

# **Estudio sobre Pastillas para Mezcladora de Asfalto.**

**Caracterización y Desarrollo de Piezas, Original y Alternativas.**

Proyecto final para optar al grado en Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Mar del Plata

**Alumnos:**       **Ardiles, Malena**        [ardilesmalena@gmail.com](mailto:ardilesmalena@gmail.com)  
                      **Cerioti, Facundo**        [facundocerioti99@gmail.com](mailto:facundocerioti99@gmail.com)

**Directores:**       **Dommarco, Ricardo C.**  
                              **Mandri, Alejo D.**

**Mar del Plata, 20 de diciembre de 2024**



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

# **Estudio sobre Pastillas para Mezcladora de Asfalto.**

**Caracterización y Desarrollo de Piezas, Original y Alternativas.**

Proyecto final para optar al grado en Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Mar del Plata

**Alumnos:**        **Ardiles, Malena**        [ardilesmalena@gmail.com](mailto:ardilesmalena@gmail.com)  
                         **Cerioti, Facundo**        [facundocerioti99@gmail.com](mailto:facundocerioti99@gmail.com)

**Directores:**        **Dommarco, Ricardo C.**  
                         **Mandri, Alejo D.**

**Mar del Plata, 20 de diciembre de 2024**

<b>Resumen.....</b>	<b>3</b>
<b>Justificación del Trabajo y Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>5</b>
1.1. Tipos de Planta de Asfalto.....	6
1.2. Introducción al Proceso de Mezcla Asfáltica:.....	7
1.3. Tribología.....	10
1.3.1. Mecanismos de Desgaste.....	11
1.3.1.1. Desgaste por Abrasión.....	11
1.4. Aceros Bainíticos Libres de Carburos (ABLC).....	16
1.5. Tecnología de la Fundición del Acero.....	19
1.5.1. Introducción a la Tecnología de la Fundición.....	19
1.5.2. Etapas en la Fabricación de Piezas por Fusión.....	19
1.5.2.1. Fabricación del Modelo.....	19
1.5.2.2. Operaciones de Moldeo y Mezclas para Moldeo.....	21
1.5.2.3. Sistema de Alimentación y Realimentación de la Pieza.....	22
1.5.2.3.1. Sistema de Alimentación.....	22
1.5.2.3.2. Realimentación.....	23
<b>2. Metodología Experimental.....</b>	<b>24</b>
2.1. Piezas Estudiadas.....	24
2.2. Análisis de Composición Química.....	24
2.3. Análisis Macroscópico.....	25
2.4. Análisis Metalográfico.....	25
2.5. Ensayo de Dureza.....	25
2.6. Ensayo de Abrasión.....	25
2.7. Análisis Huella de Desgaste.....	27
2.8. Fabricación de pastillas con ABLC.....	28
2.9. Tratamiento Térmico en Pastilla de Lucaal.....	28
<b>3. Resultados y Discusión.....</b>	<b>29</b>
3.1. Fabricación de Pieza Fundida.....	29
3.1.1. Modelo.....	29

3.1.2. Sistema de Alimentación y Realimentación.....	30
3.2. Tratamiento Térmico en Pastilla LUCAAL 1° Partida.....	46
3.3. Caracterización de Pastillas.....	46
3.3.1. Análisis de Composición Química.....	47
3.3.2. Análisis Macroscópico.....	49
3.3.3. Metalografía.....	54
3.3.4. Medición de Dureza.....	59
3.3.4.1. Método Rockwell.....	59
3.3.4.2. Método Vickers.....	60
3.4. Ensayo de Desgaste.....	62
3.4.1. Análisis de las Huellas de Desgaste.....	67
3.4.1.1. Análisis Macroscópico de las Huellas de Desgaste.....	67
3.4.1.2. Análisis con SEM.....	68
3.5. Comportamiento en Servicio.....	75
<b>4. Conclusiones.....</b>	<b>79</b>
<b>5. Referencias.....</b>	<b>80</b>
<b>Anexo I.....</b>	<b>81</b>

## Resumen

Este proyecto final de carrera estudió los materiales utilizados en las pastillas de una máquina mezcladora de asfalto, motivado por el desgaste y, ocasionalmente, las roturas que sufren estas piezas. Las pastillas son componentes importantes de la mezcladora y sufren un desgaste severo como principal sollicitación, debido a que trabajan en movimiento constante y en contacto con la mezcla asfáltica. El consumo y reemplazo de las pastillas influyen en el costo de mantenimiento, y también afectan la calidad del producto final, la eficiencia de producción y la disponibilidad de la planta. La producción de una mezcla asfáltica requiere mantener una proporción óptima de asfalto de alrededor del 4,8 %, combinado con piedra, preferentemente granítica debido a su mayor resistencia. La mezcla debe aplicarse a una temperatura ideal de 150 °C para su uso en calles o rutas y luego compactarse en una ventana entre los 120 °C y los 60 °C.

Este trabajo se enfocó en el problema del desgaste y rotura de las pastillas de la máquina mezcladora, en la planta de asfalto del Ente Municipal de Vialidad y Alumbrado (EMVIAL) del Partido de General Pueyrredón. Estas piezas, en contacto constante con materiales abrasivos, en particular piedra granítica o cuarcítica, sufren desgaste abrasivo, lo que incrementa los costos de mantenimiento y los tiempos de inactividad, afectando la productividad de la planta. Además, las pastillas también pueden sufrir roturas, lo que ocasiona que las porciones de pieza desprendidas contaminen la mezcla asfáltica. Actualmente, el EMVIAL tiene tres proveedores para estas piezas o elementos de sacrificio.

Para este proyecto final se propuso realizar un estudio completo de las pastillas utilizadas, incluyendo una caracterización química, microestructural, macroscópica, mecánica y tribológica (resistencia al desgaste). Se analizó el proceso de fabricación por colada de las pastillas para identificar las causas que promueven la aparición de defectos en la solidificación. También se evaluó la posibilidad de usar un acero colado de ultra alta resistencia como material alternativo a las fundiciones de hierro utilizadas actualmente.

Como resultado de este trabajo, se observó la muy buena resistencia a la abrasión de las fundiciones blancas, atribuida principalmente a su elevada concentración de carburos de alta dureza. Por su parte, las pastillas de acero bainítico libre de carburos (ABL) y las de fundición nodular austemperada (ADI), ambas con una matriz bainítica, aunque con resistencia a la abrasión inferior a la fundición blanca, igualmente poseen un rendimiento frente al desgaste muy bueno, y superior al de la fundición nodular en bruto de colada y con matriz ferrítico-perlítica.

## Justificación del Trabajo y Objetivos

El proyecto se vio motivado por el interés del EMVIAL en conocer la causa del rápido desgaste de las pastillas de la mezcladora de asfalto, en su nueva planta de asfalto. También se observaron eventos de rotura de pastillas.

En la industria de la fabricación de asfalto el desgaste y rotura de las pastillas en las mezcladoras de asfalto, representa un problema que afecta la eficiencia operativa y la productividad, la calidad del producto final, y aumento en los costos de mantenimiento.

En primer lugar, el desgaste excesivo de las pastillas conduce a una reducción en la eficiencia operativa de las mezcladoras de asfalto, ya que impone un consumo energético adicional para producir el mezclado. Además, aumenta la frecuencia y la duración de los tiempos de inactividad para llevar a cabo tareas de mantenimiento y reemplazo. Esto no sólo incrementa los costos operativos, sino que también puede impactar negativamente en la capacidad de producción de la planta. Además, el daño de las pastillas pueden comprometer la calidad del asfalto producido, resultando en asfalto con propiedades físicas y mecánicas inferiores, lo que a su vez afecta la durabilidad y el rendimiento de las superficies pavimentadas. Por lo tanto, como objetivo general se busca mejorar la eficiencia operativa de la mezcladora de asfalto, intentando reducir los costos asociados a la sustitución de pastillas y el mantenimiento en general, y también asegurar la producción consistente de asfalto de alta calidad.

Como objetivos particulares para el desarrollo de este proyecto final surgen los siguientes:

Por un lado, caracterizar las pastillas de los actuales proveedores del EMVIAL, a través del análisis microestructural, mecánico y tribológico (desgaste).

Por otro lado, fabricar nuevas pastillas utilizando acero colado de ultra alta resistencia (HSS), actividad que acopla con un proyecto final realizado por D'Amico (2023) y con el trabajo de investigación que se realiza en el Área Metalurgia y el Grupo Tribología del Departamento Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Analizar el tribosistema en el que se desenvuelven las pastillas, a través del análisis de las huellas de desgaste, determinando el micro mecanismo de abrasión, y comparando con el que actúa en el ensayo de laboratorio.

Evaluar la resistencia al desgaste de las pastillas de acero colado, a través de ensayos de laboratorio, comparando su rendimiento con las pastillas de los proveedores del EMVIAL.

## 1. Introducción

El tema propuesto para este proyecto final, surge del vínculo preexistente entre el Ente Municipal de Vialidad y Alumbrado (EMVIAL) del Partido de General Pueyrredón, y el Grupo Tribología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, que llevó en el pasado al estudio del desgaste de distintos elementos de máquinas.

El EMVIAL es el organismo encargado de planificar, gestionar y mantener la infraestructura vial en el área urbana de Mar del Plata y sus alrededores, planificando y ejecutando obras viales.

En la actualidad, el interés del EMVIAL es estudiar los elementos de sacrificio utilizados en la mezcladora de su nueva planta de asfalto, denominados pastillas.

El asfalto es una sustancia de alta viscosidad a temperatura ambiente, obtenida a partir de la destilación del petróleo crudo, que por sus propiedades se utiliza para asfaltar o revestir superficies. Entre sus propiedades principales se encuentran que es impermeable y que es plástica a temperatura algo superior a la ambiente (entre 50 °C y 150 °C), lo que posibilita su uso para el asfaltado de calles o carreteras, en donde encuentra su mayor campo de aplicación.

Para el asfaltado de calles, el asfalto se mezcla con otros elementos, por ejemplo, piedra, arena y cal, constituyendo un agregado, comúnmente denominado también asfalto, que se deposita sobre un terreno o sustrato con la preparación adecuada, a menudo constituido por bloques de hormigón armado. De esta manera, el asfalto actúa como una capa impermeable que protege el sustrato contra las filtraciones de agua y, además, provee una superficie suficientemente lisa para brindar un buen confort para el tránsito de vehículos.

Por lo tanto, para la preparación del asfalto se requiere mezclar diversos elementos, entre ellos el asfalto en estado fluido, piedra de granulometría y resistencia adecuadas, arena y cal, entre otros. Esta operación se realiza en una instalación denominada planta de asfalto, en la que entre los últimos elementos o máquinas que la componen se encuentra la mezcladora de asfalto. Esta máquina está constituida por una gran batea, dentro de la cual se alojan dos ejes paralelos que giran en sentido contrario uno respecto del otro, y poseen brazos que en sus extremos soportan los elementos con forma de placa o paleta, denominados pastillas. El movimiento de los brazos y en particular de las pastillas produce la mezcla de los distintos elementos que constituyen el agregado asfáltico.

Como consecuencia de lo anterior se produce un desgaste significativo en la máquina y de las pastillas en particular, que son consideradas elementos de sacrificio, suponiendo su reemplazo periódico. El desgaste implica también una pérdida gradual de eficiencia de la máquina. Además, debido a la presencia de defectos en el material, originados en su proceso de fabricación, las pastillas también pueden sufrir una rotura catastrófica o repentina, en el montaje o en servicio.

De lo anterior se desprende que el reemplazo de pastillas en una máquina mezcladora de asfalto y sus tareas asociadas, constituyen un insumo importante en el costo de funcionamiento de una planta de asfalto. Pero también, el desgaste de las pastillas y su

consecuente cambio de geometría, produce la pérdida de eficiencia de mezclado y variaciones en la calidad del producto final.

Por lo tanto, para este proyecto final de la carrera ingeniería mecánica, se eligió como tema de trabajo el **Estudio de Pastillas para Mezcladora de Asfalto**, realizando la **Caracterización y Desarrollo de Piezas, Original y Alternativas**. El trabajo contempla el análisis de pastillas de distintos proveedores, realizando la caracterización macroscópica y microscópica de piezas nuevas y en servicio. También se realizó la caracterización mecánica a través de ensayos de dureza y el análisis de la resistencia al desgaste por abrasión en laboratorio.

