

en gran medida haciendo uso de la misma en diversas aplicaciones, siendo una alternativa innovadora en comparación con otros métodos tradicionales de limpieza para el mantenimiento de equipos industriales y sus componentes, limpiando prácticamente todo tipo de superficies, sin necesidad de desarmar ni rearmar las mismas. En la actualidad, existen diversos fabricantes y proveedores de equipos de limpieza criogénica alrededor del mundo con conceptos de diseño muy particulares para satisfacer una necesidad específica [1, 12].

Se han realizado múltiples estudios que presentan como ventaja el hecho de que no existen residuos sólidos posteriores al proceso de limpieza por chorro de agua (con y sin partículas abrasivas), dado que el hielo seco se sublima directamente al golpear la superficie, alcanzando súbitamente la fase gaseosa. Esto, representa una reducción de costos en comparación con otros procesos de limpieza, donde los residuos sólidos requieren algún tratamiento especial y manejo posterior al ensayo. La acción de los pellets de hielo seco al pasar a estado gaseoso significa que ningún elemento sólido permanece en cavidades de las piezas mecanizadas, aunado a que no es necesario algún proceso de secado [37, 38].

Asimismo, se han llevado a cabo investigaciones de limpieza criogénica para remover capas de plástico o hules de moldes metálicos utilizados en la fabricación de neumáticos, interiores automotrices, moldes para botellas y productos moldeados por soplado; como proceso para despintar superficies. Los resultados han demostrado que su uso no daña el perfil, ni cambia las dimensiones de las superficies y zonas cercanas donde se produce el impacto, debido a su baja dureza en comparación con otros métodos con aire a presión; es decir, que es una excelente opción para limpiar piezas de precisión donde las alteraciones geométricas son indeseables [15, 22, 39, 40, 41].

Las distancias de proyección analizadas que señalan que no se produce modificación en las superficies con el uso de la técnica mencionada, han sido determinadas para un rango entre 50 a 450 mm. Según las recomendaciones emitidas por los fabricantes de equipos de limpieza criogénica, el ángulo ideal de impacto de las partículas que expulsa la boquilla respecto a la superficie de trabajo debe de ser de 90° a distancia de 50 mm. En el caso de que aumente esta última, lo que significa que un mayor número de partículas de dióxido de carbono pueden

sublimarse debido al mayor tiempo de exposición al ambiente, la eficacia se notaría disminuida [37, 42].

Contrariamente a lo que se supone, las partículas de hielo seco como no abrasivas con una dureza similar al sulfato de calcio y carbonato de calcio; causan daños en materiales compuestos de polímeros y termoplásticos, como lo han demostrado los estudios de microscopía óptica y perfilometría en función del tiempo de exposición y velocidades altas [2, 43].

Por otra parte, se ha definido la *densidad de potencia* como la característica de importancia crítica de la limpieza criogénica; se determina como la potencia por unidad de área, donde cada partícula que impacta con cierta energía cinética sobre un área del material, la deforma plásticamente, ver Figura 2.10. Se encuentra expresada por la siguiente ecuación [43, 65]:

$$Pi = \frac{\dot{m} v_p^2}{2A_s} \quad (1)$$

Donde:

Pi = densidad de área (W/m^2)

\dot{m} = flujo de partículas (kg/seg)

v_p = velocidad de las partículas (seg)

A_s = área de impacto (m^2)

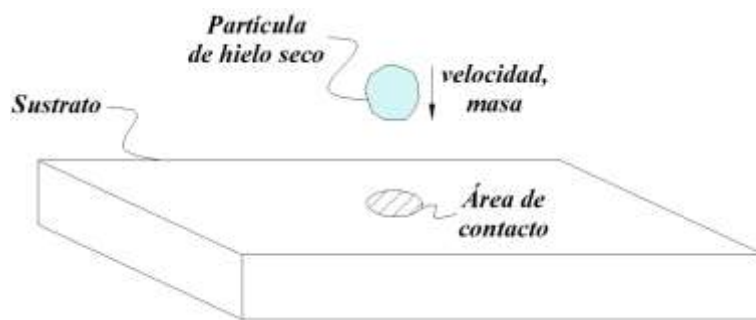


Fig. 2.10. Mecanismo de densidad de potencia.

Por otra parte, en recientes investigaciones, se afirma que el CO₂ sólido presenta una dureza baja [2, 43, 53], materiales metálicos como: Níquel, cromo, y aluminio sometidos a la limpieza

criogénica, sufren daño superficial en menor medida comparado con los métodos a chorro convencionales [2, 43, 44]. También, se ha encontrado que la técnica sirve como un pretratamiento para mejorar la adhesión de pegamentos epóxicos y de poliuretano en aleaciones de aluminio, ya que logra eliminar materiales orgánicos, películas de grasa y/o aceite, e impurezas depositadas en la superficie. Se ha encontrado, que en tiempos de trabajo iguales o superiores a 20 segundos de exposición con un ángulo de impacto de 90° , funciona como erosión por partículas sólidas a chorro modificando la superficie y aumentando los valores de rugosidad Ra [3, 45].

2.7 Erosión por partícula sólida (EPS)

La erosión por partícula sólida (EPS), proyectada a través de aire a presión es muy común en aplicaciones industriales; como sucede en los álabes de turbinas, tuberías, válvulas, y tolvas de manejo de materiales a granel, entre otras. La Figura 2.11, ilustra la variación de erosión con respecto al ángulo de impacto en materiales dúctiles y frágiles. El primero, sufre una tasa de erosión máxima a un ángulo de impacto de aproximadamente 20° . Por otra parte, en dirección normal presenta una mejor resistencia a este tipo de desgaste. Mientras en materiales frágiles, la erosión severa se presenta a un ángulo de 90° ; pero su resistencia a EPS se incrementa a ángulos pequeños [46, 47, 48].

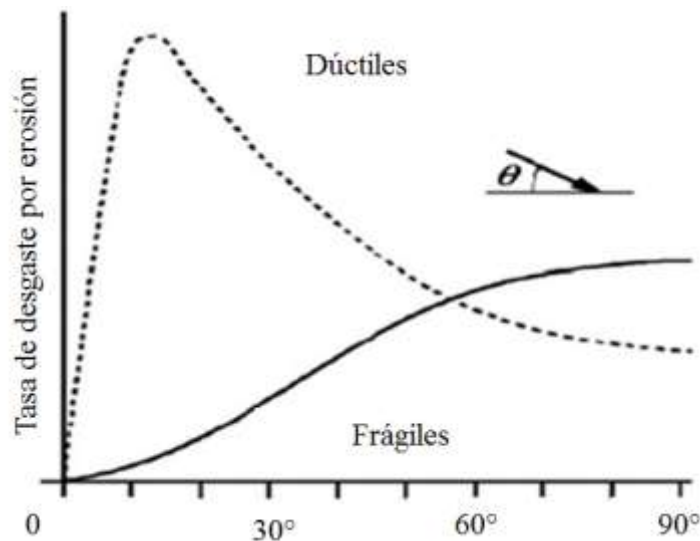


Fig. 2.11. Gráfica de tasa de desgaste por erosión para materiales dúctiles y frágiles con respecto al ángulo de impacto [48].

El efecto de erosión de las superficies de los sólidos, es atribuido a la pérdida de material causado por las pequeñas partículas sólidas que impactan continuamente a superficies. El desgaste, va a depender del material expuesto y de las propiedades mecánicas y geométricas de las partículas incidentes [49]. Se considera que esta pérdida, ocurre como consecuencia de la deformación plástica generada sobre la superficie del material, así como, la formación de grietas y fisuras, que en algunas ocasiones terminan en fracturas o desprendimiento de partículas de diferentes tamaños. También, se puede observar la inclusión de partículas abrasivas sobre la superficie de los especímenes como se muestra en el esquema de la Figura 2.12 [50].

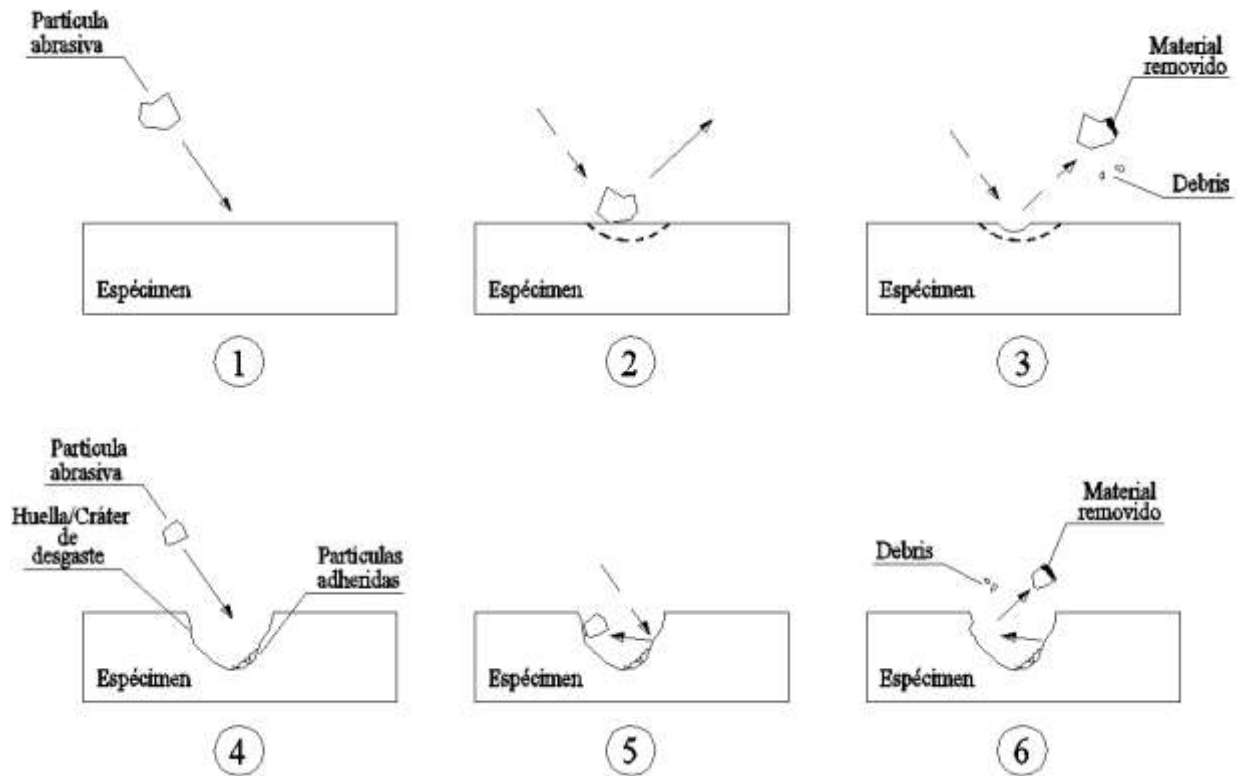


Fig. 2.12. Mecanismo de erosión por partícula sólida [47].

En los estudios de EPS llevados a cabo se ha observado que además del ángulo de impacto existen otros parámetros de la partícula que generan daño, como son: *Dureza* y *velocidad de impacto*. Al variar una de ellos o ambos, la superficie experimenta un cambio superficial por impacto violento [51, 52]. Asimismo, otro parámetro de gran importancia, ligado con los anteriores, es el *flujo de partículas*. A mayor flujo, el diámetro de la huella de desgaste es más

grande. En cambio, al ser menor éste, las partículas se localizan en una zona de área más pequeña. También, se puede alcanzar mayores velocidades de trabajo con un flujo menor a una presión de aire establecida. Lo anterior se debe, a que las partículas son dispersadas con mayor facilidad, dado que no provocan un *efecto Venturi* en la salida de la boquilla [53, 54].

2.8 Erosión por cavitación

El fenómeno de erosión por cavitación, se presenta a causa de la presión impulsiva generada por el continuo colapso de burbujas sobre la superficie del material. Su formación, se origina por la disminución de presión en el líquido. Este proceso se describe en las siguientes etapas, ver Figura 2.13 [55, 56, 57, 58, 59]:

1. Formación de numerosas burbujas de aire microscópicas en el líquido [55, 56].
2. Las burbujas recién formadas se expanden o se agrandan en el líquido [55, 56].
3. La presión externa ejercida sobre las burbujas recién expandidas se comprimen, aumentando la temperatura del vapor contenido en ellas [55, 56].
4. Por último las burbujas colapsan, ocasionando la liberación de una enorme cantidad de energía al impacto con la superficie [55, 56].

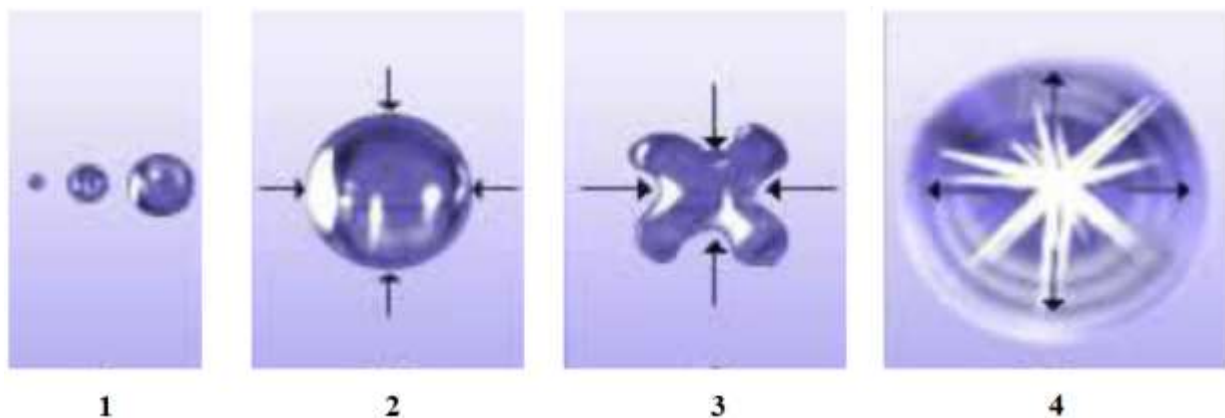


Fig. 2.13. Formación de burbujas y fenómeno de implosión de la erosión por cavitación [55].