### 1.1. Tipos de Planta de Asfalto

Existen varias tecnologías para la fabricación de asfalto, cada una con sus propias características y ventajas, y que dan origen a distintos tipos de plantas de asfalto como se listan a continuación:

- Plantas de Asfalto en Caliente: Los agregados del asfalto, se calientan y se mezclan con el asfalto en una unidad de mezcla en lote. Se permite un control preciso de las proporciones de los materiales y las temperaturas en el proceso, accediendo así a diferentes fórmulas de mezcla. Es ideal para proyectos que requieren mezclas de asfalto especiales.
- Plantas de Asfalto en Continuo: Los agregados y el asfalto se mezclan de manera continua a medida que avanzan a lo largo de un tambor rotatorio. Tiene alta capacidad de producción, menor flexibilidad en los cambios de fórmula de mezcla y es adecuada para grandes proyectos o una demanda constante y rápida.
- Plantas de asfalto con Mezcla por Lotificación: Funcionamiento similar a la planta de asfalto en caliente, pero con la adición de un sistema de almacenamiento que permite mantener la mezcla caliente durante períodos prolongados. Permite el control preciso de las diferentes mezclas y mantiene la temperatura hasta el momento de aplicación.
- Plantas de Asfalto en Frío: Los agregados no se calientan para ser mezclados con el asfalto líquido. Es adecuada para preparaciones rápidas, con menos consumo de energía.
- Plantas de Asfalto con Reciclaje: se incorporan materiales de asfaltos reciclados en la mezcla. Reduce los costos y el impacto ambiental.
- Plantas de Asfalto con Sistemas de Dosificación Avanzada: Están equipadas con sistemas de control y dosificación de alta precisión que permiten ajustes en tiempo real. Mejora la consistencia y calidad de la mezcla.

El EMVIAL cuenta con una planta de asfalto en caliente modelo EM 80 A, provista por el fabricante argentino Lucaal de la provincia de Córdoba.

## 1.2. Introducción al Proceso de Mezcla Asfáltica:

El proceso se basa en calentar, secar y homogeneizar la mezcla de los componentes, para luego añadir el asfalto. La proporción óptima de asfalto en la mezcla es importante, utilizando alrededor del 4,8 %, para asegurar la calidad del producto final. La temperatura de mezclado o preparación del asfalto posee un rango de 140 °C a 190 °C, mientras que la ventana de temperaturas para su aplicación y compactación está entre 60 °C a 120 °C.

La mezcla asfáltica se compone de piedra, polvo de piedra, arena y asfalto en estado líquido que se utiliza como ligante. Inicialmente en el EMVIAL se utilizaba piedra cuarcítica, debido a su accesibilidad y bajo precio, pero no aportaba el mejor rendimiento por ser frágil, con alto desgaste que genera polvillo, por un lado, nocivo para la salud y, por otro lado, es absorbente y provoca un consumo mayor asfalto para la misma calidad de mezcla. Hoy en día, se utiliza piedra granítica ya que tiene mayor durabilidad, mayor resistencia al desgaste y es menos absorbente; lo que la hace ideal para la mezcla de asfalto. En la Figura 1.1 se observan ambos tipos de piedra.



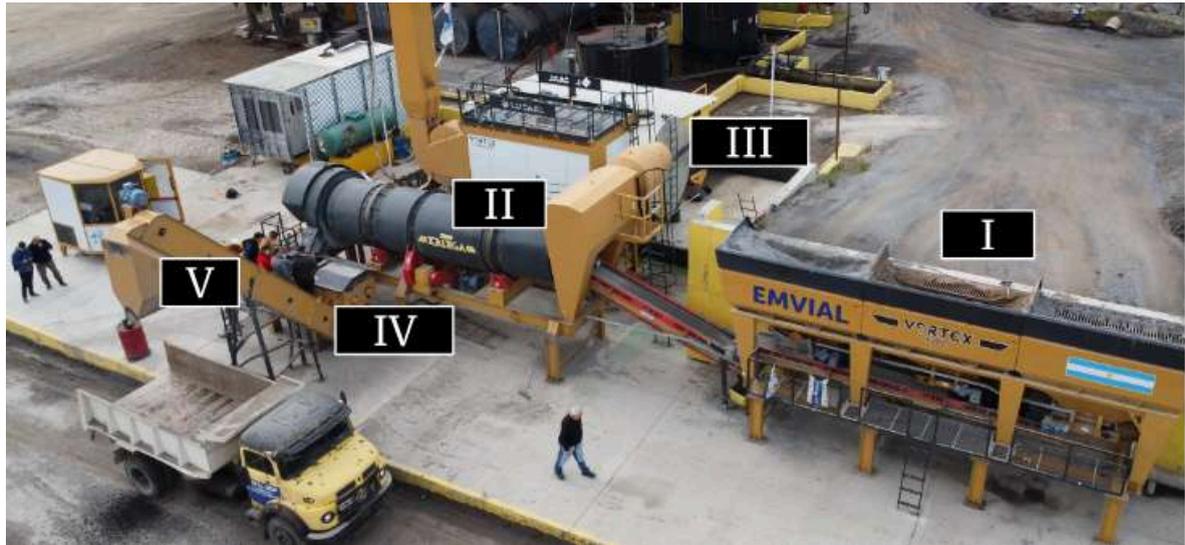
**Figura 1.1.** Piedra granítica (izquierda) y piedra cuarcítica (derecha).

Con la adquisición por el EMVIAL de la nueva planta de asfalto nacional, se ha mejorado significativamente la calidad y eficiencia del proceso. Esta planta utiliza gas natural para los quemadores, haciéndola más económica y eficiente. La capacidad de producción de esta planta es de 60 a 80 toneladas por hora, con un proceso más compacto y fácil de mantener. Durante el proceso de producción, el asfalto se calienta para garantizar su fluidez y eficacia en la mezcla. La planta cuenta con tanques de almacenamiento y sistemas de suministro automatizados para asegurar un flujo constante de materiales. A pesar de los desafíos logísticos, como la disponibilidad de gas natural, la nueva planta ha demostrado ser una inversión rentable y una mejora significativa en la calidad del producto final.

El proceso productivo en la nueva planta consta de cinco etapas principales que se observan en la Figura 1.2. La primera etapa implica la dosificación de materiales secos, que incluyen arena, polvo de piedra y piedra granítica (I). Estos materiales son agregados mediante unos dosificadores y con la cinta transportadora son dirigidos hacia el horno a gas (II), donde se realiza el secado y calentamiento de los agregados. Este proceso es necesario para asegurar la calidad del asfalto producido.

Mientras los agregados se calientan en el horno, el asfalto líquido es calentado para mejorar su fluidez y luego ser bombeado desde los tanques de almacenamiento (III). La etapa siguiente es la mezcla de los distintos agregados, donde los componentes secos previamente calentados se combinan con el asfalto líquido en la mezcladora (IV). La mezcla asfáltica resultante debe ser homogénea y de la consistencia adecuada para su aplicación.

Finalmente, el asfalto es transferido al camión para su transporte (V). Este último paso completa el proceso productivo, listo para distribuir el asfalto a los sitios de construcción correspondientes.



**Figura 1.2.** Planta de asfalto del EMVIAL, marca Lucaal modelo EM 80 A.

El trabajo de este proyecto final se focaliza en la mezcladora asfáltica, con especial énfasis en las pastillas. Como se mencionó anteriormente, la mezcladora es el lugar donde se combina el asfalto líquido con el compuesto de arena y piedra. Debido a las características de estos elementos, el ambiente dentro de la máquina es abrasivo, lo que hace que el diseño y la composición de los componentes sean cruciales para garantizar la vida útil de la máquina.

Las mezcladoras de asfalto de ejes paralelos están diseñadas para maximizar la eficiencia en la producción de mezclas asfálticas mediante un proceso continuo. A continuación, se detallan algunos de los principales componentes y su funcionamiento:

**Ejes paralelos:** Giran en direcciones opuestas para crear una mezcla uniforme de los agregados, a través de brazos dispuestos en forma radial que agitan la mezcla de manera uniforme. Los ejes están alineados paralelamente, lo que permite un flujo continuo y consistente del material dentro de la cámara de mezcla.

**Brazos con pastillas:** Los brazos poseen en sus extremos paletas o pastillas, que son los elementos responsables del mezclado. Además, las pastillas se montan con un determinado ángulo respecto de la dirección de los ejes, permitiendo que, además de producir la mezcla de los agregados, estos sean empujados de un extremo al otro de la máquina, posibilitando

el flujo de materiales. Si bien están contruidos en materiales resistentes al desgaste, dada la abrasividad de la mezcla, estos deben ser reemplazados con cierta frecuencia.

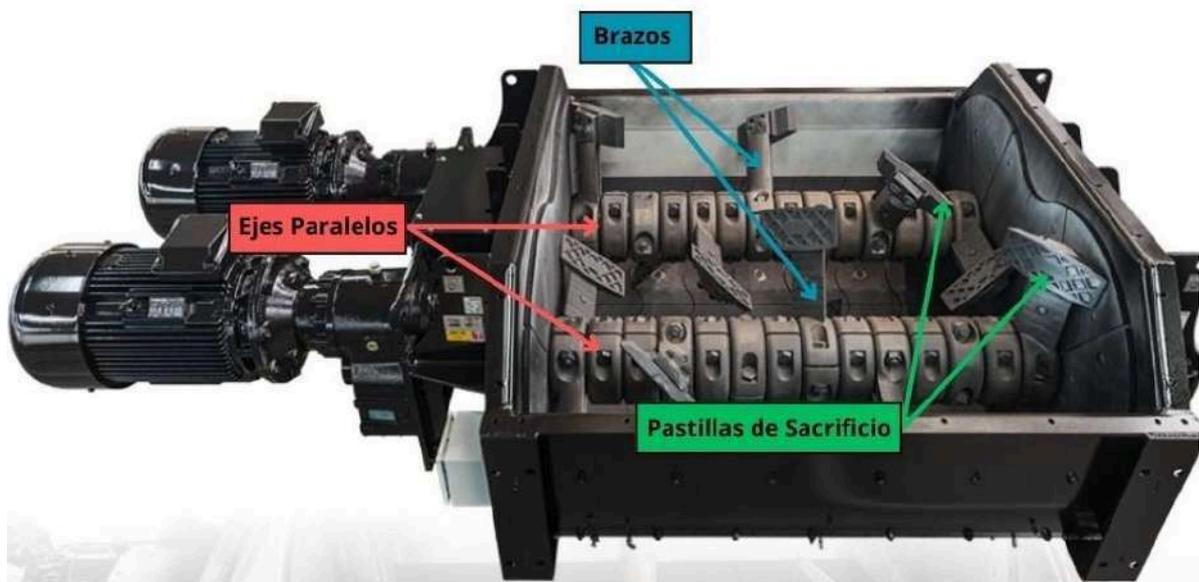
**Cámara de mezcla:** El interior de la mezcladora está diseñado para soportar un ambiente altamente abrasivo. Los materiales que entran, tanto el asfalto líquido como los agregados, deben mezclarse de manera homogénea. Esto se logra mediante la agitación constante proporcionada por los brazos giratorios.

**Sistema bidireccional:** Los brazos de mezcla tienen un diseño que permite girar en ambos sentidos, lo que asegura que el asfalto y los agregados se mezclen de manera uniforme, eliminando puntos donde podría haber una concentración desigual de material.

**Inyector de brea líquida:** Un inyector proporciona el asfalto líquido (brea) sobre la mezcla de agregados sólidos que proviene del horno rotativo. El precalentamiento de los materiales es clave para garantizar que la mezcla tenga la viscosidad adecuada para su manipulación y colocación posterior.

**Sistema de descarga:** Una vez que la mezcla alcanza la consistencia, homogeneidad y temperatura deseada, el sistema de descarga permite transferir la mezcla a los camiones que la llevan al lugar de uso.

Las Figuras 1.3 ofrecen una visualización detallada del interior de la mezcladora, mostrando la disposición de los ejes, los brazos y las pastillas.



**Figura 1.3.** Vista del interior de una mezcladora de asfalto, mostrando sus dos ejes paralelos, con etapas de brazos opuestos y las pastillas en sus extremos.

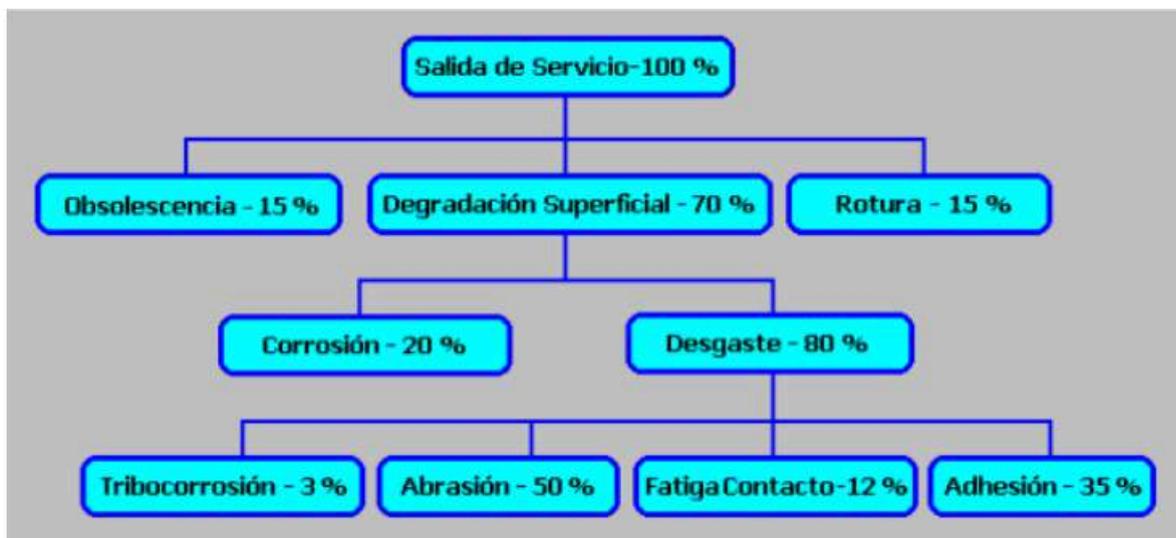
### 1.3. Tribología

La tribología, según la define la norma ASTM G40, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, es la ciencia que estudia los fenómenos relativos a la interacción de superficies, incluyendo la fricción, el desgaste y la lubricación. El alcance, no se limita a las superficies interactuantes, sino que se extiende al entorno físico, químico, térmico, etc., conocido como tribosistema.

Los fenómenos tribológicos llevan a la degradación o daño superficial, que consiste en cualquier alteración del material con o sin pérdida de masa, producida en un elemento de interés, por ejemplo: deformación plástica, cambios de fase, fisuración, oxidación, etc., que, sin comprometer la eficiencia del funcionamiento en forma inmediata, conducirán a la pérdida de masa y hasta a la falla con posterioridad. Por desgaste, se entiende toda remoción o desplazamiento indeseado de material, en un elemento cuya integridad es de interés.

En este proyecto resulta de interés conocer la respuesta tribológica de las pastillas de la mezcladora de asfalto, en particular la resistencia al desgaste.

El desgaste es uno de los tres problemas industriales más frecuentes que conducen al reemplazo de los elementos de máquina. El fin de la vida útil de los elementos de máquina o conjuntos mecánicos se deben a tres motivos principales: obsolescencia, rotura o falla catastrófica y degradación superficial, la cual se divide en corrosión y desgaste, como se observa en la Figura 1.4. La degradación superficial representa el 70 % de las salidas de servicio, y el 80 % de las mismas es por desgaste. El desgaste es la pérdida de material asociada a la fricción entre superficies en movimiento relativo, y las pérdidas económicas asociadas se estima que son entre el 2 % y el 3 % del producto bruto interno (PBI).



**Figura 1.4.** Participación del desgaste abrasivo entre las causas que producen la salida de servicio de los elementos de máquina (Rabinowicz, 1995).

### 1.3.1. Mecanismos de Desgaste

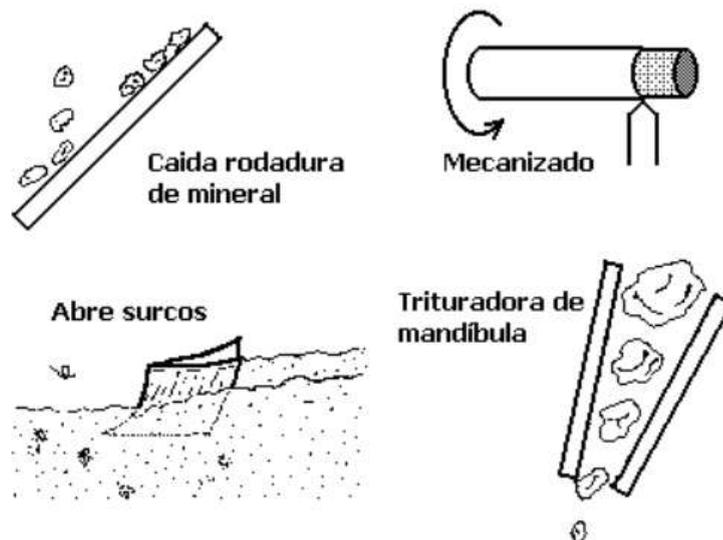
El desgaste se produce según distintos mecanismos, que conducen a la pérdida gradual de masa. Se definen cuatro mecanismos básicos, que se distinguen claramente entre sí por los eventos que tienen lugar a escala microscópica y que llevan a la remoción de material. Estos son: adhesión, abrasión, fatiga de contacto y tribocorrosión. También se definen otros mecanismos que pueden denominarse secundarios, ya que presentan alguna característica en la forma de daño o remoción de masa, que es común con la de los mecanismos básicos, y entre los cuales se encuentran: la erosión, la cavitación, el impacto líquido, el fretting, etc.

En el contexto de esta tesis de grado, resultan de particular interés las características relativas al desgaste por abrasión y, por ese motivo, este mecanismo será desarrollado describiendo sus particularidades.

#### 1.3.1.1. Desgaste por Abrasión

El desgaste por abrasión, según lo define la norma ASTM G40, se debe a la acción de partículas o protuberancias duras que son forzadas contra una superficie sólida y se mueven a través de ella dejando un surco y removiendo material.

El efecto de la abrasión es particularmente evidente en áreas industriales como agricultura, minería, movimiento de tierra y, esencialmente, en cualquier lugar donde sean manipulados o procesados minerales, roca y polvo, tal como ocurre en las instalaciones que motivan este proyecto final. La Figura 1.5 muestra en forma esquemática algunos casos típicos en los que se produce desgaste por abrasión, aunque también tiene lugar en piezas que deslizan con o sin lubricación.



**Figura 1.5.** Situaciones típicas en las que se presenta el desgaste por abrasión.

Cuando dos superficies entran en contacto, puede producirse desgaste en ambas, pero generalmente se focaliza la atención en la que representa el mayor costo económico, mientras que la otra se considera la superficie abrasiva. El desgaste por abrasión no sólo produce pérdida de material, sino que también produce una gran cantidad de material endurecido por deformación y transformación de fase, comúnmente transformación martensítica en aceros.

#### 1.3.1.1.1. Clasificación de la Abrasión

La abrasión es un fenómeno complejo, en el cual se ven involucradas un número grande de variables, de cuyas combinaciones surgen una gran variedad de situaciones en las que, si bien son todas consideradas como desgaste abrasivo, la severidad de la sollicitación y la respuesta de los materiales puede cambiar notablemente. Por esta razón es que se han desarrollado formas de clasificar la abrasión, basadas en:

1. Clasificación por Situación, considera las variables de entrada del sistema
2. Clasificación por Manifestación, que considera las variables de salida del sistema
3. Clasificación por Micro-mecanismo, que considera la forma de remoción a escala micro

Cabe destacar que todo tribosistema puede ser clasificado según cualquiera de las consideraciones anteriores.

#### Clasificación por Situación. Abrasión por Dos y Tres Cuerpos.

Los elementos principales que componen un tribosistema pueden clasificarse como: primer cuerpo, segundo cuerpo, elementos interfaciales o tercer cuerpo, medio externo, movimiento relativo y fuerzas de contacto. El primer cuerpo es el elemento cuyo desgaste interesa prioritariamente. El segundo cuerpo es el que actúa de contracara, cuyo desgaste no interesa en primera instancia, y que se encuentra en movimiento relativo respecto al primer cuerpo, y en contacto directo o indirecto con el mismo, de modo de poder transmitir fuerzas. En general es el primer causante del desgaste del primer cuerpo. El tercer cuerpo es todo elemento interfacial, que puede ser externo o haber sido generado por el desgaste mismo, o cualquier otra condición especial que se encuentre en la interfaz entre los dos primeros.

En esta clasificación existe una interpretación dominante en la bibliografía, según la cual, la abrasión de dos cuerpos es producida por protuberancias firmemente adheridas a una superficie, que dejan surcos en la otra al deslizar, como por ejemplo la abrasión producida por un papel de lija. Por otro lado, en la abrasión por tres cuerpos, el desgaste lo produce un tercer elemento, usualmente partículas abrasivas sueltas entre dos superficies con movimiento relativo, que pueden ser incrustadas o generar surcos, sobre una o ambas superficies, como por ejemplo una pala cargadora frontal manipulando piedra suelta. En la abrasión de dos cuerpos, la huella de desgaste posee surcos profundos, continuos y paralelos, mientras que en la abrasión por tres cuerpos se observa que los surcos poseen diferente dirección, largo variable, e indentaciones.

El modo de abrasión en el tribosistema motivo de estudio en este proyecto final es el de tres cuerpos.

#### Clasificación por Manifestación. Abrasión por Gouging, Alta Presión y Baja Presión.

Se denomina abrasión por gouging al desgaste producido por abrasivos grandes, en general con tamaño superior a 50  $\mu\text{m}$ . La distinción entre abrasión por baja presión y alta presión, considera si se produce la fractura del abrasivo. Esto es importante ya que al fracturarse, se generan nuevos bordes cortantes en el abrasivo y esto promueve una mayor tasa de desgaste, aunque al reducir el tamaño produce una disminución de la tasa.

Una de las falencias de esta clasificación es que debería establecer un límite para separar gouging de alta presión. Un intento por establecer esta diferencia, se basa en que las tensiones en gouging son suficientemente elevadas como para generar deformación plástica generalizada, pudiendo afectar el material hasta varios milímetros por debajo del surco. La trituradora de mandíbulas es un equipo en el cual se produce gouging y abrasión por alta presión.

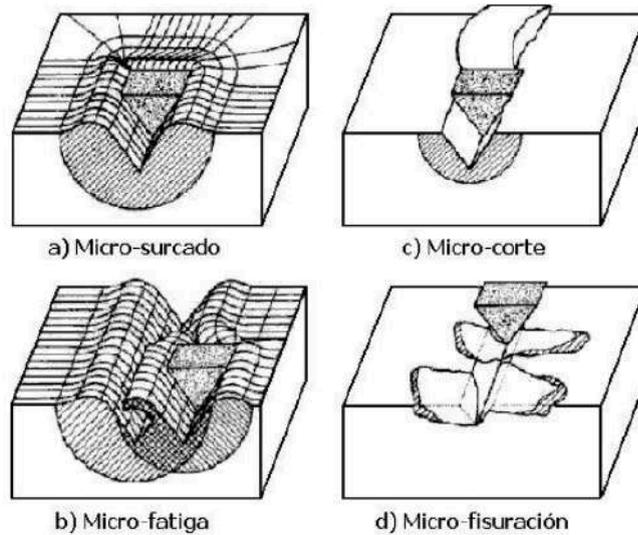
El modo de abrasión en las pastillas, considerando su manifestación, es el de baja presión.

#### Clasificación por Micro-mecanismos de Remoción. Surcado, Fatiga, Corte, Fisuración.

Se distinguen cuatro tipos de interacciones o micro-mecanismos de remoción entre partículas abrasivas y el material desgastado, Figura 1.6. Una de ellas es el micro-surcado, en el que, en el caso ideal, el volumen de material correspondiente al surco es desplazado por deformación plástica hacia los bordes, sin producir pérdida de masa, Fig 1.6 a). Otro mecanismo es la micro-fatiga, en que la remoción tiene lugar por el solapamiento de surcos, como el descrito anteriormente, Fig.1.6 b), ya que las pasadas sucesivas agotan la capacidad de deformación del material, llevando a la fatiga de bajos ciclos.

El micro-corte es el tercer tipo de interacción que produce abrasión y, en el caso ideal, se observa que la pérdida de volumen en forma de viruta, poseen el mismo volumen que el surco del cual proviene, Fig.1.6 c). La micro-fisuración es el cuarto mecanismo, que ocurre cuando la tensión concentrada que impone una partícula abrasiva, es aplicada sobre la superficie de un material frágil. Se desprenden partículas de desgaste debido a la formación y propagación de fisuras cuyo volumen puede ser incluso superior al del surco, Fig.1.6 d). Materiales frágiles, tienden a sufrir la abrasión por micro-fisuración, como ocurre al rayar un vidrio.

No obstante, en general la abrasión se presenta como una combinación de micro-mecanismos y, en particular en los metales se combinan micro-surcado y micro-corte. Esta es la situación presente en las piezas estudiadas en este trabajo.