Recientes investigaciones han demostrado que especímenes de bajo carbono sujetos a condiciones de cavitación presentan cuatro etapas de pérdida de peso con el paso del tiempo [59, 60, 61]. En donde la etapa inicial está caracterizada por el alto índice de pérdida de peso y

una segunda etapa que presenta un índice de remoción de material muy bajo llamada etapa de incubación, en ambas no existen cambios significantes en la superficie de las probetas; en la tercera etapa se logra observar una aceleración en el proceso de pérdida de peso y la formación de picaduras y grietas; finalmente se presenta la etapa de tasa máxima, en donde se observa cráteres y material removido por la acumulación de deformación plástica produciendo fractura por fatiga [59, 60, 61]. Además, se evaluó la dureza superficial del material posterior a la prueba encontrando resultados que muestran que los valores de dureza aumentan un promedio de 5 unidades Vickers por cada 5 minutos de exposición hasta alcanzar un tiempo de 15 minutos, y posteriormente se logra obtener un valor constante.

Por medio de pruebas experimentales, se determinó que mecánicamente este fenómeno es causado inicialmente por fatiga, para dar paso a la fractura, existiendo un valor límite por encima del cual, las cargas comienzan a contribuir a la fatiga del material. Misma que se genera a lo largo de la superficie de impacto, desprendiendo partículas residuales, lo que a la vez genera picaduras, grietas y cráteres con formas irregulares [57, 58].

Capítulo III. Diseño Experimental

3.1 Pruebas preliminares

Para conocer el potencial de utilizar la técnica de limpieza criogénica sobre superficies metálicas de pista de rodadura y neumático del STCMetro, se llevó a cabo una visita a una empresa manufacturera de sellos y empaques de plástico tipo “O – ring” en la Ciudad de Cuautla, Morelos. En ella se utiliza esta técnica como método de limpieza para retirar material remanente de moldes a alta temperatura. Durante la demostración se observó, que la eficiencia de la técnica, dado que, la superficie tratada queda totalmente limpia, sin evidencia de restos de polímero ni daño superficial.

Básicamente, se llevaron a cabo pruebas sobre la superficie metálica como se muestra en la Figura 3.1.a). Durante el ensayo, se verificó la capacidad de remoción de óxido sobre la superficie variando ángulos y distancias de la boquilla. Se observó un evidente cambio de temperatura y una eficaz remoción de óxido de la superficie metálica. Además, se probó sobre una sección de neumático con protuberancias sobre la banda de rodadura, ver Figura 3.1.b), donde el impacto del chorro de hielo seco, se encuentra influenciado por la curvatura de la banda de rodadura del neumático; hubo una remoción de contaminantes junto con material base, esto demuestra que el método de limpieza criogénica no es funcional para materiales polímeros bajo estas condiciones.

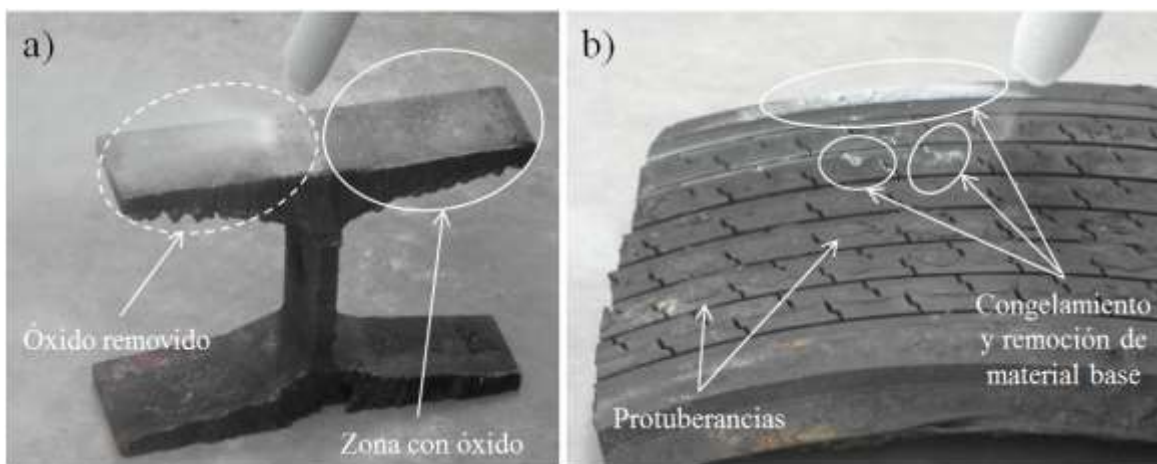


Fig. 3.1. Pruebas preliminares de la técnica; a) pista de rodadura, b) neumático.

Asimismo, se llevaron a cabo ensayos preliminares complementarios en el laboratorio de tribología de la SEPI-ESIME-UZ-IPN. Para ello, se utilizó la pista de rodadura con óxido y aceite como contaminantes, y una sección de neumático con protuberancias. Se pudo corroborar visualmente la eficiencia de la técnica sobre la pista de rodadura al retirar el aceite en su totalidad, además el óxido fue removido al prolongar el tiempo de exposición, ver Figura 3.2.a). Por otra parte, en la sección de neumático con protuberancias se pudo lograr el desplazamiento de las mismas junto con material base, en el que se presentó un cambio de temperatura, ver Figura 3.2.b).

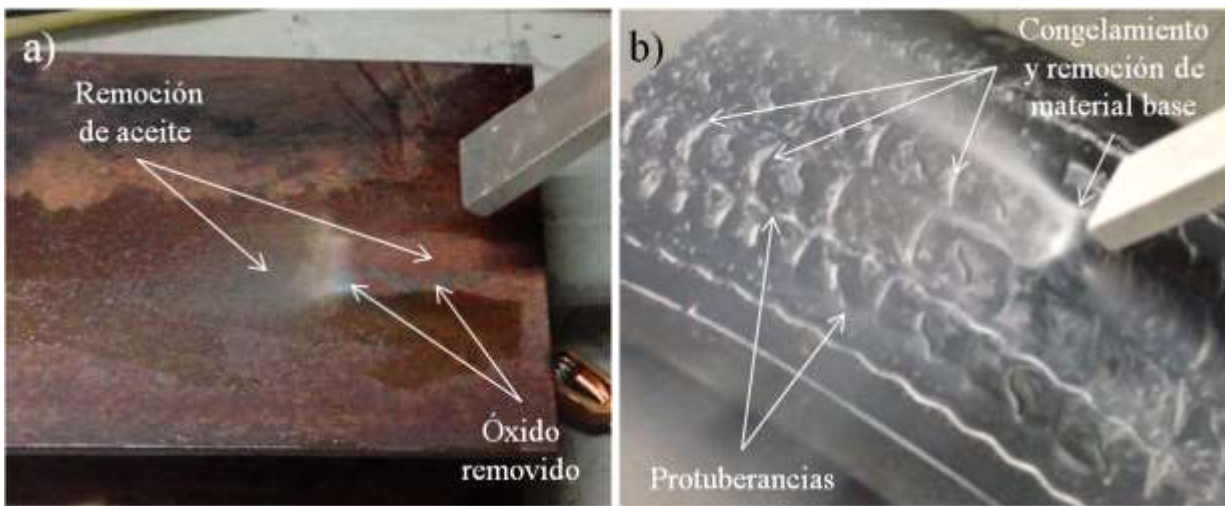


Fig. 3.2. Pruebas en laboratorio; a) pista de rodadura, b) neumático.

3.2 Sistema de limpieza criogénica

Este sistema se encuentra constituido por una unidad de chorro modelo AeRO 75 – DX, marca ColdJet acondicionado con control que permite variar el flujo de pellets, cuenta con un manómetro para monitorear la presión de aire suministrado. Contiene una tolva para el hielo seco, unidad mezcladora de aire y pellets. En uno de sus extremos, se encuentra conectada una manguera de 25.4 mm de diámetro y longitud de 6 metros, al final se localiza una boquilla de salida de aluminio, con geometría definida de 13 mm de longitud por 4.5 mm de ancho. Se requiere de un suministro de aire, proporcionado por un compresor, con una presión máxima de 9 bares. La Figura 3.3.a) y 3.3.b) muestra un diagrama esquemático y una imagen del sistema conformado.

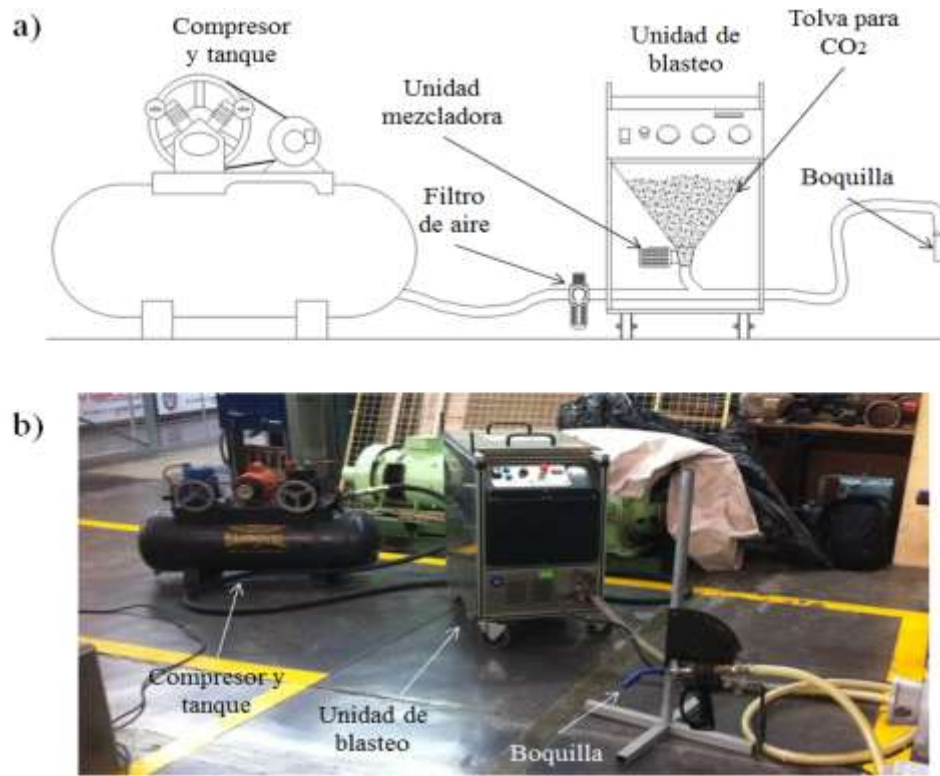


Fig. 3.3. Sistema de limpieza criogénica; a) diagrama, b) equipo utilizado.

3.2.1 Dispositivos sujetadores

A fin de lograr una distancia óptima y un adecuado ángulo de impacto, se diseñó un dispositivo sujetador de espécimen y boquilla. Las Figuras 3.4.a) y 3.4.b) muestran el sistema desarrollado.

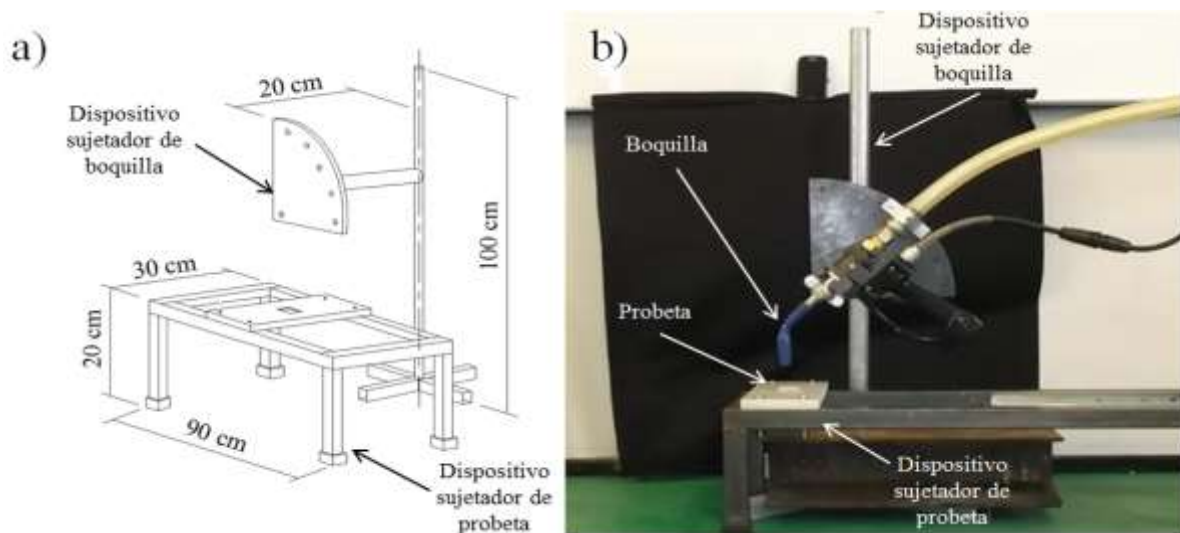


Fig. 3.4. Dispositivo sujetador de boquilla y probeta; a) diagrama, b) sistema utilizado.

3.3 Selección de flujo

Se propusieron flujos de pellets de 1 y 2 kg/min, los cuales fueron grabados durante 10 segundos para posteriormente analizar los videos, a fin de obtener la velocidad de las partículas incidentes, ver Figuras 3.5.a). y 3.5b).

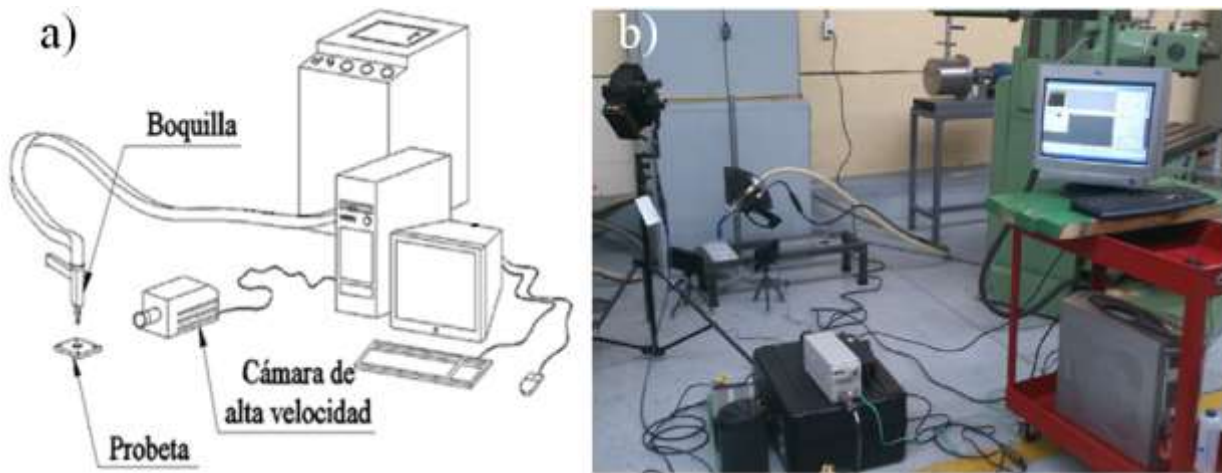


Fig. 3.5. Captura de videos con cámara de alta velocidad; a) diagrama, b) equipo utilizado.