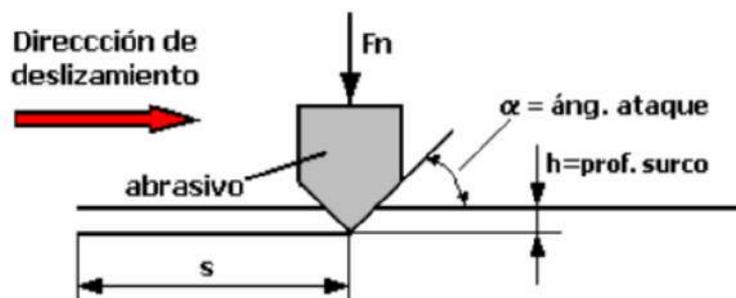


**Figura 1.6.** Los cuatro micro-mecanismos de remoción por abrasión, a) micro-surcado, b) micro-fatiga, c) micro-corte, d) micro-fisuración.

Relación Dureza/Capacidad de deformación.

Cuando una superficie sufre abrasión, se generan huellas de desgaste en forma de surcos, cuyo volumen está relacionado con el desgaste producido. El cálculo del volumen de un surco, a través de la Ecuación 1, es una forma sencilla de evaluar el desgaste producido por abrasión, Figura 1.7. La Ec.1 es conocida como ecuación de Archard (1953), y es uno de los primeros modelos analíticos presentados para calcular el desgaste por abrasión de dos cuerpos, justificando la suposición, generalmente válida, que el aumento de dureza también aumenta la resistencia a la abrasión. La constante  $k$  depende de la geometría del abrasivo y del ángulo de ataque,  $\alpha$ ; y  $h$  también depende de la geometría del abrasivo, de la carga normal,  $F_n$ , y de la dureza del material,  $H$ .

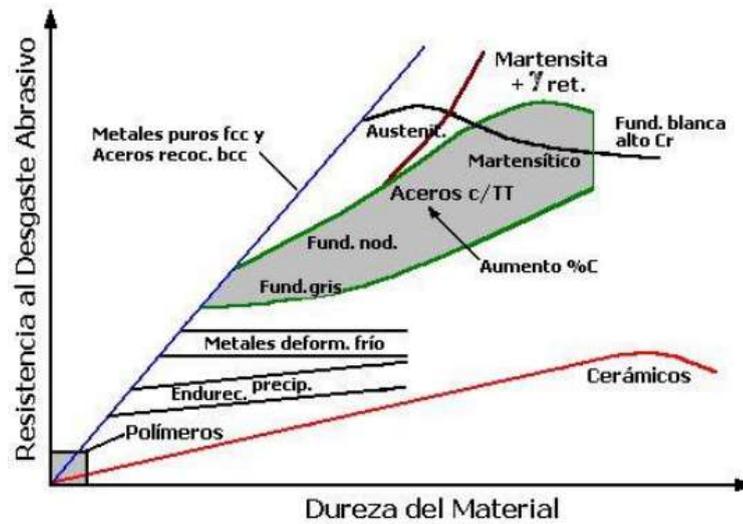
$$V = k * \frac{F_n * S}{H} \quad \text{Ecuación 1}$$



**Figura 1.7.** Esquema de una partícula produciendo abrasión, y las variables involucradas en el modelo de Archard.

No obstante, si bien se ha demostrado que esta tendencia es correcta para metales puros (Khrushov y Babichev, 1958), en aceros no se manifiesta de forma tan marcada. Muchos

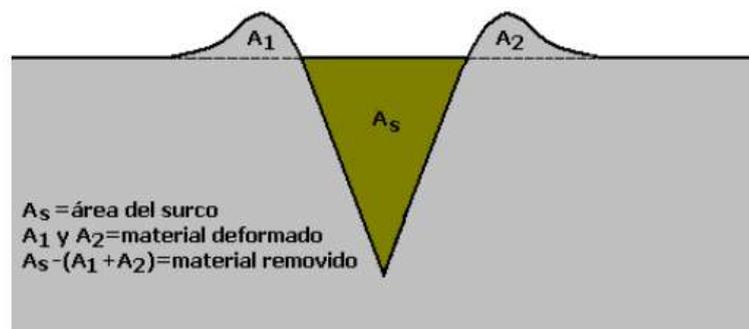
materiales pueden incrementar notablemente su dureza, aunque la resistencia a la abrasión puede incluso disminuir, como se observa en la Figura 1.8. Estas situaciones quedan ocultas en la constante experimental  $k$  de la ecuación de Archard (Ec. 1).



**Figura 1.8.** Resistencia al desgaste relativa en función de la dureza, para diferentes materiales, metales puros y aleaciones (Khrushchov y Babichev, 1958).

### Grado de desgaste

Se conoce que la abrasión produce la remoción de material en forma de partículas, pero también genera un volumen de material con deformación plástica por debajo del surco, y también a través de la aparición de protuberancias en el borde del surco, Figura 1.9. Por lo tanto, en general la abrasión se produce por una combinación de micro-surcado y micro-corte. El estudio de los surcos de desgaste permite evaluar la relación entre ambos micro-mecanismos, a través del cálculo del grado de desgaste o  $f_{ab}$ , Fig. 1.9 y Ecuación 2, donde  $A_v$  es la sección del surco,  $A_1$  y  $A_2$  es la sección de las protuberancias en los bordes del surco (Zum Gahr, 1987; Zum Gahr, 1988).



**Figura 1.9.** Esquema de la sección transversal de un surco.

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v} \quad \text{Ecuación 2}$$

En general, las interacciones dominantes en materiales dúctiles son micro-surcado y en menor medida micro-corte, mientras que, en los materiales frágiles, por ejemplo un vidrio o un cerámico, domina la micro-fisuración. En el micro-corte ideal  $f_{ab}=1$ , mientras que en el micro-surcado ideal  $f_{ab}=0$ . En condiciones que promueven la micro-fisuración se produce el escamado o spalling (como al rayar un vidrio), generando valores negativos de  $A_1$  y  $A_2$ , y por lo tanto  $f_{ab}>1$ .

El factor  $f_{ab}$  pondera el balance entre la dureza del material abrasado, propiedad a través de la cual se limita la sección del surco, y la plasticidad o capacidad de deformación del material, que es una característica relacionada con la capacidad de absorción de energía. Comparando materiales de igual dureza, aquel que posea mayor ductilidad tendrá mayor resistencia a la abrasión, manifestándose en ese caso con un menor valor de  $f_{ab}$ . No obstante, claramente. Si la diferencia de dureza entre materiales es grande, una ductilidad elevada puede no ser suficiente para compensarla.

Es evidente entonces, que la dureza del material por sí sola, no es suficiente para describir la resistencia por abrasión. Parámetros tales como tamaño de grano, cantidad de austenita retenida o presencia de fases de refuerzo también pueden afectar a la tasa de desgaste. En este sentido, el desarrollo de este proyecto final de carrera, contempla la prueba en campo y/o en laboratorio de un acero bainítico libre de carburos, ABLC (carbide free bainitic steel, CFBS) que en la actualidad es motivo de trabajos de investigación en el Grupo Tribología y en el Área Metalurgia, ambos del Departamento de Ingeniería Mecánica. Este material es potencialmente apto para resistir la abrasión porque posee alta resistencia y dureza, pero, a diferencia de la tecnología empleada en otros aceros, en este caso este resultado se basa en el control del tamaño de la estructura o mezcla de fases. Por lo tanto, en los ABLC la alta dureza es acompañada por una muy buena capacidad de deformación o ductilidad. Esto, por otro lado, lo convierte en un material con buenas perspectivas de uso frente al desgaste por abrasión.

#### 1.4. Aceros Bainíticos Libres de Carburos (ABLC)

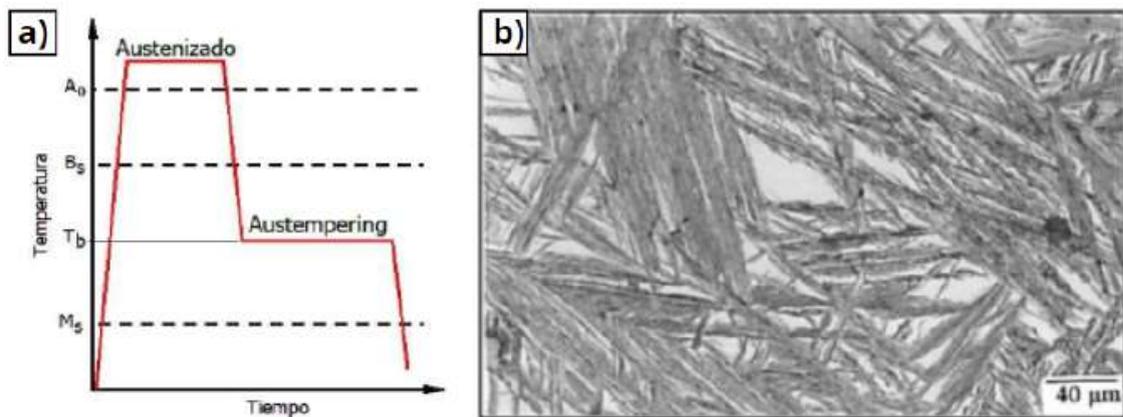
Los aceros bainíticos libres de carburos son una variante de la microestructura bainítica, en la que mediante la adición de Si > 1,5 %, se impide la precipitación de carburos en el austemperado. El silicio tiene la propiedad de inhibir la formación de carburos durante la transformación de la austenita a bainita, permitiendo que el carbono se mantenga disuelto en la austenita residual, en lugar de precipitar en forma de cementita (Cm).

En estos aceros, la bainita se compone de una mezcla de ferrita y austenita retenida, y la ausencia de carburos mejora las propiedades de tenacidad y de ductilidad, mientras que aún se logra una alta resistencia a la tracción, gracias al control de una microestructura muy fina. Este tipo de estructura es particularmente favorable en aplicaciones que requieren resistencia a la abrasión, al impacto y a la fatiga.

Los ABLC suelen formarse a temperaturas intermedias, por encima del rango de la martensita pero por debajo del de la perlita, logrando una estructura más fina y resistente.

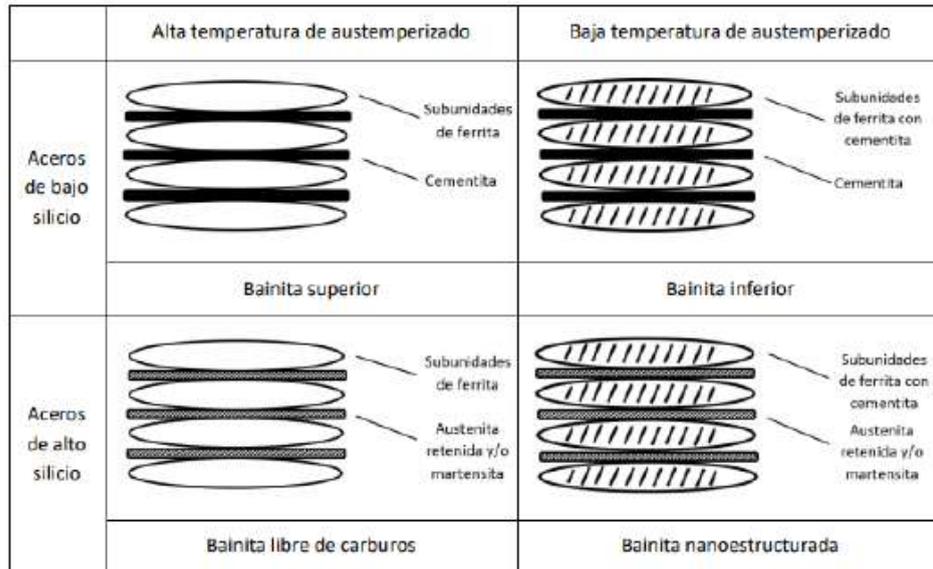
La bainita libre de carburos ha sido aceptada como una variante de la bainita que consiste en subunidades de ferrita bainítica, generalmente en forma de placas, y austenita retenida, la cual permanece estable a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) por dos razones. Primero, el alto contenido de silicio (%Si) en estos aceros retrasa la precipitación de carburos, como la cementita en la austenita, impidiendo que esta transforme en bainita convencional (ferrita + carburos). Segundo, el carbono rechazado por las subunidades de ferrita enriquece la austenita, estabilizándola y evitando su transformación en martensita en el enfriamiento a  $T_{amb}$ .

Con el tratamiento térmico a la temperatura de austempering ( $T_b$ ), seguido del enfriamiento hasta  $T_{amb}$ , como se muestra en la Figura 1.10 a), se obtiene una estructura compuesta por ferrita bainítica, cuya morfología en láminas o agujas depende de  $T_b$ , y austenita enriquecida en carbono en forma de film, sin carburos, como se observa en la Figura 1.10 b).



**Figura 1.10.** Bainita libre de carburos, a) ciclo térmico, b) bainita y austenita retenida.

En el caso de la bainita superior, la inhibición de precipitación de carburos ocurre tanto en la austenita como en la ferrita, dando lugar a la bainita libre de carburos. Sin embargo, en la bainita inferior, la precipitación de carburos no puede suprimirse en las subunidades de ferrita bainítica, obteniendo subunidades de ferrita con cementita y austenita retenida y/o martensita, Figura 1.11.

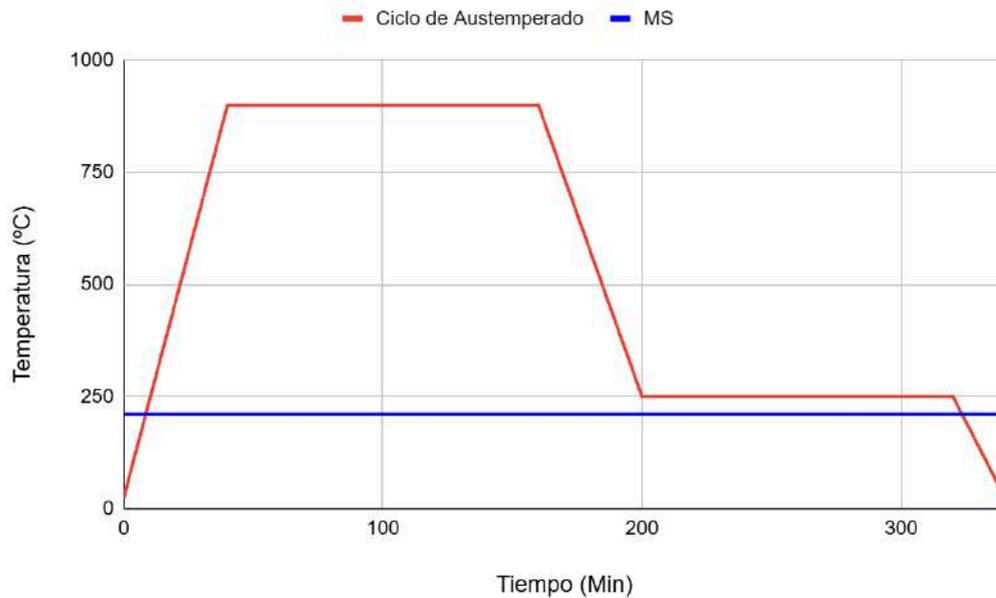


**Figura 1.11.** Morfología de bainita según temperatura de austemperado y contenido de silicio

Una referencia importante en este proyecto final es el trabajo de S.Y. D'Amico (2023), en el que se estudió el comportamiento tribológico de un acero con contenido medio de carbono, alto silicio y aleación con cromo, níquel y molibdeno, sometido a diversos tratamientos térmicos: recocido, normalizado, austemperado y temple. Para el proyecto final se optó por el tratamiento de austemperado que demostró una buena resistencia al desgaste por abrasión en los ensayos ASTM G65 realizados en ese trabajo.

El tratamiento térmico que logra este desempeño y que será utilizado en nuestras pastillas es un ciclo austemperado diseñado para obtener bainita nanoestructurada de ultra alta resistencia. En el mismo se realiza una primera etapa de austenizado a  $T_\gamma = 920\text{ °C}$  durante un tiempo  $t_\gamma = 120$  minutos. Luego se realiza el enfriamiento de la pieza en un baño de sales a  $T_b = 250\text{ °C}$  durante 360 min. En la Figura 1.12 se esquematiza el ciclo, donde se presenta la temperatura  $M_s$ , temperatura a la cual comienza la formación de martensita durante el enfriamiento de un acero desde la fase austenítica.

El austemperado se realiza a esa temperatura con el objetivo de obtener una microestructura que proporcione una mayor dureza. Esto se logra al transformar el material en el límite de la temperatura correspondiente a la transición martensítica.



**Figura 1.12.** Ciclo térmico del tratamiento de austemperado.

## 1.5. Tecnología de la Fundición del Acero

### 1.5.1. Introducción a la Tecnología de la Fundición

La tecnología de fundición es un proceso de fabricación que consiste en verter metal líquido en un molde para crear piezas con formas y tamaños específicos. Es uno de los métodos más antiguos y versátiles de producción de piezas metálicas, utilizado en una amplia gama de industrias.

El proceso de fundición implica varios pasos y es una tecnología de fabricación que ofrece muchas ventajas, como la capacidad de producir piezas complejas con precisión dimensional y muy buen acabado superficial. Además, es económica para la producción en masa y puede utilizarse con una amplia variedad de metales y aleaciones.

Sin embargo, también presenta desafíos, como la necesidad de controlar cuidadosamente los parámetros del proceso para garantizar la calidad y consistencia de las piezas fundidas.

### 1.5.2. Etapas en la Fabricación de Piezas por Fusión

#### 1.5.2.1. Fabricación del Modelo

Un modelo es una pieza de madera, plástica, metálica o de algún material compuesto, que permite obtener el molde a partir del cual se obtiene una pieza por colada. El molde puede realizarse en tierras o arenas de moldeo, que posteriormente serán coladas con algún material en estado líquido, que luego de un determinado tiempo enfríe y solidifique.

La mayoría de los modelos son removidos y se emplean para realizar múltiples moldes, y de ahí el concepto de modelo permanente, molde descartable y molde perdidos.

En el diseño de los modelos es necesario tener en consideración las dimensiones de la pieza final, estas serán un poco mayores a las de la pieza final en función de distintos aspectos.

1. Tolerancia por la contracción: Se debe considerar que un material se contrae en el enfriamiento en estado sólido. Si bien la contracción es volumétrica, se manifiesta preferencialmente en aquellas direcciones en donde las dimensiones de la pieza son mayores. La contracción correspondiente al cambio de estado líquido/sólido es contemplada por el sistema de realimentación.
2. Tolerancia para la extracción: Durante el desmodelado se generan vibraciones o golpeteos, los cuales se deben tener en cuenta.
3. Tolerancia para mecanizado: Cuando una pieza requiere mecanizado posterior, se debe contemplar en el modelo el material a remover.
4. Tolerancia de distorsión: Cuando una pieza es de geometría irregular, su enfriamiento también lo es, y por ello su contracción genera tensiones que tienden a distorsionar la pieza. Dicho efecto debe ser tomado en consideración en el diseño de los modelos.

#### Tipos de Modelos:

Existen dos tipos de modelos, los externos y los internos o también conocidos como noyos, que se utilizan para obtener cavidades dentro de las piezas. Además de diferenciar entre modelos externos e internos, es común clasificarlos de la siguiente manera:

#### Modelos Externos:

- Suelos o naturales, son los más simples y los de menor costo. Por otro lado, el moldeado es manual, lento y la calidad del molde es dependiente de la pericia del operario. En general las formas son sencillas, permitiendo retirar el modelo para su reutilización.
- Placas modelos, se justifican cuando el costo del herramental se amortiza con el número de piezas, o alcanzando la calidad necesaria de la pieza. La gran ventaja de estos modelos, además de facilitar las tareas de desmodelado, es otorgar una alineación precisa en el armado posterior del sobre y el bajero.
- Modelos tipo armadura, terraja y plantilla, de alguna manera suelos, se utilizan cuando se necesita moldear una pieza única, pudiendo ser esta de gran tamaño o cavidades de moldeado de revolución.
- Modelo perdido, se utiliza en la fundición de precisión para producir componentes complejos con detalles intrincados y tolerancias ajustadas. Los modelos perdidos ofrecen ventajas en la producción de piezas únicas o en series pequeñas, ya que permiten una mayor libertad de diseño y una reproducción fiel de los detalles. Se distinguen dos tipos, los de ceras perdidas y los de poliestireno expandido.

#### 1.5.2.2. Operaciones de Moldeo y Mezclas para Moldeo

Esto consiste en fabricar el molde utilizando tierra o arena para moldeo, y su selección depende de las condiciones del metal fundido, del tamaño y forma de la pieza, del número de piezas, de los métodos de fabricación de los moldes y noyos, de la disponibilidad y costo de dichos materiales, y por último, de los requerimientos de calidad. Las mezclas de moldeo deben cumplir diversos requisitos, entre los cuales se distinguen:

- Refractariedad: capacidad para resistir las altas temperaturas propias del metal fundido. Es fundamental que la misma no se funda ni sufra cambios de importancia y será función de los porcentajes presentes de cada fase.
- Resistencia en Verde: es la capacidad del molde de no deformar o desmoronarse al desmodelar o en otras operaciones previas a la colada
- Resistencia en seco: define el comportamiento de materiales de moldeo.
- Resistencia en caliente: define el comportamiento del molde en el momento de la colada, relacionado con la resistencia a la erosión producida por el metal fundido y con el comportamiento de la cavidad al actuar como una “cámara de reverbero”, se refiere a una cavidad o espacio donde el calor es reflejado hacia el metal fundido. . Está afectada por las reacciones molde / metal.
- Permeabilidad: Es la habilidad del molde para permitir el escape de gases y humos propios de la reacción molde / metal, evitando que la pieza quede con defecto como poros, sopladuras, etc.
- Fluidez: es la habilidad de la mezcla para copiar el modelo con los menores esfuerzos necesarios.
- Granulometría y Forma: incide sobre la terminación superficial de la pieza, la abrasividad sobre el modelo, la cantidad de ligante necesario, entre otras.
- Deformabilidad: es la capacidad del molde para permitir las contracciones y dilataciones generadas por las piezas, la capacidad del molde de permitir el desmodelado y también la capacidad de admitir las deformaciones por dilatación propias de las altas temperaturas, sin generar defectos en las paredes del molde.
- Conductibilidad Térmica: es la capacidad de extraer calor y, por lo tanto, con la velocidad de enfriamiento y la microestructura final de la pieza.
- Colapsabilidad: define los esfuerzos necesarios para desmoldar la pieza, buscando que sea la menor posible.
- Estabilidad química: frente a diversas sollicitaciones, ser químicamente estable.
- Vida de banco: como la capacidad de mantener las propiedades entre que fue moldeado y el momento de colada propiamente dicho.

- Vida útil: relacionado con el modo de degradación, tanto de los materiales refractarios como de los ligantes, y estrechamente vinculado con la reciclabilidad.
- Disponibilidad y costo.

Hay distintos tipos de mezclas de moldeo, pero se distinguen las siguientes: arenas en verde: arenas + arcilla + agua; resinas: arenas + ligante orgánico y cerámicos: harinas + ligantes inorgánicos.

### 1.5.2.3. Sistema de Alimentación y Realimentación de la Pieza

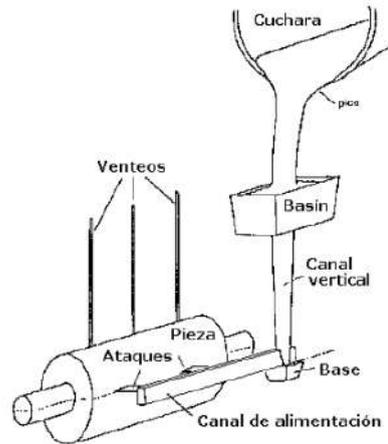
#### 1.5.2.3.1. Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación es un conjunto de canales dentro del molde a través de los cuales se llenan las cavidades del molde (una o varias) de manera completa, evitando a la vez la entrada de óxidos (escorias), la erosión del molde y favoreciendo la salida de gases.

Para ello, se busca una velocidad de llenado del molde en función del peso y del espesor mínimo de la pieza. Esto permite diseñar un sistema de canales con secciones, formas y direcciones, que permitan cumplir el objetivo mencionado, y para ello se deben considerar los siguientes aspectos:

1. El metal debe entrar a la cavidad de moldeo con la mínima turbulencia posible.
2. El flujo debe ser lo más laminar posible, para evitar que las turbulencias atrapen aire, incrementen la formación de óxidos y/o erosionen el molde.
3. Evitar que el primer chorro quede en la cavidad de moldeo (el primer chorro está más frío y arrastra más impurezas).
4. La distribución del metal debe ayudar a una correcta solidificación (direccional en la mayoría de los casos) y asistir de esta manera al sistema de realimentación o mazarotas.
5. El sistema debe incorporar trampas que separen las inclusiones no metálicas que vienen con flujo de metal líquido.
6. El sistema de alimentación debe tener el menor volumen posible, compatible con los aspectos anteriores.
7. Debe evitar la erosión de las arenas aglomeradas del molde.

Un sistema de alimentación cuenta con una serie de elementos, Figura 1.13, entre los que se distingue el basín de colada, que tiene la función de recibir el primer metal que el operador vuelca desde la cuchara. Luego, el canal vertical que es el enlace entre la entrada de metal por encima del molde, hasta el plano donde se une con el canal de alimentación, que es el encargado de distribuir el metal en el molde, a través de los ataques hacia cada una de las cavidades de moldeo.