La Figura 3.6, muestra el análisis de las partículas en una imagen capturada.

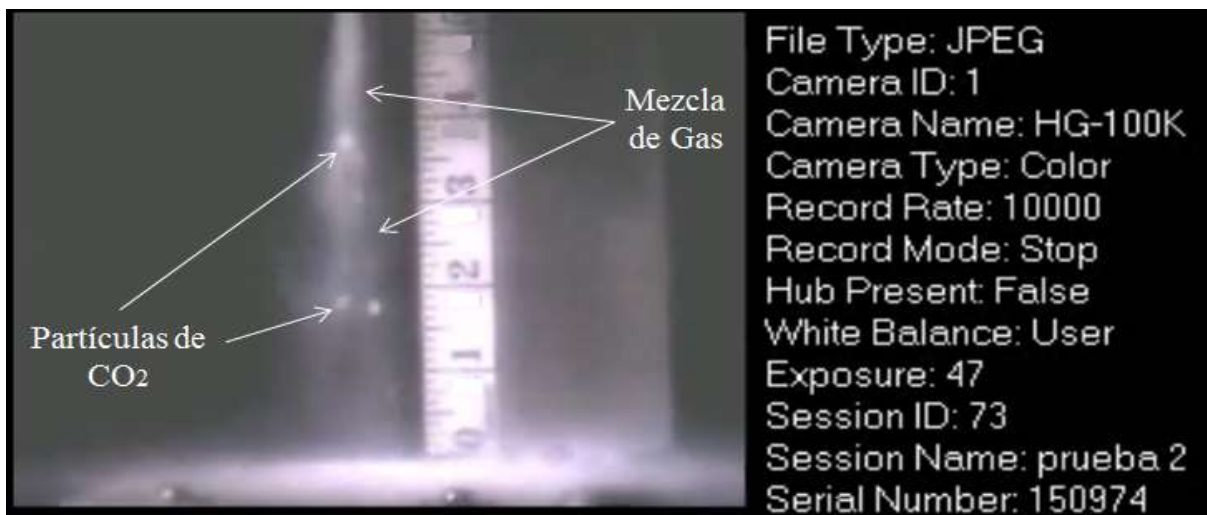


Fig. 3.6. Imagen tomada a 1/10,000 segundos.

Mientras que la Figura 3.7, presenta una gráfica de velocidades de salida de las partículas con respecto al tiempo de exposición, se obtuvo a partir de:

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Donde:

v = velocidad de salida de las partículas (m/s)

d = distancia (m)

t = tiempo (seg)

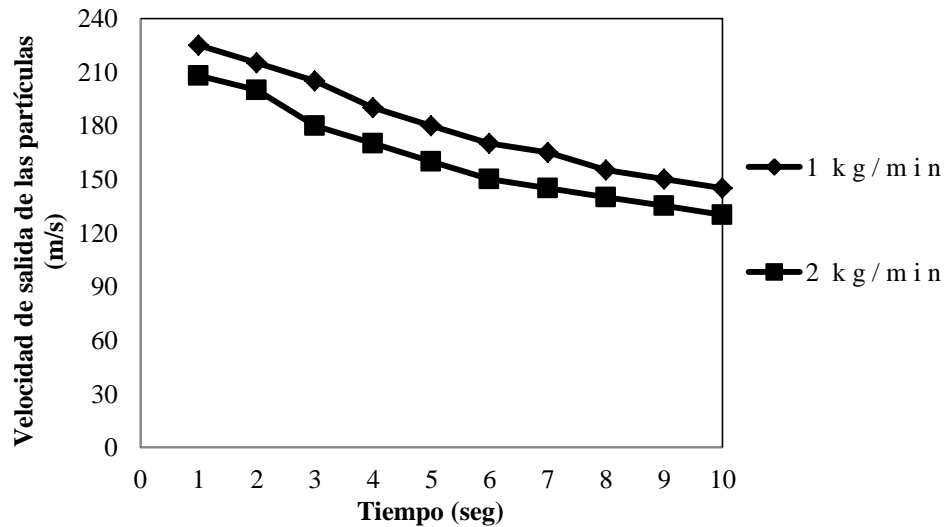


Fig. 3.7. Gráfica de velocidad de las partículas con flujos de 1 y 2 kg/min.

Se observó que la velocidad desciende como consecuencia de la caída de presión del sistema de compresión; también se encontró que a menor flujo los valores de velocidad son mayores. Por esta razón, se seleccionó el flujo de 1 kg/min para realizar los ensayos respectivos.

Posteriormente, se comprobó que el CO₂ a la salida de la boquilla es expulsado en forma de mezcla que contiene gas y partículas sólidas con geometría irregular con un diámetro, aproximado de 3 mm; aunque pueden existir partículas de menor tamaño. Lo anterior, muestra que durante el recorrido a través de la manguera, un porcentaje de pellets se sublima. En la Figura 3.8.a), se observa un esquema del proceso, mientras que la Figura 3.8.b), presenta una fotografía del mismo.

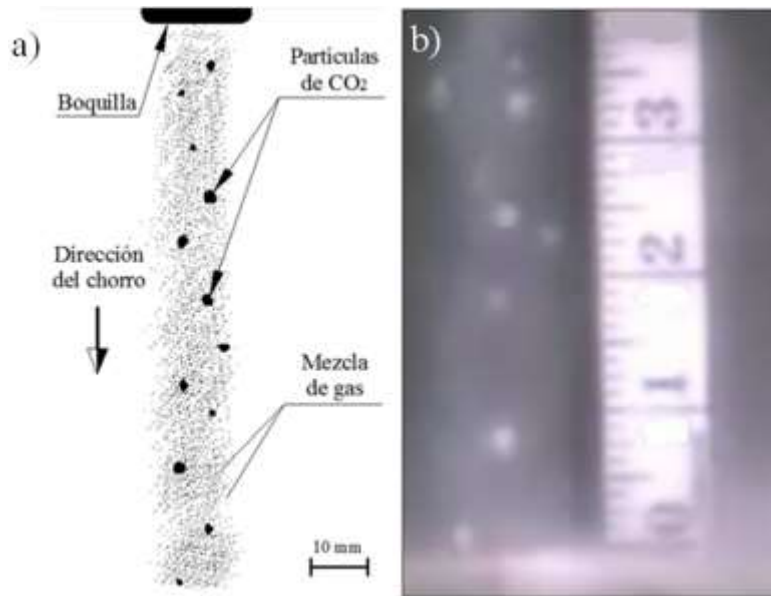


Fig. 3.8. Flujo a la salida de la boquilla; a) esquema de proceso, b) imagen 1/10,000 s.

Por medio de las grabaciones, se contabilizó el flujo de partículas sólidas a la salida de la boquilla durante un minuto de trabajo que fue de 0.6864 kg/min. Por lo cual, el porcentaje del flujo inicial que se sublima durante el uso de la técnica de limpieza criogénica fue de 31.36%.

3.4 Cámara de alta velocidad

Se utilizó una cámara digital de alta velocidad modelo MotionXtra HG – 100K marca Redlake, ver Figura 3.9, con las especificaciones técnicas que se presentan en la Tabla 2; equipada con el software MotionCentral para procesamiento y análisis de imágenes.



Fig. 3.9. Cámara de alta velocidad MotionXtra HG -100K Redlake.

Tabla 2. Especificaciones de cámara de alta velocidad [64].

Especificaciones de MotionXtra HG - 100K	
CMOS de imágenes	
Resolución de imágenes	Hasta 1504 x 1128 a 1000 cps; 24 bits a color, 8 bits a mono
Rango dinámico	62 dB en sensor a 25°C de temperatura ambiente
Tasa de memoria y grabación	
Memoria disponible	2 GB y 4 GB modelos disponibles
Tasas de grabación	25 a 100 000 cps; velocidad de cuadro variable
Control de cámara	
Tasa de disparador	Posición variable hasta la máxima capacidad de marco disponible
Selección de tiempo	Cada cuadro, la referencia seleccionable
Retículo	Pantalla completa con coordenadas X, Y de visualización
Software	
Control de software	MotionCentral®; Windows 2000 y compatible con XP
Formatos de archivo	TIFF, JPEGm y AVI
Descripción mecánica	
Dimensión de cámara	135 mm Altura x 105 mm Ancho x 282 mm Largo
Peso de cámara	5 kg
Condiciones generales	
Fuente para cámara	24 a 50 VDC @ 40 W
Temperatura de operación	0°C a 45°C ambiente

3.4.1 Calibración de cámara de alta velocidad

Inicialmente, se empleó granos de arroz para realizar una calibración de la cámara, a fin de medir el tiempo de recorrido respecto a una distancia conocida, con una tasa de captura de 10,000 imágenes por segundo; una de ellas se muestra en la Figura 3.10.

Tabla 3. Composición química de la pista de rodadura metálica [62].

ELEMENTO	% PESO
Carbono (C)	≤ 0.30
Fósforo (P)	≤ 0.05
Azufre (S)	≤ 0.06
Nitrógeno (N)	≤ 0.009
Manganeso (Mn)	$0.03 \leq Mn \leq 0.90$
Hierro (Fe)	El resto

La probeta se manufacturó para obtener una forma cuadrangular con dimensiones de 30 mm y espesor de 8 ± 0.5 mm, se lijó y pulió para obtener un acabado superficial uniforme como se muestra en la Figura 3.12.

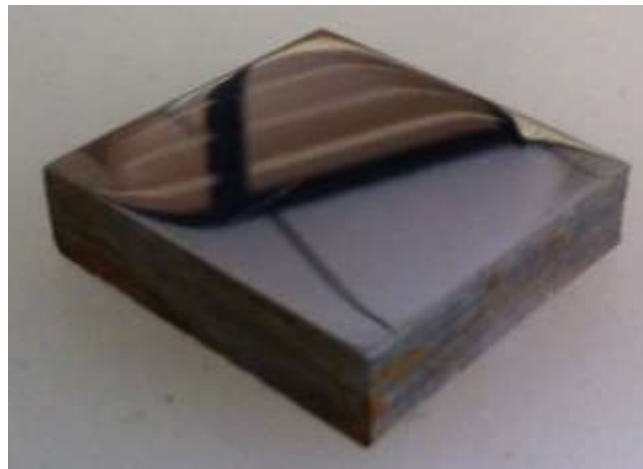


Fig. 3.12. Manufactura de probeta.

3.5.1 Peso

Se empleó una báscula marca Scientech modelo SA – 120, para registrar el peso que fue de 45.3209 gr, ver Figura 3.13.



Fig. 3.13. Báscula Scientech modelo SA – 120.

3.5.2 Dureza

Se realizaron 10 pruebas de dureza Vickers en diversas zonas sobre la superficie de la probeta a fin de obtener un promedio que fue de 158.9 HV, a una carga de 500 gf por 15 segundos, para ello se empleó un microdurómetro marca LECO modelo LM 700, ver Figura 3.14.



Fig. 3.14. Microdurómetro LECO modelo LM 700.

3.5.3 Rugosidad

Se obtuvo la rugosidad promedio en diferentes zonas a través de la superficie de la probeta, con valor de 0.0188 Ra, empleando un rugosímetro marca Mitutoyo modelo SJ – 210, ver Figura 3.15.



Fig. 3.15. Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ - 210.

3.5.4 Perfil

Se empleó un perfilómetro marca Mitutoyo modelo CV 500 y con software Formpak para procesar datos, ver Figura 3.16; el perfil de la superficie obtenido se muestra en la Figura 3.17.



Fig. 3.16. Perfilómetro Mitutoyo modelo CV 500.

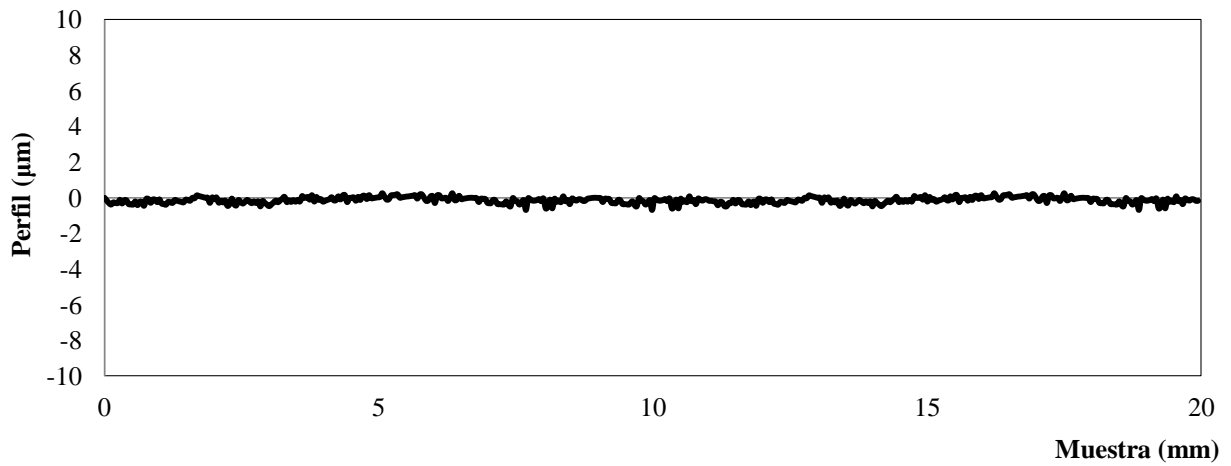


Fig. 3.17. Perfil de la probeta antes de aplicar la técnica.

3.5.5 Micrografías ópticas y electrónicas de barrido

Por medio de un microscopio marca Iroscope modelo MG – 30P, ver Figura 3.18, se obtuvieron las imágenes de la superficie de la muestra antes del ensayo, ver Figuras 3.19.a) y b).



Fig. 3.18. Microscopio Iroscope modelo MG – 30P.