**Figura 1.13.** Sistema básico de colada.

Hay dos tipos de sistemas de alimentación, y su selección depende de la aleación utilizada. En el primero, el área del estrangulamiento (el área mínima de flujo que determina la velocidad de llenado) está ubicada en los ataques, y será la suma de todos estos. En el segundo, el área de estrangulamiento está en la base del canal vertical, o inmediatamente después en el canal de alimentación horizontal.

#### 1.5.2.3.2. Realimentación

Al solidificar, la mayor cantidad de aleaciones metálicas sufren una contracción por cambio de estado, que debe ser compensada con un reservorio de metal, para evitar que la pieza quede con una cavidad, llamada rechupe, que puede ser interior o abierta a la superficie. Los reservorios deben estar estratégicamente distribuidos en la pieza, y se los denomina realimentadores, aunque también se los nombra como mazarotas o montantes, y su volumen depende de la contracción volumétrica característica de cada aleación, Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Contracción volumétrica por cambio de estado

Metales y Aleaciones	Acero	F Gris	F Nodular	F Blanca	Base Ni	Base Cu	Base Al	Base Mg	Base Zn	Base Pb	Base Sn
%	2,5 -4	1,9	1,7	4,75	4,5	4,2	6,5	4,1	4,7	3,5	2,3

Se tienen en cuenta tres reglas para el diseño de los realimentadores. Estas son:

1. Se debe seleccionar el posicionamiento de la pieza fundida para aprovechar las características naturales de su diseño.
2. El diseño del sistema de alimentación estará directamente relacionado con los montantes realimentadores.
3. Tiempo y temperatura de colada.

## 2. Metodología Experimental

### 2.1. Piezas Estudiadas

Este trabajo incluye el estudio de cuatro variantes de pastillas fabricadas en fundición de hierro utilizadas por el EMVIAL, y una nueva variante desarrollada en este proyecto final, caracterizando en todos los casos la composición química, microestructura, dureza y resistencia al desgaste, y también un análisis macroscópico (relevamiento dimensional, defectos de colada, geometría del desgaste, huellas de desgaste, superficies de fractura, etc.)

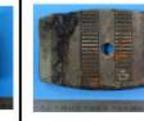
Entre los proveedores de pastillas del EMVIAL se encuentra la empresa Lucaal S.R.L., que es también el fabricante de la planta de asfalto. Está ubicada en Las Varillas, Provincia de Córdoba, y se dedica también desde 1980, a la reparación y fabricación de plantas asfálticas y equipos viales.

Otro proveedor es Guillermo Fracchia S.R.L. una empresa con 80 años de experiencia en el servicio vial, satisfaciendo las necesidades del mercado local e internacional.

Un tercer proveedor de pastillas es el Ing. Iñaki A. Galarreta, dedicado a los servicios metalúrgicos y provisión de piezas para el mercado vial desde hace más de 25 años.

En la Tabla 2.1 se presentan las pastillas de los distintos proveedores de manera genérica

**Tabla 2.1.** Presentación de pastillas.

Identificación	PLFN	PLFB	PGFB	PFFB	PABLC	PLADI
Fabricante	Lucaal	Lucaal	Galarreta	Fracchia	INTEMA	Lucaal + INTEMA
Imagen						

### 2.2. Análisis de Composición Química

La composición de las piezas estudiadas se determinó mediante espectrometría de emisión óptica con excitación por chispa, utilizando un equipo Baird con fuente de excitación DV-6. Los resultados reportados corresponden al promedio de al menos tres determinaciones. Para esta técnica, las superficies fueron preparadas mediante rectificado con piedra de grano 60 y un lijado manual posterior con abrasivo de grano 100. Se empleó una curva de calibración específica para cada tipo de aleación. En el caso de las fundiciones blancas, la curva permite medir hasta un 4,5 %Cr. Si se excede este porcentaje, el resultado se complementa con el uso de una curva de calibración general, que ofrece menor precisión, pero permite un mayor rango de medición. En el caso del acero colado obtenido en este trabajo se utilizó otra curva, cuyo rango de aplicación es apropiado para analizar esa aleación.

### 2.3. Análisis Macroscópico

Se realizó la macroscopía en piezas nuevas y usadas y en probetas de laboratorio, evaluando la presencia de defectos de fabricación y las huellas de desgaste. Este análisis se realizó a ojo desnudo, con lupa binocular estereoscópica y con microscopio óptico de banco y portátil. En todos los casos, las observaciones fueron documentadas a través de imágenes digitales con cámara de video o fotografía.

### 2.4. Análisis Metalográfico

La preparación de las piezas o muestras de mayor dureza se realizó primeramente mediante corte con chorro de agua. Luego, el seccionamiento continuó por métodos convencionales, primero el corte mediante disco refrigerado y luego rectificado con piedra abrasiva de grano 60. A continuación, se utilizó papel abrasivo de grano 100, 180, 240, 400, 600 y 1000, para finalizar con un pulido en paño con una suspensión de alúmina de tamaño 0,3  $\mu\text{m}$ .

Para revelar las diferentes microestructuras, se utilizó el reactivo Nital al 2 %, con tiempo de ataque variable entre 2 y 10 segundos de acuerdo a la microestructura analizada.

También se cuantificó el contenido de carburos en las pastillas de fundición blanca, los que fueron revelados mediante el ataque durante 120 s con una solución en agua de persulfato de amonio (10 % vol). Con esta técnica los carburos se observan blancos en un fondo oscuro.

Para cuantificar el contenido de carburos, se realizó el análisis de imágenes utilizando el software libre ImageJ. El conteo se efectuó sobre micrografías obtenidas con aumentos de 20X y 50X, calculando la fracción de área ocupada por los carburos en relación con la superficie total analizada. Los resultados surgen en cada caso del promedio de tres mediciones a 20X y tres mediciones a 50X, en puntos distintos de las muestras.

### 2.5. Ensayo de Dureza

Acondicionadas las superficies, la dureza se midió siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E18, con un durómetro universal marca Ibertest modelo DU-250, mediante el método Rockwell en la escala C, dureza HRC, que utiliza punta cónica de diamante y carga total de 150 kg fuerza. Los resultados reportados surgen del promedio de al menos seis mediciones.

La dureza también se midió mediante ensayos de micro-indentación con el método Vickers (HV), siguiendo la norma ASTM E384, en zonas dendríticas. Se utilizó un equipo marca Isotest modelo PMH-1000, con una carga de 2,94 N durante 15 segundos. Los resultados reportados también surgen del promedio de al menos seis mediciones.

### 2.6. Ensayo de Abrasión

Para evaluar la resistencia a la abrasión se utilizó el ensayo conocido como de rueda de goma y arena seca, considerado como de baja presión y con abrasivo de partículas redondeadas. Este ensayo responde a la norma ASTM G65, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, que es un procedimiento

estandarizado diseñado para evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de materiales diversos.

El ensayo genera abrasión aplicando una presión moderada sobre una probeta del material evaluado, utilizando arena seca clasificada como abrasivo y una rueda de caucho que transmite la carga de ensayo. Para el ensayo de metales la norma recomienda seguir el procedimiento A, cuyas variables se listan en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Parámetros de ensayo procedimiento A de la norma ASTM G65.

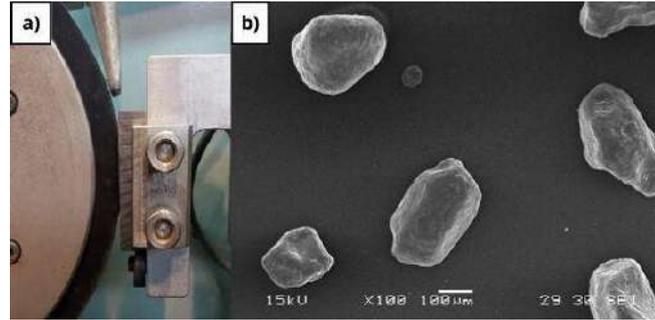
Procedimiento	Carga de ensayo [N]	Revoluciones de la rueda	Abrasión lineal [m]	Tiempo de ensayo [min]	Diámetro de la Rueda [mm]	Velocidad de rotación [rpm]	Caudal de arena [g/min]
A	130	6000	4309	30	229	200	300-400

Durante el ensayo, la rueda de goma gira a una velocidad establecida y ejerce una presión sobre la superficie de muestra. Simultáneamente, entre ambos se interpone un flujo de arena seca de caudal controlado como abrasivo que desgasta la superficie de la muestra. El ensayo se realiza durante un periodo de tiempo determinado, luego del cual se mide la pérdida de peso de la probeta. En la Figura 2.1 se observa un esquema del ensayo y la máquina utilizada.



**Figura 2.1.** Ensayo de desgaste por abrasión según norma ASTM G65, a) esquema de la máquina, b) equipo utilizado, señalando los elementos principales.

En la Fig. 2.2 a) se observa un detalle de la rueda de goma en contacto con la probeta y la boquilla para suministro de arena. En este ensayo se utiliza arena cuarcítica de grano redondeado y tamaño 50/70 (diámetro promedio del orden de 200  $\mu\text{m}$ ), Fig. 2.2 b), con un caudal controlado entre 300 y 400 g/min.



**Figura 2.2.** Ensayo de abrasión según norma ASTM G65, a) detalle de la boquilla para arena y del contacto rueda de goma/probeta, b) geometría y tamaño de la arena cuarcítica 50/70.

Para el ensayo de resistencia a la abrasión de baja presión, se organizaron dos grupos de probetas, cada uno compuesto por cuatro muestras. De estas, tres correspondían a las pastillas a ensayar y una al acero SAE 1010, utilizada como referencia en cada ensayo. La inclusión de esta probeta de acero SAE 1010 tenía como objetivo garantizar el correcto funcionamiento del equipo y la confiabilidad del procedimiento. Cada probeta fue sometida al ensayo de rueda de goma y arena en tres ocasiones, lo que permitió que cada una pase por los tres estadios de arena.

El desgaste relativo  $E$  se calcula como el promedio de los cocientes entre el volumen desgastado en el acero SAE 1010 y el volumen desgastado en la probeta de interés. Para determinar el volumen desgastado, se divide la masa perdida en cada ensayo por la densidad del material.

$$E = \frac{V_{A1010}}{V_{desgastado}}$$

## 2.7. Análisis Huella de Desgaste

Se utilizó una cámara fotográfica Panasonic DMC-FZ70 para capturar imágenes nítidas que permitan observar y caracterizar las huellas de desgaste presentes en las pastillas que estuvieron en servicio.

Para analizar la huella de desgaste, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) en dos tipos de muestras: cortes de secciones de las piezas en servicio y probetas ensayadas en el ensayo de abrasión de rueda de goma y arena. El análisis se llevó a cabo en un microscopio Zeiss modelo FESEM FIB Crossbeam 350, operado a una tensión EHT de 15,0 kV, con una distancia de trabajo focal (WD) comprendida entre 6,2 y 10,5 mm y una apertura que osciló entre 60,0 y 120,0  $\mu\text{m}$ .

Este procedimiento permitió identificar y comparar los micro-mecanismos de desgaste presentes en las diferentes muestras. Asimismo, se evaluó la correspondencia entre las condiciones reales de servicio y los resultados obtenidos en el ensayo de desgaste por abrasión, realizado conforme a la norma ASTM G65.

## 2.8. Fabricación de pastillas con ABLC.

La pastilla de ABLC fue fabricada en la planta piloto del Área Metalurgia del INTEMA utilizando un horno de inducción Hong Teng GWJ-0.1-100/1 de 42 KW con una capacidad de 50 kg para la fundición del acero y una frecuencia media de 2800 Hz. Posteriormente, se sometió a un tratamiento térmico que consistió en el austenizado en un horno de mufla, seguido de un enfriamiento controlado en un baño de sales.

El proceso comenzó con el diseño en 3D de las pastillas utilizando el software Autodesk Inventor bajo una licencia estudiantil. Se seleccionó el diseño más adecuado en base a las pastillas de distintos proveedores y, posteriormente, se generaron los modelos con portada de noyos y sobremedidas para compensar la contracción térmica. Los canales de alimentación, ataques y realimentadores fueron diseñados según cálculos teóricos y validados mediante un software especializado.

Los modelos se imprimieron en 3D en el área de Tecnología Mecánica de la Facultad de Ingeniería y se montaron en una placa modelo para fabricar moldes con arena de río ligada con resina. Se elaboró una hoja de carga para determinar las proporciones de cada elemento a incluir en la fusión del horno inductivo.

El acero, con la composición química requerida, fue colado en el molde y, tras 24 horas, se desmoldeo. Las pastillas fueron separadas de los canales de alimentación y realimentadores, se corrigieron los rechupes superficiales con soldadura por electrodo y, finalmente, se realizó el tratamiento térmico de austemperado.

## 2.9. Tratamiento Térmico en Pastilla de Lucaal

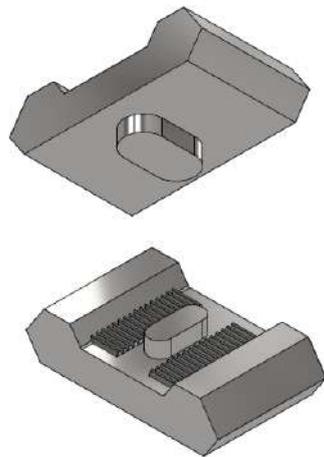
A las pastillas de Lucaal, fabricadas en fundición gris nodular (PLFG), se les realizó un tratamiento térmico de austemperado para transformarlas en un ADI (Austempered Ductile Iron). Este proceso modificó su microestructura, generando una matriz denominada "ausferrita", compuesta por una mezcla de ferrita bainítica (libre de carburos) y austenita retenida. Esta transformación mejora significativamente la dureza del material y su resistencia al desgaste abrasivo. El tratamiento consistió en un austenizado en un horno de caja, seguido de un enfriamiento controlado en un baño de sales.

### 3. Resultados y Discusión

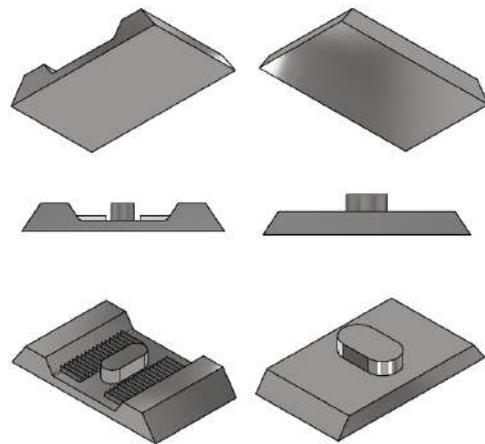
#### 3.1. Fabricación de Pieza Fundida

##### 3.1.1. Modelo

El modelo para la obtención de la pastilla por colada está diseñado con un sobreespesor que compensa la contracción del material durante la transición del estado líquido al sólido. Además, incorpora las portadas de noyos que asegura la formación de los huecos necesarios en la pieza final tras el proceso de colada. El modelo, Figura 3.1, fue fabricado mediante impresión 3D utilizando PLA, seguido de un proceso de masillado para optimizar su acabado superficial. Este diseño requiere una división en dos partes: el sobre y el bajo del molde. La línea de partición, determinada por la geometría de la pieza, garantiza un desmoldeo eficiente, como se ilustra en la Figura 3.2.

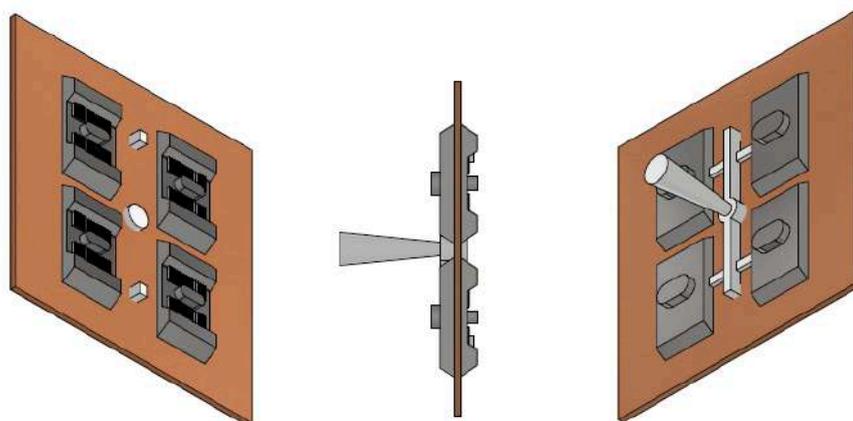


**Figura 3.1.** Modelo de las pastillas.



**Figura 3.2.** Modelo partido.

Se conformó una placa modelo de 4 pastillas para posicionar los modelos partidos y el sistema de alimentación como se observa en la Figura 3.3.



**Figura 3.3.** Placa modelo.

### 3.1.2. Sistema de Alimentación y Realimentación

El diseño del canal vertical, del escoriador y de los alimentadores, depende del sistema, para el cual existen dos tipos.

- Presurizado: El área total de la sección transversal disminuye gradualmente hacia los ataques.
- No-Presurizado: El área total de la sección transversal se incrementa gradualmente hacia los ataques.

Como las pastillas son de acero, se optó por un sistema de alimentación presurizado, que mejora la flotación de inclusiones, y el rápido llenado disminuye la tendencia a la presencia de defectos por enfriamiento prematuro.

En la Tabla 3.1 se listan valores prácticos para la relación entre el área de la sección transversal de la base del canal de bajada, **Canal vertical**, canal horizontal, **Escoriador**, y el área de la sección transversal que se conecta con la pieza, **Alimentadores**, referidas al área del estrangulamiento o “Choke”, **Ac.**

**Tabla 3.1.** Recomendaciones prácticas para el sistema de alimentación.

Aleación	Tipo de pieza	Sistema	Alimentadores	Escoriador	Canal vertical
Acero	Pequeñas	Con presión	1	1,2	1,6
	Medias	Presión parcial	1	1	1,05
			1,5	1	1,2
Grandes	Sin presión	2	1	1	
Hierro gris	Pequeñas y finas	Con presión	1	1,06	1,11
	Medias y pequeñas	Con presión	1	1,1	1,15
	Grandes	Con presión	1	1,2	1,4
Hierro maleable		Sin presión	1,5	1	
Hierro nodular		Con presión	1	2,7	1,3
			1	1,12	1,25
Magnesio y aluminio		Sin presión	4	2	1
			6	3	1
			3	2	4
Bronce		Con presión	1	1,3	1,6
Latones y bronce oxidables		Sin presión	1,5	0,6	1

Cálculo y diseño del sistema de alimentación:

#### 1. Determinación del tiempo de llenado

Es función del metal colado, su masa y el espesor de la pieza, y se calcula mediante la Ecuación 3:

$$t = k_t * \delta^n * W^m \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$t =$  Tiempo de llenado [seg]

$\delta =$  Espesor predominante [mm]

$W =$  Peso del metal líquido que circula por el sistema [kg]

$Kt, n, m =$  Constantes específicas de la Tabla 3.2

**Tabla 3.2.** Constantes para el cálculo del tiempo de llenado.

Tipo de aleación	Kt	n	m
Acero	1,47	0,21	0,34
Hierro gris	0,76	0,23	0,50
Hierro maleable	1,89	0,43	0,50
Hierro nodular	0,97	0	0,50
Aluminio	1,42	0,18	0,50
Bronce	0,47	0,2	0,50

Es importante tener en cuenta que, para el cálculo, el valor W debe tener en cuenta todo el metal líquido de las cavidades de moldeo, incluyendo el que circula por el sistema de alimentación.

#### Cálculo del sistema de realimentación:

Los siguientes criterios permiten realizar el cálculo de los realimentadores para la fundición de las pastillas, estos son:

- El volumen disponible para realimentar será mayor al volumen de contracción de la pieza.
- El montante debe mantener una diferencia de presión que permita realimentar continuamente durante la solidificación, y por eso se ubicará sobre la pieza.
- Se deben considerar las limitaciones de capacidad de realimentar de cada montante.
- El montante debe solidificar en forma suficientemente lenta para asegurar que se dispondrá de metal líquido a lo largo de la cristalización (solidificación) de la sección realimentada, permitiendo así que la solidificación direccional continúe desde la pieza hacia el montante. Para su cálculo utilizaremos el concepto de módulo que esta directamente asociado a factores geométricos.

Se emplearon montantes cilíndricos debido a su facilidad de construcción, los cuales cuentan con un 14 % de su volumen disponible para la alimentación de la pieza. La contracción de la pieza es del 3,25 % del volumen de la pieza, por lo tanto, el volumen mínimo de los realimentadores es de:  $V_{r\ min} = 3,25 \% * V_p = 20,893\ mm^3$ .

Como se mencionó anteriormente, los realimentadores cilíndricos tienen un 14 % de capacidad, y su volumen final mínimo es:  $V_r\ (útil) = 14 \% * V_r \geq V_{r\ min}$ .

Observando las dimensiones de las pastillas, y con la teoría de su enfriamiento, se optó por la colocación de dos realimentadores cilíndricos de 60 mm de diámetro y 90 mm de altura. Esto cumple con los requerimientos de volumen útil, con amplio margen por la baja colabilidad del acero y las complicaciones que esto conlleva en la realimentación:

$$V_r = 254.469 \text{ mm}^3 \times \text{realimentador} \Rightarrow V_r \text{ Total} \times \text{Pieza} = 508,938 \text{ mm}^3$$

$$V_r (\text{útil}) \text{ Total} = 14 \% * V_r \text{ Total} = 71.251 \text{ mm}^3 > V_{r \text{ min}} = 20,893 \text{ mm}^3$$

Al comparar el módulo de la pieza con el módulo de los realimentadores, obtenemos una relación de 1,4. De acuerdo con los requisitos, el módulo del realimentador debe ser al menos un 20% mayor que el de la pieza, y en este caso, se cumple con dicha exigencia.

En la Tabla 3.3, se listan los valores utilizados para el cálculo de colada de la pastilla.

**Tabla 3.3.** Características de la pastilla, utilizadas para el cálculo de la colada.

Cálculo y Diseño sistema de Alimentación		
Material de la Pieza	Acero	
Densidad [ $kg/mm^3$ ]	0,00000785	
Volumen [ $mm^3$ ]	3246473,43	
Constantes Específicas	Kt	1,47
	n	0,21
	m	0,34
Espesor Predominante [ $mm$ ]	45	
Peso del Metal líquido que circula [ $kg$ ]	30	

El tiempo de llenado es  $t = 10$  segundos.

## 2. Encontrar la velocidad media de llenado en el sistema de alimentación

Se calcula mediante la Ecuación 4,

$$Vel [kg/s] = W/t \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$t =$  Tiempo de llenado [ $seg$ ]

$W =$  Peso del metal líquido que circula por el sistema [ $kg$ ]

$$Velocidad \text{ media de llenado} = 30/10 = 2,9 \text{ kg/seg}$$

## 3. Calcular la altura efectiva del metal

$$h_{mp} = H - 0,5 * (h_1^2/h_2) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

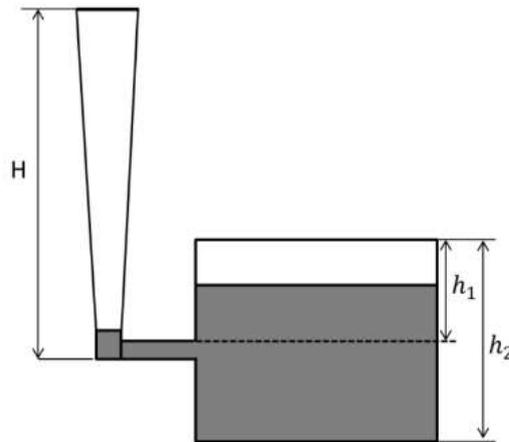
$h_{mp}$  = altura efectiva [mm]

$H$  = altura canal vertical [mm]

$h_1$  = altura de la pieza por encima del punto de entrada del metal

$h_2$  = altura de la pieza

Estas variables se observan en la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Alturas utilizadas en el cálculo de la altura efectiva.

Considerando las dimensiones características de la pastilla, listadas en la Tabla 3.4, se realizaron los cálculos, que resultaron en una altura efectiva

$$h_{mp} = 144,4 \text{ mm}$$

**Tabla 3.4.** Dimensiones utilizadas en el cálculo de la altura efectiva.

Altura del Canal Vertical	H [mm]	150
Altura de la pieza por encima del punto de entrada del metal dentro del molde	h1 [mm]	22,5
Altura de la pieza	h2 [mm]	45

#### 4. Calcular el área de estrangulamiento, $A_c$ (choke)

$$A_c = \frac{1}{fr * t * \sqrt{2g}} * \left[ \frac{Vs}{\sqrt{h_m}} + 1,5 * (h_b) * \frac{Vb}{\sqrt{h_m^3} - \sqrt{(h_m - h_b)^3}} \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$fr$ : factor de fricción

$t$ : tiempo de llenado

$Vs$ : volumen luego del estrangulamiento por encima de la línea de partición.