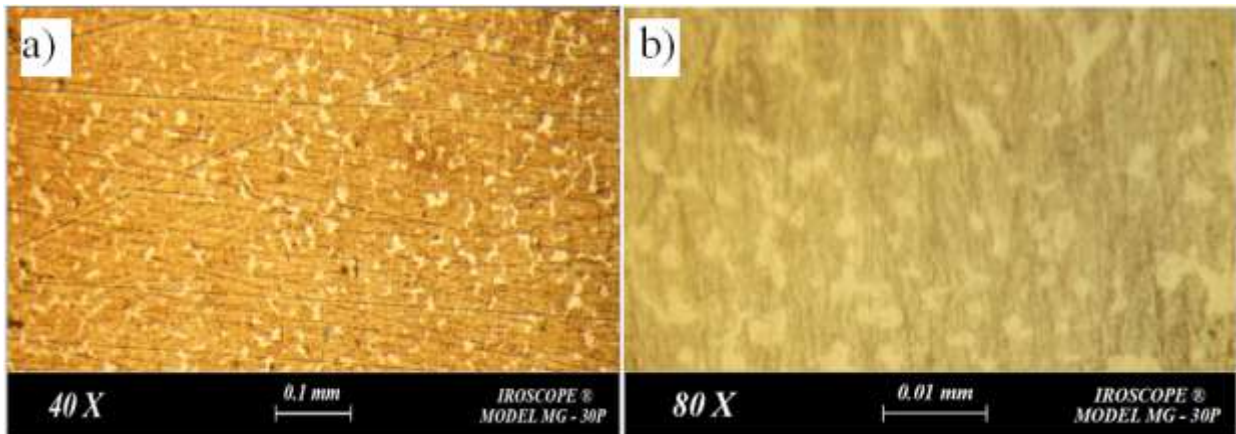


Fig. 3.19. Micrografías de la probeta; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.

Asimismo, por medio de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), realizada con el equipo marca Jeol modelo JSM – 7800F, ver Figura 3.20, se llevó a cabo un análisis de la superficie de la probeta como se muestra en la Figuras 3.21.a) y b).



Fig. 3.20. Microscopio electrónico de barrido Jeol modelo JSM – 7800F.

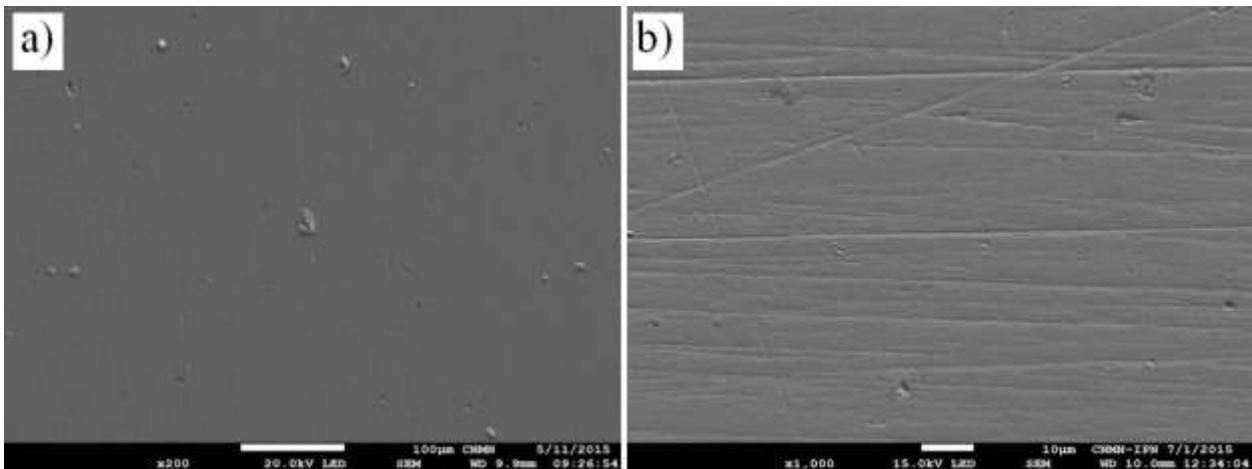


Fig. 3.21. Micrografías obtenidas por SEM; a) aumento a 200X, b) aumento a 1000X.

3.6 Arreglo experimental

Se llevó a cabo el direccionamiento del flujo de aire y partículas de CO₂ en dirección perpendicular a través de una boquilla; como se muestra en la Figura 3.22.a) y b).

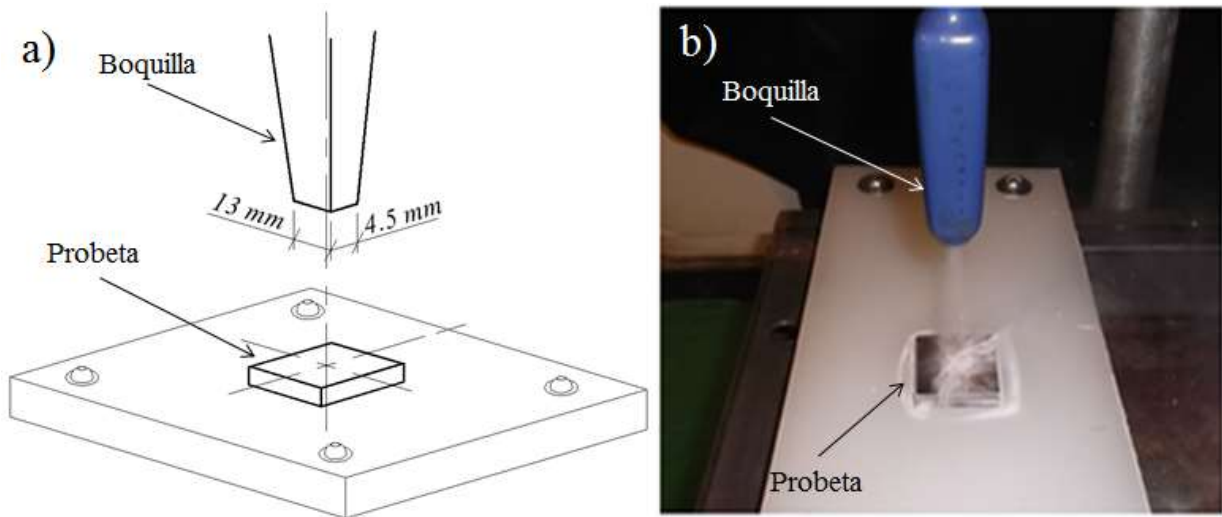


Fig. 3.22. Proyección de partículas de CO₂ sobre probetas; a) diagrama, b) equipo utilizado.

La duración de cada prueba fue de 10 segundos debido a la limitación del sistema de suministro de aire, ya antes mencionado. Se llevaron a cabo 36 ensayos hasta completar 6 minutos de aplicación de la técnica. Cabe señalar, que después de un minuto de trabajo, la probeta fue

retirada para visualizar y caracterizar el daño superficial por medio de análisis de dureza, rugosidad, perfilometría y microscopía óptica y electrónica de barrido.

3.7 Parámetros de prueba

En la Tabla 4, se presentan los parámetros experimentales de la serie de los ensayos realizados.

Tabla 4. Parámetros de los ensayos.

PARÁMETROS	CANTIDAD	UNIDAD
Distancia entre boquilla y probeta	50	mm
Dirección de impacto	90	°
Temperatura ambiental	23	°C
Humedad relativa	20	%
Ruido producido	93	dB
Presión de trabajo	9 - 5	bar
Velocidad de trabajo	225 - 145	m/s
Tiempos evaluados	0 - 6	minutos

Capítulo IV. Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos, mismos que permiten constatar los cambios y daños superficiales generados por las partículas incidentes de hielo seco.

4.1 Densidad de potencia

La Figura 4.1, presenta la gráfica de densidad de potencia suministrada (MW/m²) a la salida de la boquilla contra el tiempo de exposición; mientras que los valores de densidad de potencia son mostrados en la Tabla 5.

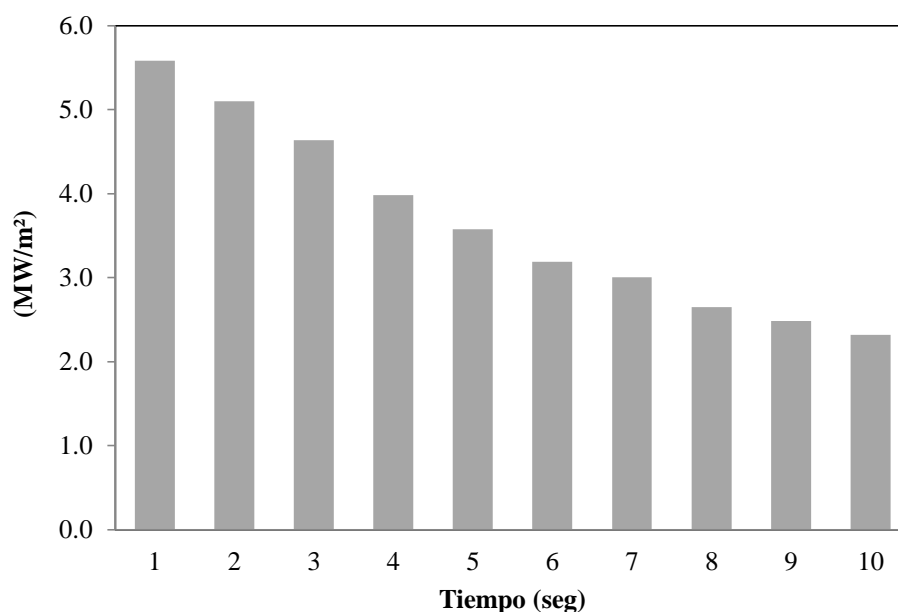


Fig. 4.1. Gráfica de densidad de potencia por prueba.

Tabla 5. Densidad de potencia a diferentes velocidades.

Vel. de salida (m/s)	225	215	205	190	180	170	165	155	150	145
Área de chorro (m ²)	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05	5E-05
Flujo másico (kg/min)	0.6881	0.6881	0.6881	0.6881	0.6881	0.6881	0.6881	0.6881	0.6881	0.6881
Pi (MW/m ²)	5.582	5.097	4.634	3.981	3.573	3.187	3.002	2.649	2.481	2.318

4.2 Pérdida de peso

La Figura 4.2, muestra el análisis de pérdida de peso del espécimen durante el tiempo de exposición.

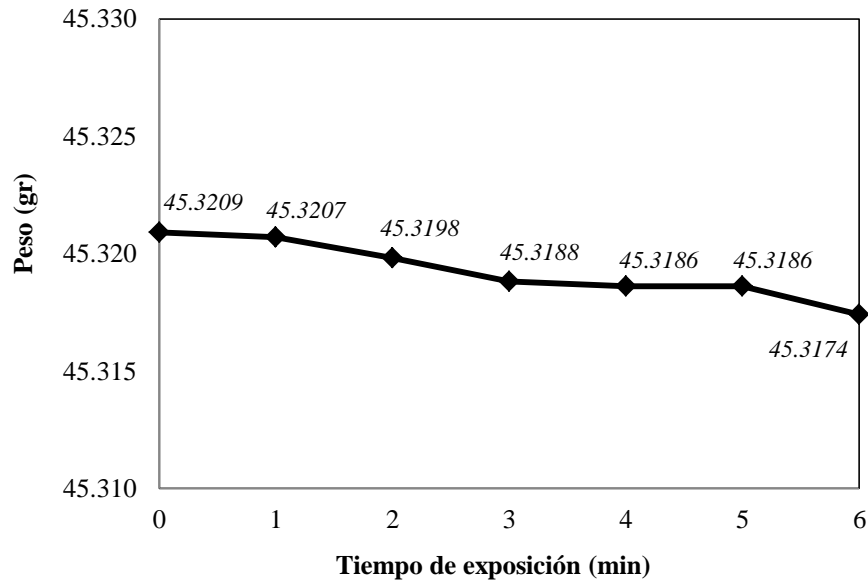


Fig. 4.2. Gráfica de pérdida de peso de la probeta analizada.

4.3 Dureza

Se realizaron 10 mediciones de microdureza después de cada minuto acumulado de trabajo, con una carga de 500 gf durante un tiempo de 15 segundos; los resultados se presentan en la Figura 4.3, donde se puede observar el error asociado al procedimiento. Mientras que la Tabla 6, muestra los valores de dureza durante cada ensayo.

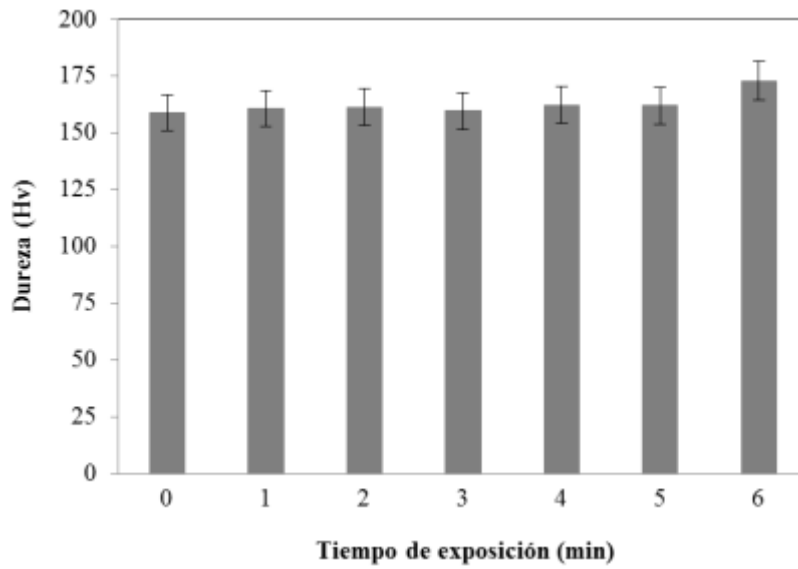


Fig. 4.3. Gráfica de dureza Vickers en cada minuto de evaluación.

Tabla 6. Dureza Vickers cada minuto de evaluación.

Prueba	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min
1	161.2	158.4	161.5	159.9	156.1	157.1	159.3
2	165.2	160.3	153.2	155.3	153.8	155.1	172.2
3	158.7	159.2	163.7	152.6	156.2	162.4	165.7
4	156.2	162.1	162.5	159.1	158.2	161.8	178.1
5	164.8	157.7	166.1	160.2	170.3	170.1	179.2
6	155.5	163.2	159.2	159.3	167.8	164.4	177.1
7	154.6	163.5	155.0	165.4	165.3	159.2	184.2
8	158.1	161.1	164.2	161.2	170.0	160.1	177.5
9	154.6	159.9	161.3	161.7	169.5	165.4	175.6
10	159.7	161.1	164.6	160.4	154.8	162.1	158.2
Promedio	158.9	160.7	161.1	159.5	162.2	161.8	172.7

4.4 Rugosidad

Para obtener los valores de rugosidad se llevaron a cabo 10 mediciones en diferentes zonas de la probeta, indicadas en la Figura 4.4.

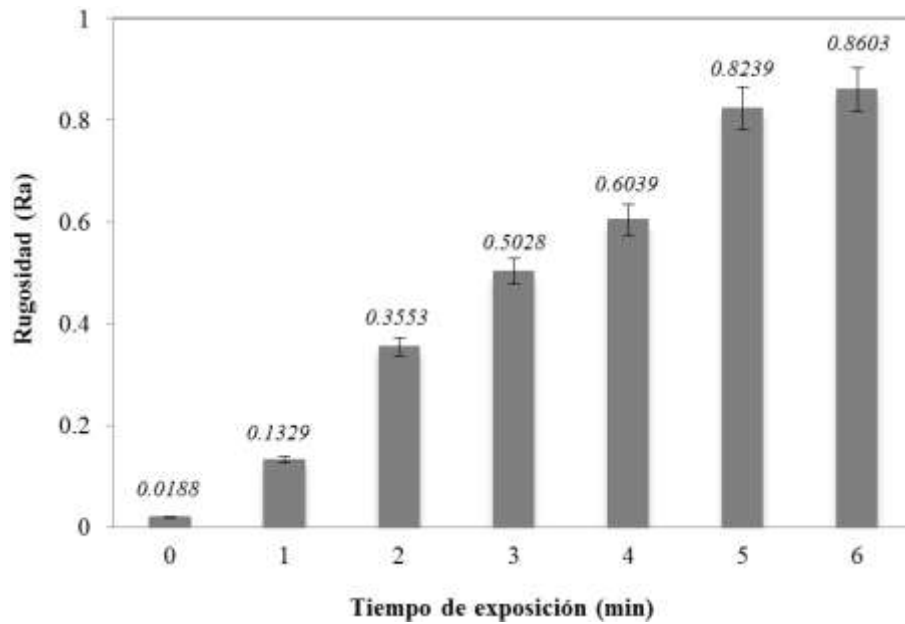


Fig. 4.4. Gráfica de valores de rugosidad (Ra) a cada minuto de prueba.

4.5 Perfilometría

En las Figuras 4.5 a la 4.10 se observa el perfil correspondiente de la superficie sometida a la técnica de limpieza criogénica durante cada minuto de exposición.

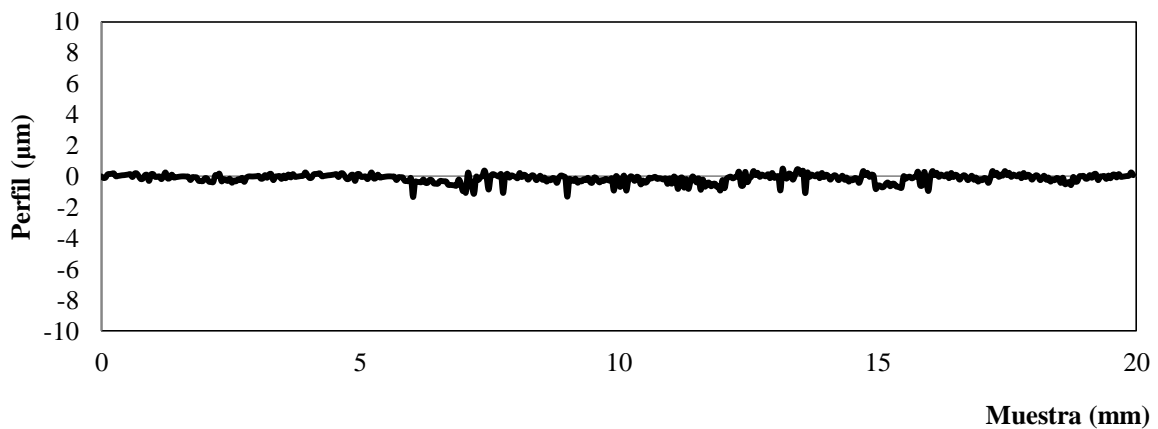


Fig. 4.5. Perfil de la probeta durante 1 minuto de exposición.

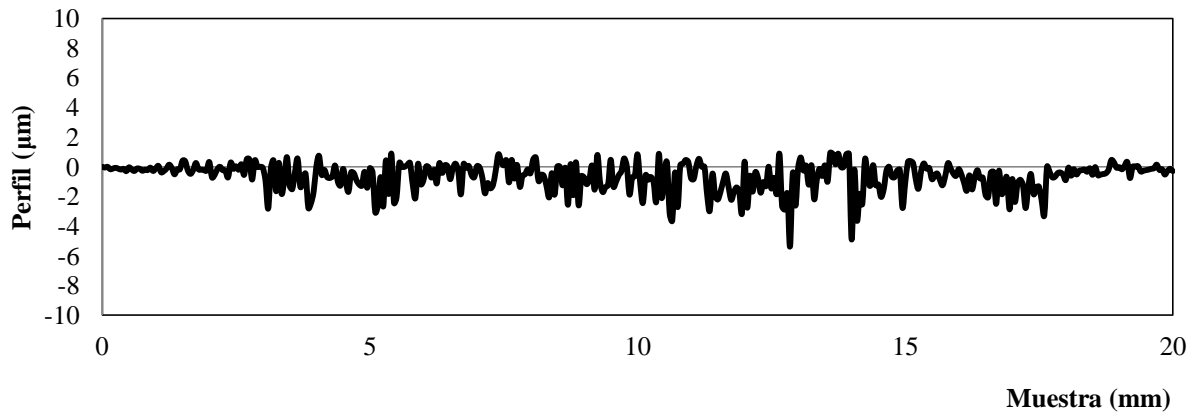


Fig. 4.6. Perfil de la probeta después 2 minutos exposición.

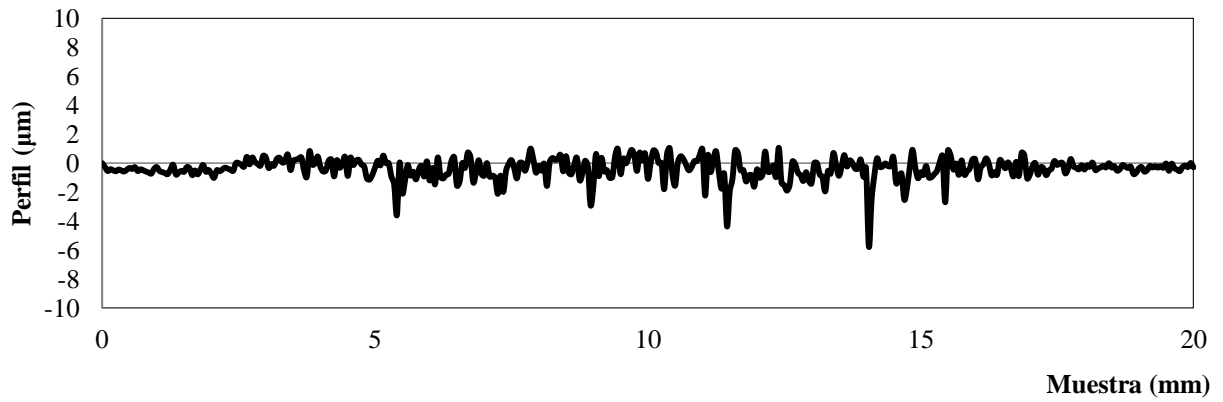


Fig. 4.7. Perfil de la probeta al cumplir 3 minutos de aplicación de la técnica.

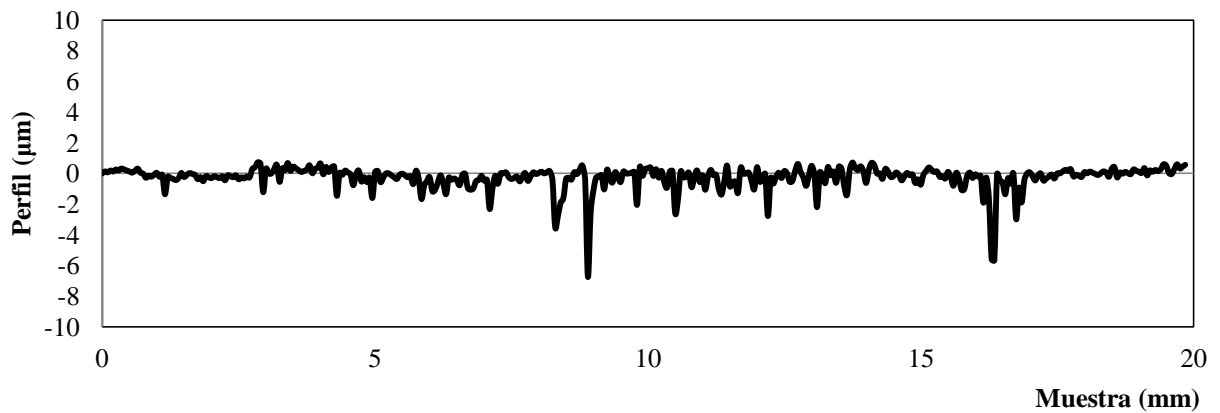


Fig. 4.8. Perfil de la probeta al cumplir 4 minutos de aplicación de la técnica.

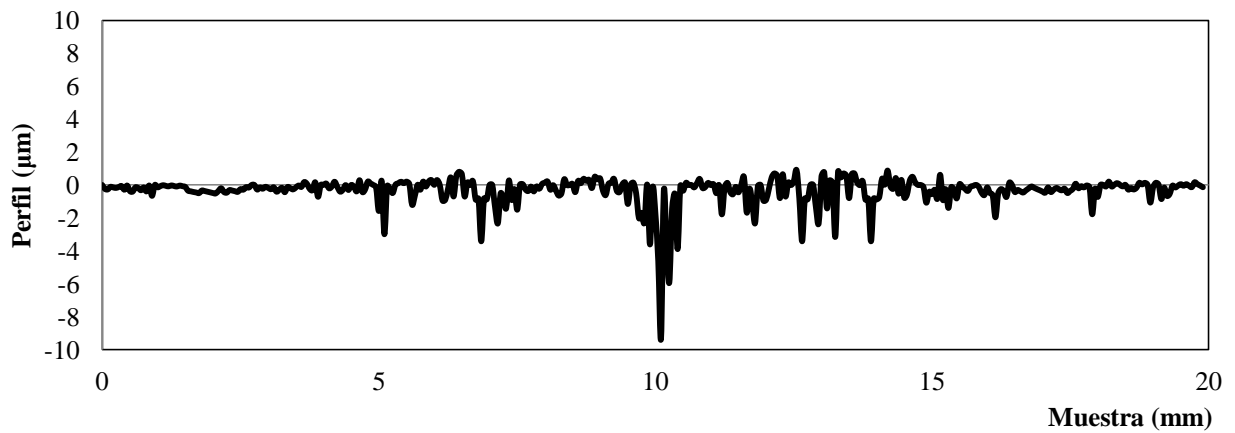


Fig. 4.9. Perfil de la probeta al cumplir 5 minutos de aplicación de la técnica.

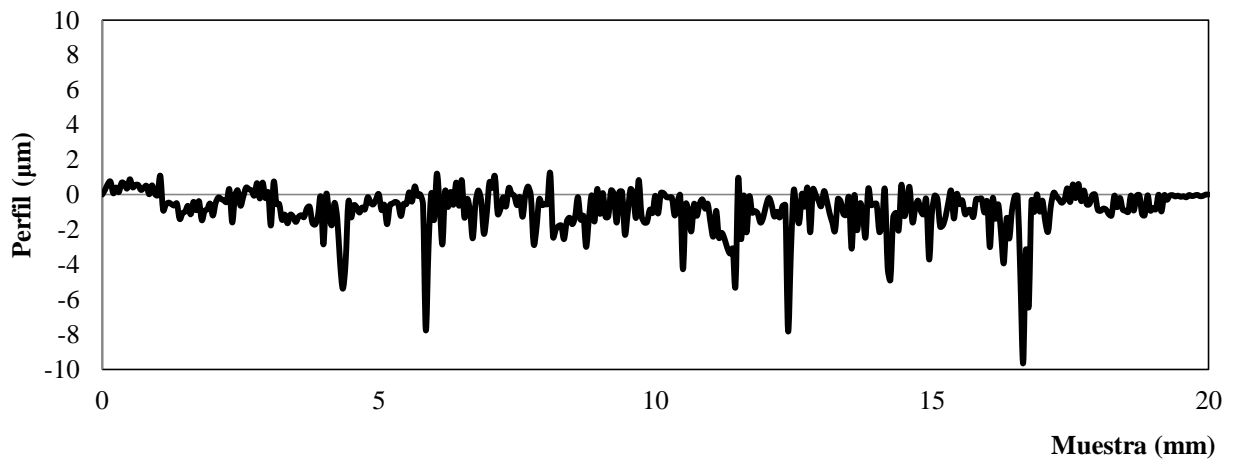


Fig. 4.10. Perfil de la probeta al cumplir 6 minutos de aplicación de la técnica.

En la Figura 4.11, se presenta un comparativo del perfil de la probeta antes y final del ensayo.

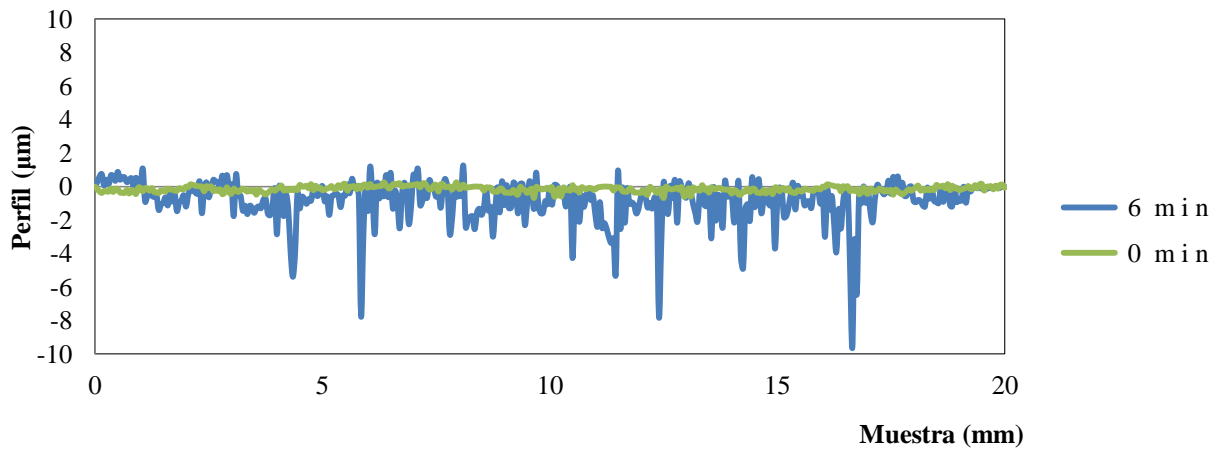


Fig. 4.11. Comparación de perfiles de la probeta de 0 y 6 min de aplicación de la técnica.

4.6 Microscopia óptica y electrónica de barrido

Al finalizar cada minuto de exposición se obtuvieron las imágenes de microscopía óptica donde se observa el progreso del daño generado correspondiente a la superficie metálica, ver Figuras 4.12 - 4. 18.



Fig. 4.12. Fotografía de probeta utilizada al término de 6 minutos.

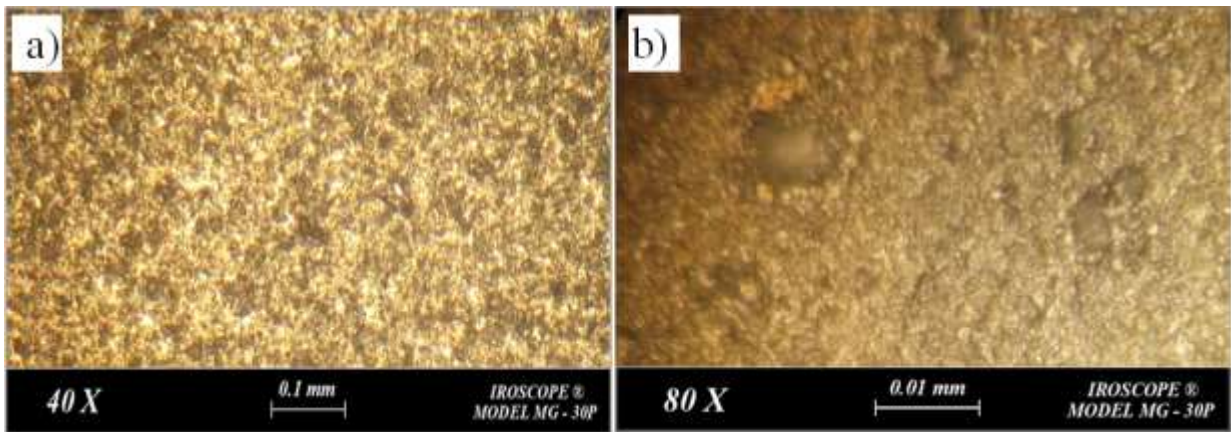


Fig. 4.13. 1 minuto de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.

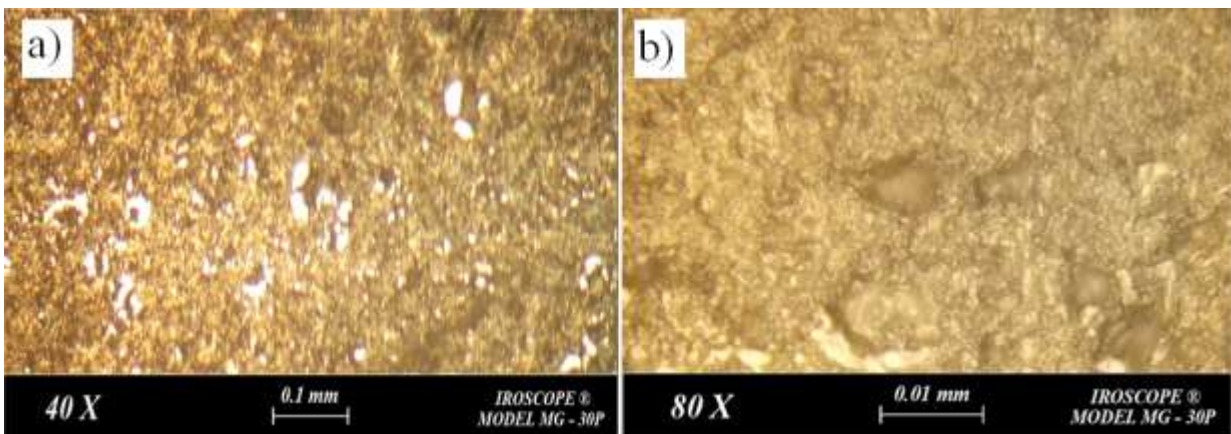


Fig. 4.14. 2 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.

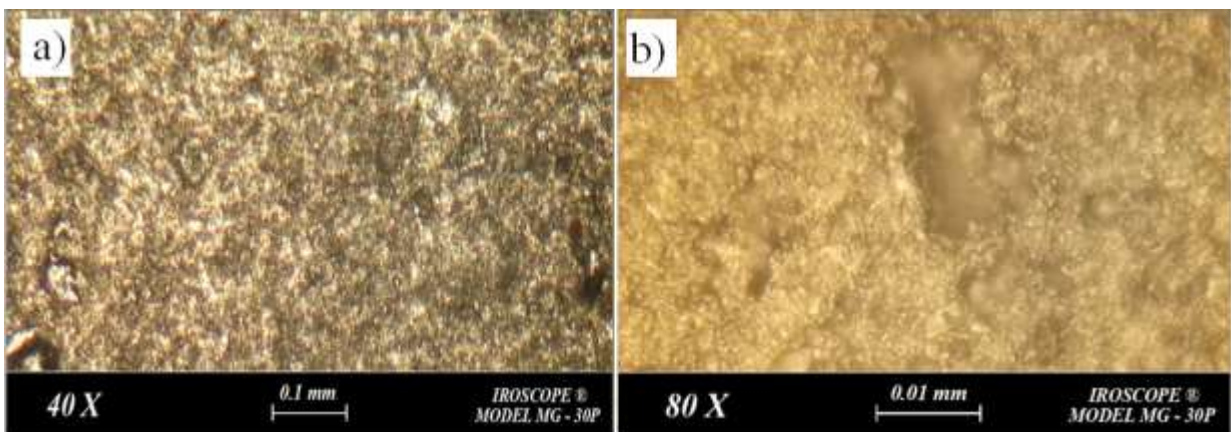


Fig. 4.15. 3 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.

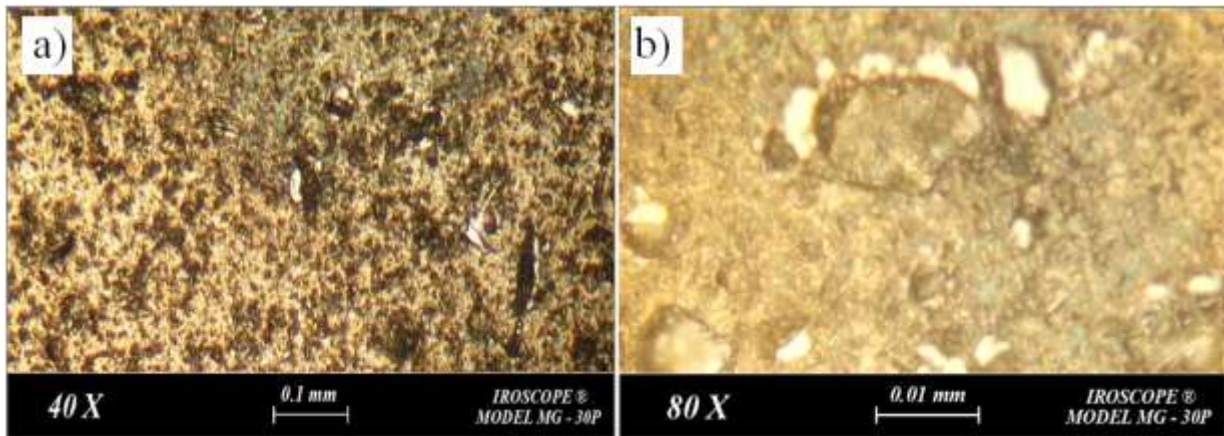


Fig. 4.16. 4 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.

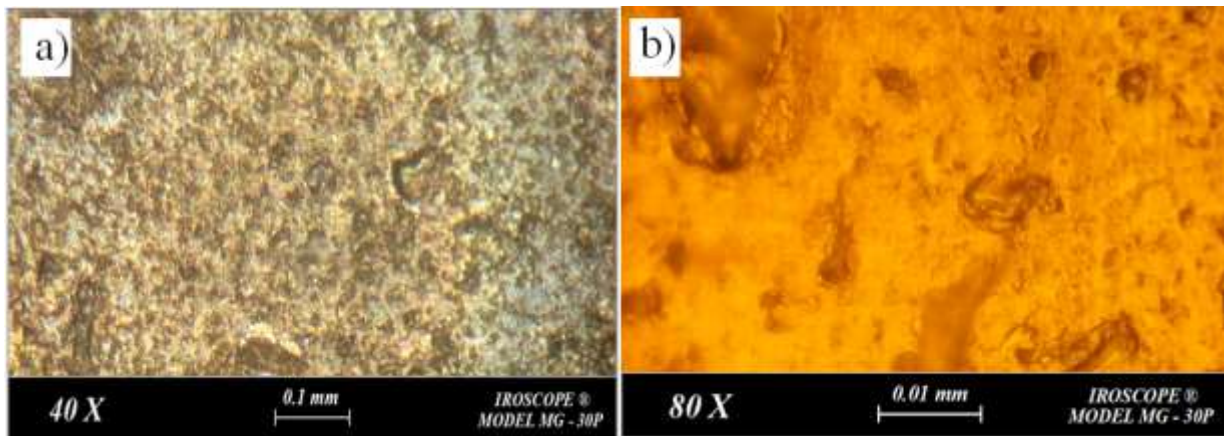


Fig. 4.17. 5 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.

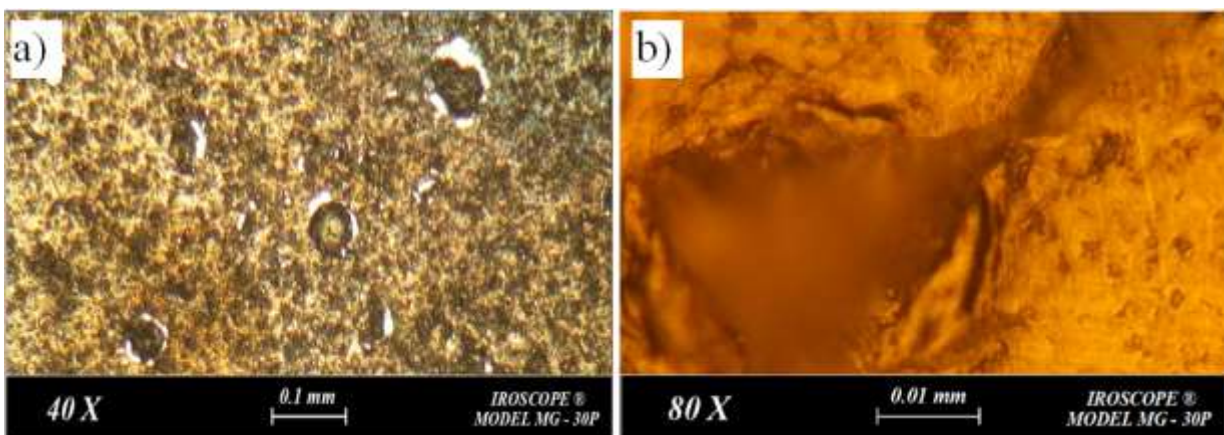


Fig. 4.18. 6 minutos de la técnica; a) aumento a 40X, b) aumento a 80X.

Las Figuras 4.19 y 4.20, presentan un comparativo de micrografías ópticas de la probeta antes y al final del ensayo.

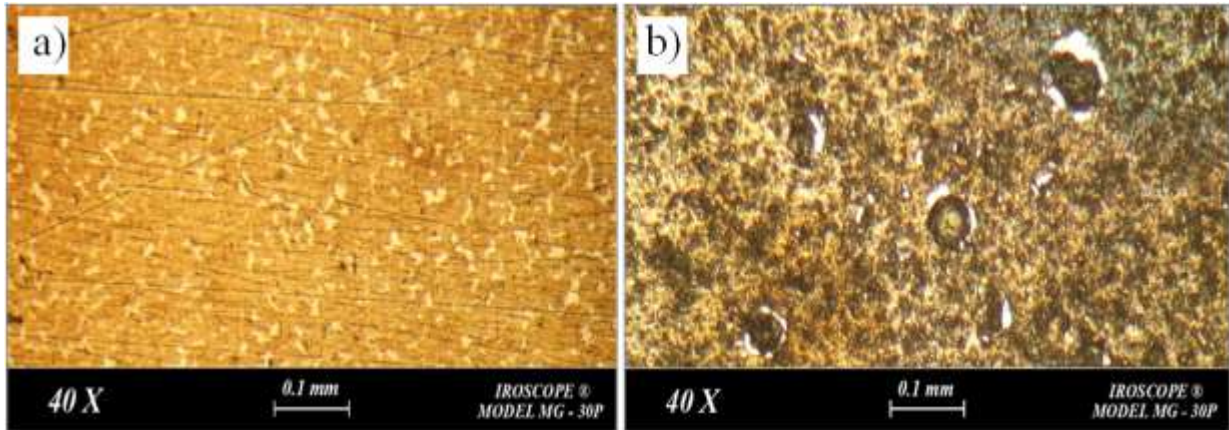


Fig. 4.19. Aumento a 40X; a) antes de aplicar la técnica, b) al término de 6 minutos.

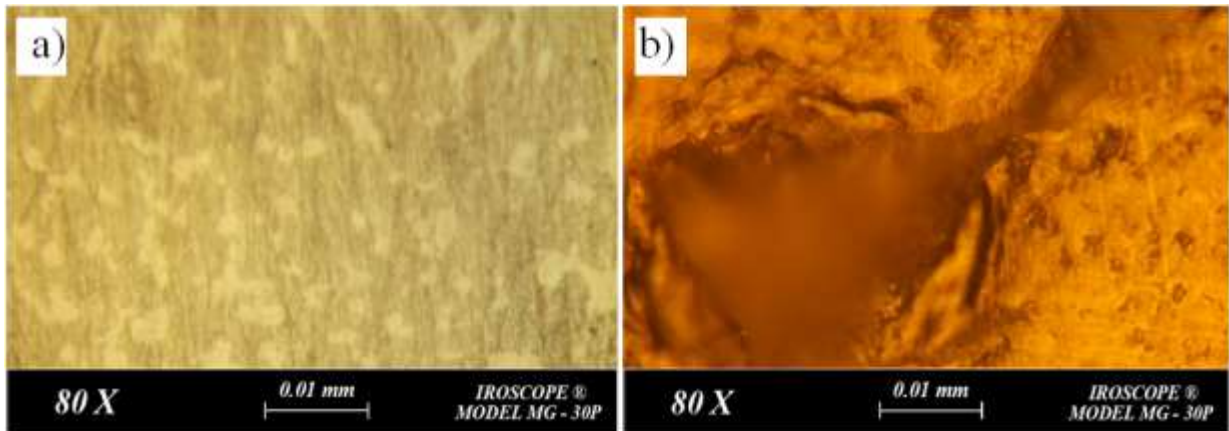


Fig. 4.20. Aumento a 80X; a) antes de aplicar la técnica, b) al término de 6 minutos.

Se obtuvieron micrografías con aumentos de 200X y 1000X por medio de Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) para observar los mecanismos de desgaste presentes, como se indican en las Figura 4.21 y 4.22.

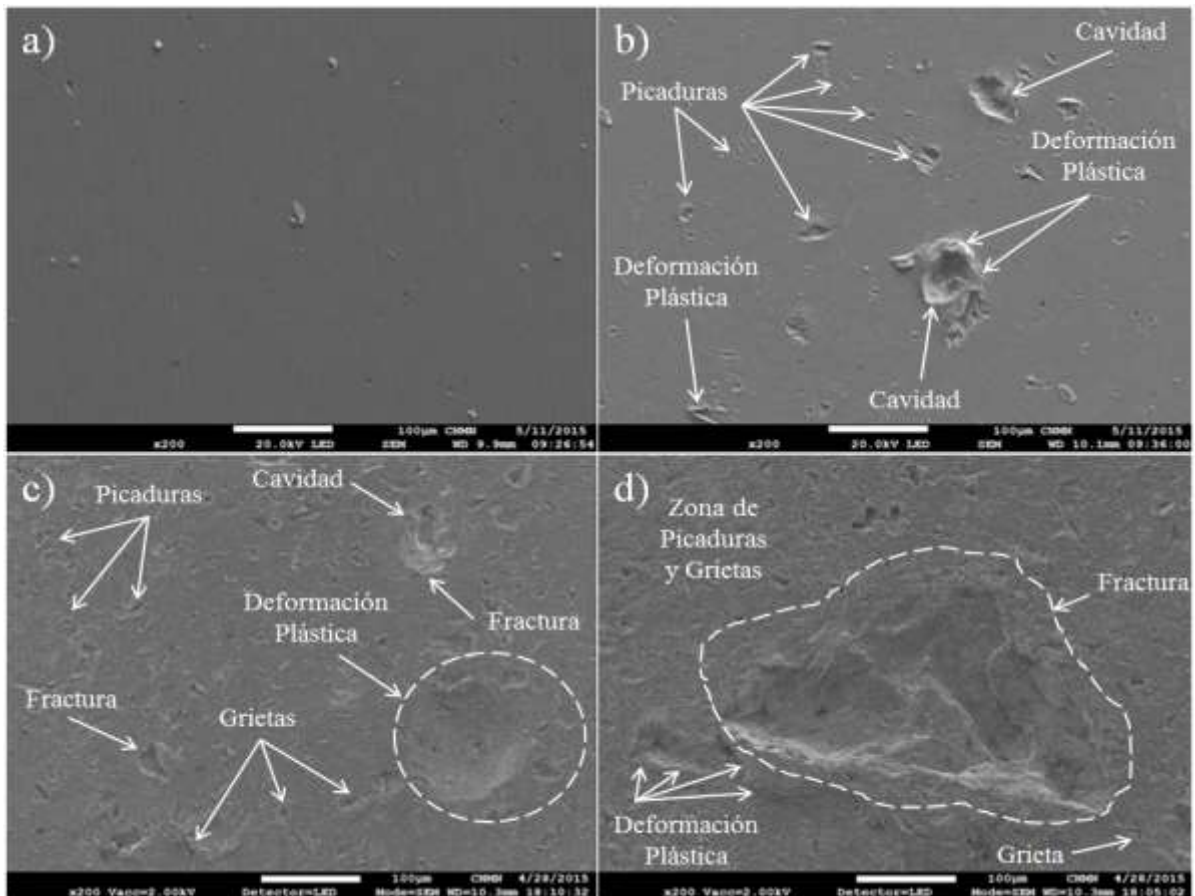


Fig. 4.21. SEM con aumento a 200X; a) antes del ensayo, b, c, y d) al término de 6 minutos.

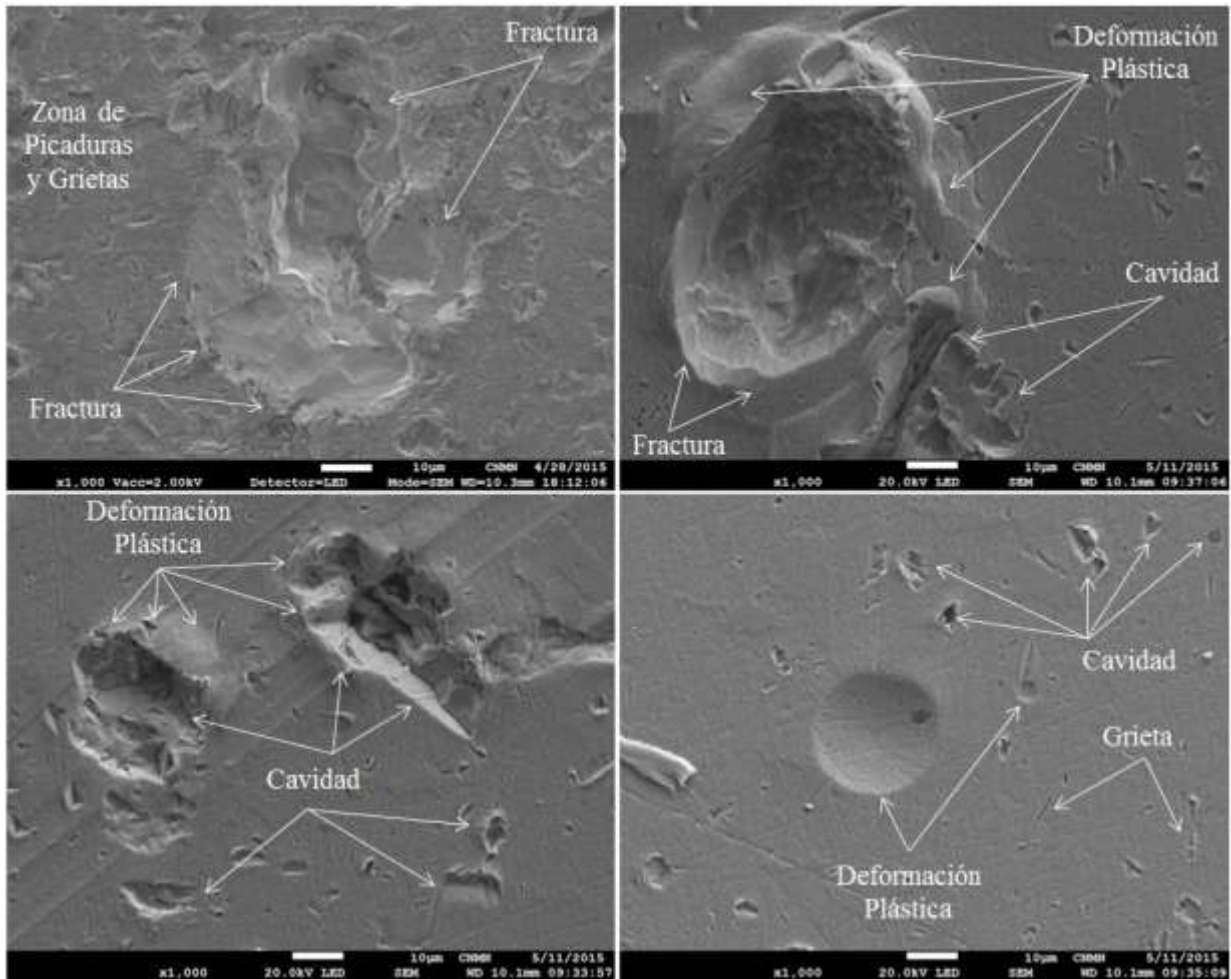


Fig. 4.22. SEM con aumento a 1000X en diversas zonas al término de 6 minutos.

Capítulo V. Análisis y Discusión de Resultados

En aplicaciones industriales, tales como lo reportado por R. W. Foster y S. Stratford no se encontró un daño superficial cuando se limpió prensas y moldes para neumáticos, interiores automotrices de polímeros, para botellas y productos por soplado [22, 39]. Esto es contradictorio a lo reportado por D. P. Weston y D. M. Brewis, donde se limpió placa de mezcla de polipropileno industrial y aleaciones de aluminio [2, 3]. Asimismo, al utilizarla para preparar superficies de aluminio para recubrirlas con epóxicos y poliuretanos, se encontró una superficie limpia con modificación. Es evidente de acuerdo a las aplicaciones; los parámetros de mayor influencia, fueron: Tiempo de exposición, y posteriormente, dureza del material, y velocidad de impacto [39, 40, 42].

Por otro lado, existen investigaciones en donde las superficies no sufren daño, particularmente en moldes y prensas calientes [15, 22, 39]. Se puede pensar que se debe a que las partículas sólidas se subliman antes de impactar debido al cambio brusco de temperatura por convección y radiación emitida por la superficie caliente, y posiblemente no enfríe la zona de contacto a una temperatura tan extrema.

En la gráfica presentada en la Figura 4.3, de pérdida de peso contra tiempo de exposición, se observó que durante los primeros dos minutos de exposición, existe una considerable pérdida de peso, posiblemente asociada a la modificación de la topografía. Posteriormente, a partir del minuto 3 al 5, se observó muy poca pérdida de peso, asociada a la deformación plástica generada por el continuo golpeteo de la combinación sólido – gas. Después de esto, se presentó una variación significativa en la pérdida de peso como resultado de rebasar el esfuerzo de cedencia y fracturarse posteriormente.

De acuerdo a las Figuras 4.2, 4.3, y la Tabla 6, el pequeño incremento que existe en la dureza, se debe, principalmente, a la deformación plástica generada con poca remoción de material, esto sucede únicamente en las zonas más rugosas. Posteriormente, del minuto uno al dos, la dureza sigue incrementándose y la pérdida de peso resulta ser mucho mayor. Por ello, se

presenta un endurecimiento por deformación. Del minuto dos al tres la dureza disminuye muy cercano al valor inicial y la pérdida de peso se acelera aún más. Esto quiere decir que la aplicación continua del proceso hace que el material rebase su límite de cedencia, se plastifique y fracture. Del minuto 3 al minuto 5, se observó que el proceso incrementa el valor de dureza por deformación plástica mientras que la pérdida de masa resulta menor. Finalmente, del minuto 5 al minuto 6, los valores de dureza y desgaste se incrementaron porque existe mayor cantidad de material deformado plásticamente, debido al incremento de la zona dañada. En general, se puede concluir que el mecanismo de desgaste erosivo se encuentra asociado a la deformación plástica cíclica por impacto.

De acuerdo a los resultados de rugosidad y los perfiles obtenidos, se observa que el proceso de modificación superficial por deformación y remoción de material incrementan la rugosidad y afectan el acabado superficial. Por lo que, el proceso de limpieza criogénica se realizó de una manera no homogénea, lo que afectó de diferente grado, el área expuesta. Sin embargo, es recomendable variar algunos otros parámetros, como son: Temperatura de la probeta, ángulo de impacto, distancia boquilla – probeta, materiales, etc., a fin de caracterizar con mayor eficiencia la técnica estudiada.

Los mecanismos de desgaste observados en las micrografías ópticas y electrónicas de barrido principalmente mostraron deformación plástica, grietas, picaduras, y cráteres.

De acuerdo a la revisión de literatura y al trabajo experimental, se piensa que el mecanismo de daño con este equipo y bajo estas condiciones, básicamente consiste en:

1. Al salir el flujo se tiene una combinación de partícula sólida y gas (CO₂ – aire).
2. Posteriormente, la partícula sólida impacta y genera un daño, principalmente deformación plástica y remoción de material. Mientras que el chorro de aire desplaza partículas alojadas en la superficie, como pudiera ser el polvo o algún otro contaminante. Sin embargo, cuando ésta se sublima, genera un mecanismo de daño parecido a la erosión por cavitación, debido a que existe un incremento de presión, lo cual genera un daño secundario posterior al impacto.

Por último, existen efectos secundarios que deben ser analizados por separado. Como son: Cambio microestructural o alteración en las propiedades mecánicas, y la emisión de gases al medio ambiente. En el caso de la presente investigación, se corroboró que el material se enfría alrededor de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, puesto que el CO_2 es direccionado únicamente hacia la probeta. Por lo tanto, en esta condición, al presentar la probeta endurecimiento por deformación y descenso de la temperatura, existe mayor rigidez y menor capacidad de absorber energía. Por ello, se puede suponer que las moléculas del material no son capaces de desplazarse.

Por otra parte, en la emisión de gases es necesario seguir algunas regulaciones impuestas para el uso y manejo de CO_2 , y por supuesto el uso correcto para la aplicación y de manera individual.

Conclusiones

Se recomienda utilizar esta técnica para limpieza de pistas metálicas de rodadura del STCMetro a pesar de que pudiera causar daño insignificante y enfriar la temperatura de la pista. En la aplicación real se debe de tomar en cuenta que el sistema de limpieza estará en avance continuo, además de tener mucho más material para que la energía se disipe, por lo que no se considera que a corto o mediano plazo sea un riesgo en la seguridad del sistema.

En relación a la técnica de limpieza criogénica la literatura muestra que el proceso puede ser versátil y eficiente, en términos de aplicaciones, de capacidad de limpieza y superficies de difícil acceso; sin embargo, se requiere una infraestructura importante, elementos y componentes tales como: compresor y tanque, tuberías, filtros y válvulas, además de que el equipo es altamente costoso (\$450,000), y por supuesto el costo del consumible (CO₂).

La técnica de limpieza criogénica es versátil en su uso, sin embargo es necesario caracterizar su aplicación para cada caso en particular, sobre todo en componentes de precisión.

De acuerdo a los resultados, el parámetro que más influyó en el daño superficial fue el tiempo de exposición.

Los mecanismos de desgaste identificados fueron: deformación plástica, fractura, picaduras, y grietas.

Los ensayos tribológicos sobre los especímenes extraídos de pista metálica de rodadura del neumático son apropiados para simular y medir los efectos que ocurren al hacer uso de la limpieza criogénica sobre estos mismos.

Trabajos Futuros

- Calentar las probetas de pista metálica de rodadura y realizar la técnica para observar el comportamiento de las partículas al impactar y el proceso de sublimación del dióxido de carbono.
- Proponer diversos materiales y recubrimientos de manera que se puedan analizar los cambios superficiales y generales que puedan sufrir como efecto del uso de la limpieza criogénica.
- Desarrollar prototipo para realizar la técnica de limpieza criogénica en la aplicación real de pistas metálica de rodadura a lo largo de las líneas del STCMetro.
- Evaluar el riesgo de usar dióxido de carbono después de que se sublima.
- Debido al costo del pellet, se recomienda explorar la viabilidad de desarrollar un equipo generador de pellets, ya sea en laboratorio o la aplicación real.

Referencias

- [1] V. P. Belyakov, «The present state and development prospects of cryogenic technology,» *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 8, pp. 1083 – 1088, 1972.
- [2] D. P. Weston, P. H. Shipway, S. J. Harris, «Coating removal from an industrial polypropylene blend by cryogenic blasting: the development of substrate damage,» *Wear*, vol. 258, pp. 392 – 401, 2005.
- [3] D. M. Brewis, G. W. Critchlow, C. A. Curtis, «Cryoblasting as a pretreatment to enhance adhesion to aluminium alloys: an initial study, » *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 19, pp. 253 – 256, 1999.
- [4] M. A. Cruz Gómez, «Análisis de la Adhesión de un Sistema Rueda Neumática – Pista Metálica del S.T.C. Metro,» Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Politécnico Nacional: Tesis de Doctorado, 2013.
- [5] STC (2013), Un metro para la ciudad de México, Consultado el 16 de diciembre del 2013, <http://www.metro.df.gob.mx/organismo2/pendon3.html>
- [6] STC (2014), En la actualidad, Consultado el 4 de enero del 2014, <http://www.metro.df.gob.mx/organismo2/pendon4.html>
- [7] STC (2014), Parque vehicular, Consultado el 25 de marzo del 2014, <http://www.metro.df.gob.mx/operacion2/index.html>
- [8] M. A. Cruz Gómez, E. A. Gallardo – Hernández, M. Vite Torres, A. Peña Bautista, «Rubber Steel friction in contaminated contacts,» *Wear*, vol 302, pp. 1421 – 1425, 2013.
- [9] M. Broster, C. Pritchard, D. A. Smith, «Wheel/rail adhesion: its relation to rail contamination on British railways,» *Wear*, vol. 29, pp. 309 – 321, 1974.
- [10] J. A. Cosío Vázquez, «Máquina de hidrosandblasteo de pistas de rodamiento,» *Jornadas de Innovación y Desarrollo Tecnológico*, pp. 33 – 34, 2009.
- [11] Kenneth Abbott, «Dry Media Blasting for the Removal of Paint Coatings on Aerospace Surfaces,» *Metal Finishing*, pp. 33 – 35, 1996.
- [12] David R. Linger, «CO₂ (Dry ice) particle blasting as a mainstream cleaning alternative,» *Particles on Surface 5&6: Detection, Adhesion and Removal*, Estados Unidos, K. L. Mittal, 1999, pp. 203 – 219.
- [13] Inés Camilloni, Carolina Vera, Alberto Kornblihtt, «Ciencias Naturales. La Atmósfera,» *Las Ciencias En El Mundo Contemporáneo*, Argentina, Ministerio de Educación, 2013.

- [14] Bertz Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer, «La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono,» *Informe especial del IPCC*, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005.
- [15] E. Uhlmann, M. Kretschmar, F. Elbing, V. Mihotovic, «Deburring with CO₂ Snow Blasting,» *Burrs – Analysis, Control and Removal*, pp. 191 – 187, 2010.
- [16] Alberto Mazzoldi, Tim Hill, Jeremy J. Colls, «CO₂ transportation for carbon capture and storage: Sublimation of carbon dioxide from a dry ice bank,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 2, pp. 210 – 218, 2008.
- [17] Lin Chen, Xin-Rong Zhang, «A review study of solid – gas sublimation flow for refrigeration: From basic mechanism to applications,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 40, pp. 61 – 83, 2014.
- [18] Xin-Ron Zhang, Hiroshi Yamaguchi, «An experimental study on heat transfer of CO₂ solid – gas two phase flow with dry ice sublimation,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, pp. 2228 – 2234, 2011.
- [19] Shujuan Dong, Bo Song, Bernard Hansz, Hanlin Liao, Christian Coddet, «Improvement in the properties of plasma-sprayed metallic, alloy and ceramic coatings using dry-ice blasting,» *Applied Surface Science*, vol. 257, pp. 10828 – 10833, 2011.
- [20] E. Wilfred Taylor, «Correlation of the Moh's scale of hardness with the Vickers's hardness numbers,» *Mineralogical Magazine*, vol. 206, pp. 718 – 721, 1949.
- [21] Shujuan Dong, Bo Song, Bernard Hansz, Hanlin Liao, Christian Coddet, «Improvement in the microstructure and property of plasma sprayed metallic, alloy and ceramic coatings by pre-/during-treatment of dry-ice blasting,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 220, pp. 199 – 203, 2013.
- [22] Robert W. Foster, «Carbon Dioxide (Dry-Ice) Blasting,» *Good Painting Practice: SSPC Painting Manual*, vol. 1, pp. 161 -167, 2005.
- [23] Robert Sherman, Paul Adams, «Carbon Dioxide Snow Cleaning – The Next Generation of Clean,» *Precision Cleaning*, pp. 271- 300, 1995.
- [24] Andreas Momber, «Health, Safety and Environment,» *Blast Cleaning Technology*, Berlín, Springer, 2008, pp. 295 – 336.
- [25] Un Cheol Sung, Cheol Nam Yoon, Sun-Geon Kim, «Surface cleaning by ice-particle jet (II) - Preparation of contaminated surface and its cleaning -,» *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 14, pp. 15 – 22, 1997.
- [26] OIT, «Ruido,» *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*, OIT, 2012, pp. 47.1 – 47.20.
- [27] L. H. Shockey Jr., «Blow it off: Moving beyond compressed air with carbon dioxide snow,» *Object Specialty Group Postprints*, vol. 16, pp. 13 – 24, 2009.

- [28] Bo Song, Shujuan Dong, Pierre Coddet, Bernard Hansz, Thierry Grosdidier, Hanlin Liao, Christian Coddet, «Oxidation Control of Atmospheric Plasma Sprayed FeAl Intermetallic Coatings Using Dry-Ice Blasting,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 22, pp. 345 – 351, 2013.
- [29] Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, «Fundamentos del cambio climático,» *Programa Especial de Cambio Climático 2009 - 2012*, México, Poder Ejecutivo Federal, 2009, pp. 1 – 9.
- [30] SEMARNAT, «Cambio climático y ozono,» *¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo*, México, SEMARNAT, 2007, pp. 155 – 193.
- [31] Ligia Butrón Madrigal, Claudia Sheinbaum Pardo, Oscar Vázquez Martínez, «Bases científicas del cambio climático,» *Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México*, México, Gobierno del Distrito Federal, 2004, pp. 3 – 6.
- [32] IPCC (2013), Intergovernmental Panel on Climate Change, Consultado el 25 de noviembre del 2013, http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml
- [33] UNFCCC (2013), United Nations Framework Convention on Climate Change, Consultado el 27 de noviembre del 2013, http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php
- [34] Greenpeace (2013), Greenpeace México, Consultado el 13 de noviembre del 2013, <http://www.greenpeace.org/mexico/es/Campanas/Energia-y--cambio-climatico/COP16/Antecedentes/Protocolo-de-Kioto/>
- [35] Excélsior (2011), Excélsior – México avanza contra el cambio climático; apoya el Protocolo de Kioto, Consultado el 2 de enero del 2014, <http://www.excelsior.com.mx/node/737295>
- [36] Tania García López, «La política mexicana de acción climática y su aplicación en el estado de Veracruz,» *Registro Interconectado de Programas Sociales*, vol. 8, pp. 153 – 167, 2009.
- [37] G. Spur, E. Uhlmann, F. Elbing, «Dry ice blasting for cleaning: process, optimization and application,» *Wear*, vol. 233 – 235, pp. 402 – 411, 1999.
- [38] Eckhart Uhlmann, Robert Hollan, Robert Veit, Adil El Mersini, «A Laser Assisted Dry Ice Blasting Approach for Surface Cleaning,» *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 471 – 476, 2006.
- [39] Scott Stratford, «Dry ice blasting for paint stripping and surface preparation,» *Metal Finishing*, vol. 97, pp. 481 – 487, 1999.
- [40] Steve Wilson, «Sustainable in-machine mold cleaning and part deburring & deflashing using dry ice,» *182nd Technical Meeting of the Rubber Division of the American Chemical Society, Inc.*, pp. 1 – 9, 2012.

- [41] Souvik Banerjee, Andrea Campbell, «Non-Damaging CO₂ Aerosol Cleaning in FEOL IC Manufacturing,» *Solid State Phenomena*, vol. 103 – 104, pp. 199 – 202, 2005.
- [42] Cold Jet Company, «Operator Manual AeRO 75 Series,» *Cold Jet Information*, pp. 45, 2010.
- [43] P. H. Shipway, D. P. Weston, «Thermal effects in blasting and erosion of polymeric materials,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 6161 – 6167, 2009.
- [44] Pierre L. Fauchais, Joachim V. R. Heberlein, Maher I. Boulos, «Surface Preparation,» *Thermal Spray Fundamentals: from Powder to Part*, Estados Unidos, Springer, 2014, pp. 755 – 805.
- [45] F. Elbing, N. Anagreh, L. Dorn, E. Uhlmann, «Dry ice blasting as pretreatment of aluminum surfaces to improve the adhesive strength of aluminum bonding joints,» *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 23, pp. 69 – 79, 2003.
- [46] M. Divakar, V. K. Agarwal, S. N. Singh, «Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI 316,» *Wear*, vol. 259, pp. 110 – 117, 2005.
- [47] Md. Aminul Islam, Zoheir N. Farhat, «Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate,» *Wear*, vol. 311, pp. 180 – 190, 2014.
- [48] J. R. Laguna-Camacho, A. Marquina-Chávez, J. V. Méndez-Méndez, M. Vite-Torres, E. A. Gallardo-Hernández, «Solid particle erosion of AISI 304, 316 and 420 stainless steels,» *Wear*, vol. 301, pp. 398 – 405, 2013.
- [49] Zdzislaw Mazur Czerwiec, Alfonso Campos Amezcua, Rafael Campos Amezcua, «Análisis y control de erosión por partículas sólidas en los elementos del sistema de flujo de turbinas de vapor,» *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctrica*, pp. 156 – 167, 2010.
- [50] E. Mielgo, O. Conejero, «Erosión por partículas sólidas con pérdida total de espesor en panel de caldera,» *Anales de Mecánica de la Fractura 28*, vol. 2, pp. 823 – 827, 2011.
- [51] J. R. Laguna-Camacho, L. A. Cruz-Mendoza, J. C. Anzelmetti-Zaragoza, A. Marquina-Chávez, M. Vite-Torres, J. Martínez-Trinidad, «Solid particle erosion on coatings employed to protect die casting molds,» *Progress in Organic Coatings*, vol. 74, pp. 750 – 757, 2012.
- [52] C. Maurer, U. Schulz, «Solid particle erosion of thick PVD coatings on CFRP,» *Wear*, vol. 317, pp. 246 – 253, 2014.
- [53] P. H. Shipway, J. P. D. Bromley, D. P. Weston, «Removal of coatings from polymer substrates by solid particle blasting to enhance reuse or recycling,» *Wear*, vol. 263, pp. 309 – 317, 2007.

- [54] Qi He, Fanxiu Lv, Fenglei Zhang, Huibin Guo, Junjun Wei, «Particle erosion of infrared materials,» *Journal of University of Science and Technology Beijing*, vol. 15, number 6, pp. 758 – 763, 2008.
- [55] M. S. Tovar Oliva, «Estudio del Fenómeno de Erosión por Cavitación en Materiales Metálicos,» Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Politécnico Nacional: Tesis de Maestría, 2012.
- [56] Zhen Li, Jiesheng Han, Jinjun Lu, Jianmin Chen, «Cavitation erosion behavior of Hastelloy C-276 nickel-based alloy,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 619, pp. 754 – 759, 2015.
- [57] A. Abouel-Kasem, K. M. Emar, S. M. Ahmed, «Characterizing cavitation erosion particles by analysis of SEM images,» *Tribology International*, vol.42, pp. 130 – 136, 2009.
- [58] Stefano Malavasi, Gianandrea Vittorio Messa, Umberto Fratino, Alessandro Pagano, «On cavitation occurrence in perforated plates,» *Flow Measurement and Instrumentation*, vol.41, pp. 129 – 139, 2015.
- [59] Shuji Hattori, Eisaku Nakao, «Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles,» *Wear*, vol. 249, pp. 839 – 845, 2002.
- [60] A. Abouel - Kasem, K. M. Emar, S. M. Ahmed, «Characterizing cavitation erosion particles by analysis of SEM images,» *Tribology International*, vol. 42, pp. 130 – 136, 2009.
- [61] G. Bazanini, J. D. Bressan, M. A. Klemz, «Cavitation erosion wear of metallic specimens using the new compact rotating disk device,» *Thermal Engineering*, vol. 7, pp. 31 – 36, 2008.
- [62] M. V. Melgar Uresty, «Programa de mantenimiento en las vías sobre neumáticos del metro de la Ciudad de México,» Escuela Superior de Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional: Tesis de Licenciatura, 2005.
- [63] En Fase Gas (2015), Dióxido de carbono, Consultado el 28 de junio del 2015, <http://www.enfasegas.com/PRODUCTOS-Y-SERVICIOS/Dioxido-de-carbono/>
- [64] Redlake, «MotionXtra HG – 100 K,» *Resolve the Moment...*, pp. 1 – 2, 2010.
- [65] Cheol Nam Yoon, Hotae Kim, Sun-Geon Kim, Byung-Hun Min, «Removal of surface contaminants by cryogenic aerosol jets,» *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 16, pp. 96 – 103, 1999.