$Vb$ : volumen luego del estrangulamiento por debajo de la línea de partición.

$h_m$ : altura efectiva

$h_b$ : altura del semimolde inferior ( $h_2 - h_1$ )

$g$  = constante gravedad

El factor de fricción entre el molde y el metal se puede determinar según el peso de la pieza. Como se trata de piezas individuales de aproximadamente 4 kg se opta por un  $fr = 0,6$ .

En el cálculo del área de estrangulamiento se utilizaron los valores listados en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Valores para el cálculo del área de estrangulamiento.

Altura Efectiva	hm [mm]	144,4
Altura del semimolde inferior	hb [mm]	22,5
Factor de Fricción	fr	0,6
gravedad	g [mm/s <sup>2</sup> ]	9820
Volumen luego del estrangulamiento por encima de la línea de partición	Vs [mm <sup>3</sup> ]	1623236,7
Volumen luego del estrangulamiento por debajo de la línea de partición	Vb [mm <sup>3</sup> ]	1623236,7

El área de estrangulamiento del sistema es:

$$A_c = 315,6 \text{ mm}^2$$

#### 5. Determinar la relación de secciones en base al tipo de sistema de alimentación

Según la Tabla 3.1 se determina un sistema de alimentación para piezas pequeñas con presión. Siendo, 1:1, 2:1,6.

#### 6. Calcular y diseñar el canal horizontal y de ataque

Continuando con el análisis del sistema presurizado, el área del canal de ataque se calcula dividiendo el área de estrangulamiento del sistema entre la cantidad de ataques presentes. De esta manera, se determina que cada ataque a la pieza tiene un área de 78,9 mm<sup>2</sup>, lo cual corresponde a unas dimensiones de 5 mm × 15 mm aproximadamente.

En relación con el canal horizontal, su área debe ser 1,2 veces el área de estrangulamiento. Se utilizan únicamente dos canales de alimentación horizontal, las dimensiones adecuadas son de 10 mm x 20 mm. Además, los canales horizontales se extienden más allá del último ataque para permitir la instalación de un depósito donde se acumula el primer chorro de metal líquido, que contiene las impurezas.

#### 7. Diseñar el canal de bajada

- a. Cálculo de las secciones y conicidad del canal de bajada

En base al teorema de Bernoulli,  $V^2 = 2gh$  y la ley de continuidad,  $Q = A_1 * V_1 = A_2 * V_2$ , se obtiene:

$$\frac{A_3^2}{A_2^2} = \frac{h_s}{h_b} \quad \text{Ecuación 7}$$

La sección superior del canal de baja es de:  $1194,1 \text{ mm}$ , siendo  $h_s$  (altura del basín) =  $20 \text{ mm}$   $h_b = \text{la altura total como la altura efectiva} + h_s$

Contemplando que el canal de bajada debe ser 1,6 veces el área de estrangulamiento se obtienen los diámetros como:  $D = 45 \text{ mm}$  y  $d = 25 \text{ mm}$ .

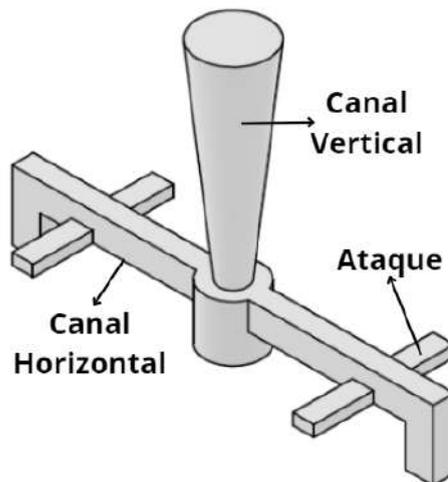
b. Cálculo de la base del canal de bajada

Su área deberá ser de 5 veces el área de la sección inferior del canal de bajada y su profundidad el doble de la profundidad de los canales horizontales en su inicio. Siendo estos,  $D_2 = 60 \text{ mm}$  y  $h = 40 \text{ mm}$ .

**8. Cálculo de la velocidad máxima y su relación con la velocidad admisible**

La velocidad máxima se alcanza en la menor área, es decir, en los ataques a las piezas. Al comparar la velocidad máxima admisible de  $0,6 \text{ m/s}$  con la velocidad del sistema, que es de  $0,99 \text{ m/s}$ , se observa que esta última es superior.

El esquema final de sistema de alimentación se observa en la Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Sistema de alimentación comprendido por el canal vertical, horizontal, soporte para filtro cilíndrico y ataques a las piezas.

El desarrollo de la placa modelo se basó en cálculos teóricos preliminares, los cuales establecieron los parámetros fundamentales para su diseño y fabricación. Estos cálculos garantizaron tanto la funcionalidad de la placa como el cumplimiento de las especificaciones requeridas. Durante el proceso, se realizaron modificaciones en el diseño con el objetivo de simplificar la construcción y optimizar la disposición de los materiales. No obstante, se comprobó que dichas alteraciones no afectaron los parámetros críticos del proceso de colada, asegurando la viabilidad del modelo final.

La placa modelo fue fabricada en madera, con dimensiones de 70 cm x 70 cm. Los modelos de pastillas se imprimieron en PLA blanco, los canales de alimentación se construyeron con varillas de madera, y los realimentadores se realizaron con una combinación de poliestireno expandido y cartón, recubiertos con masilla plástica.

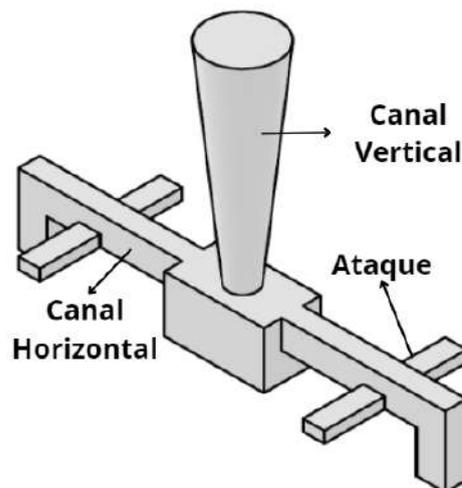
Durante la etapa de ensamblaje, se hicieron ajustes para simplificar el proceso de fabricación, como la modificación de las dimensiones de los canales de alimentación. Estos cambios fueron necesarios para facilitar la disponibilidad de materiales, y se confirmó que no comprometen los parámetros clave, sino que, de hecho, favorecen el proceso ya que disminuye la velocidad máxima de llenado. Los detalles de las variaciones en las dimensiones se observan en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Medidas finales sistema de alimentación.

Cálculo y Diseño de Canal Horizontal	Ataque	Canal Horizontal
	1,00	1,20
Alto	8	15
Ancho	15	20

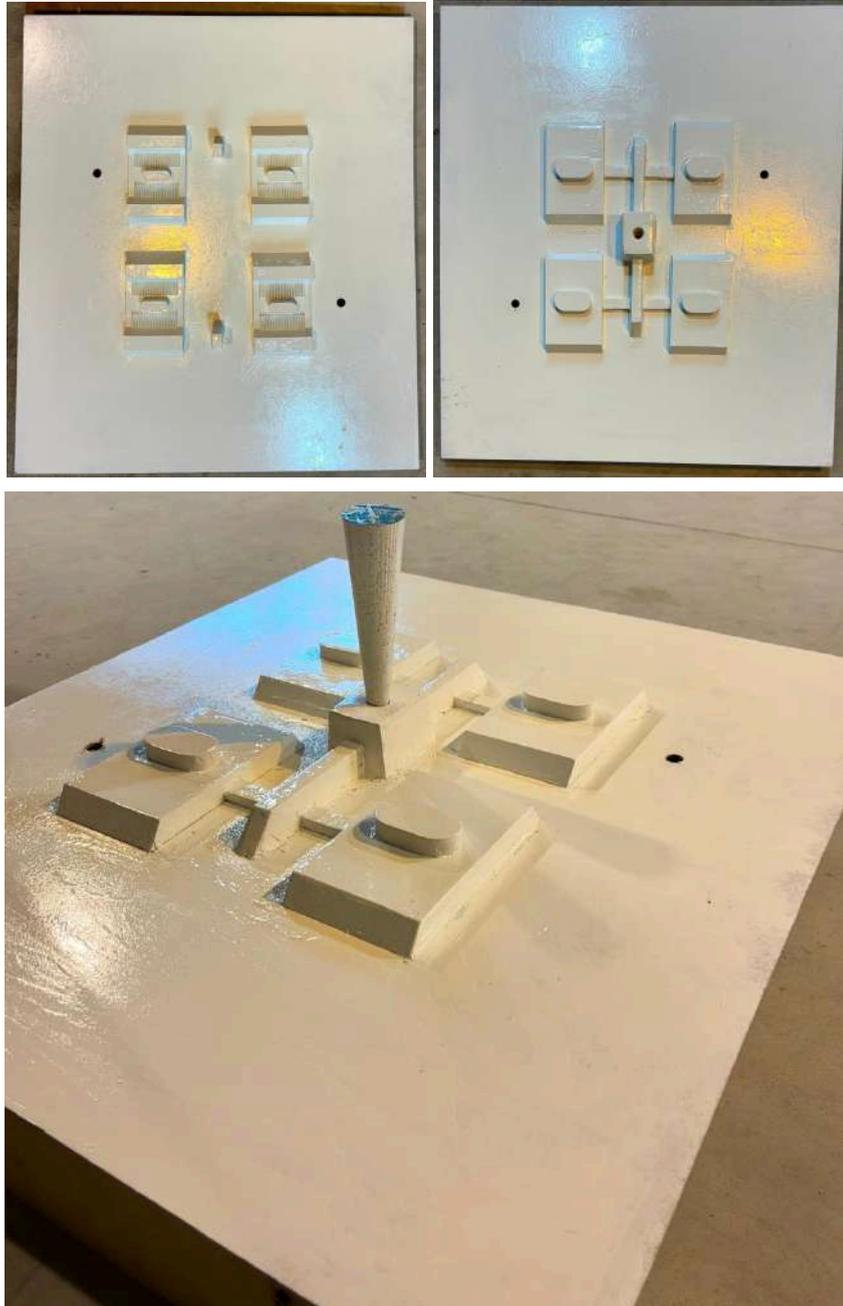
Realizando los cálculos correspondientes se obtiene un área de estrangulamiento de  $A_c = 480 \text{ mm}^2$  y, por lo tanto, una velocidad máxima de llenado de pieza de  $v = 0,65 \text{ m/s}$ . Ahora sí se tiene una velocidad cercana a la admisible para el tipo de sistema.

Otra modificación significativa fue el cambio en la forma de la base del canal de bajada, para adaptarlo a la forma y disposición de los filtros. El diseño original de la bajada era de sección circular, y fue sustituido por uno de sección cuadrada, Figura 3.6, permitiendo colocar dos filtros, uno para cada ataque al par de piezas, optimizando el flujo del material y mejorando la eficiencia de la colada.



**Figura 3.6.** Sistema de alimentación comprendido por el canal vertical, horizontal, soporte para filtros cuadrados y ataques a las piezas.

A pesar de las alteraciones realizadas, las pruebas confirmaron que la placa mantenía un rendimiento óptimo en los aspectos más críticos del proceso de fundición. Las modificaciones implementadas no sólo facilitaron una construcción más eficiente, sino que también preservaron la integridad y funcionalidad del modelo en su aplicación. La Figura 3.7 muestra la placa modelo terminada, que fue masillada y pintada para lograr un acabado superficial que disminuye el riesgo de atrapamiento de arena en el moldeo.



**Figura 3.7.** Placa Modelo terminada.

### 3.1.3. Moldeo

El moldeo de la placa se llevó a cabo siguiendo los procedimientos estándar, garantizando un resultado preciso y acorde a las especificaciones del diseño. Se seleccionó el moldeo con arena y resinas, que es un proceso eficaz en la fundición que permite la creación de moldes con alta precisión y resistencia. Los elementos utilizados fueron:

- Arena de río: Se caracteriza por ser fina y bien clasificada, lo que mejora la calidad superficial del molde. Su forma y textura permiten una buena compactación, logrando moldes que soportan la alta temperatura del metal fundido.
- Resina: Es el aglutinante que une los granos de arena, formando una estructura sólida y resistente.
- Catalizador: Se mezcla con la resina antes de aplicarla y promueve la reacción química que permite el endurecimiento de la resina.
- Acelerador: Se utiliza para aumentar la velocidad de curado de la resina, permitiendo que el molde esté listo para su uso en un menor tiempo. Esto es especialmente útil en procesos de producción donde el tiempo es un factor crítico

Una vez preparados los materiales, se inició con la confección de los noyos de la Figura 3.8, obtenidos con arena y aglutinantes.

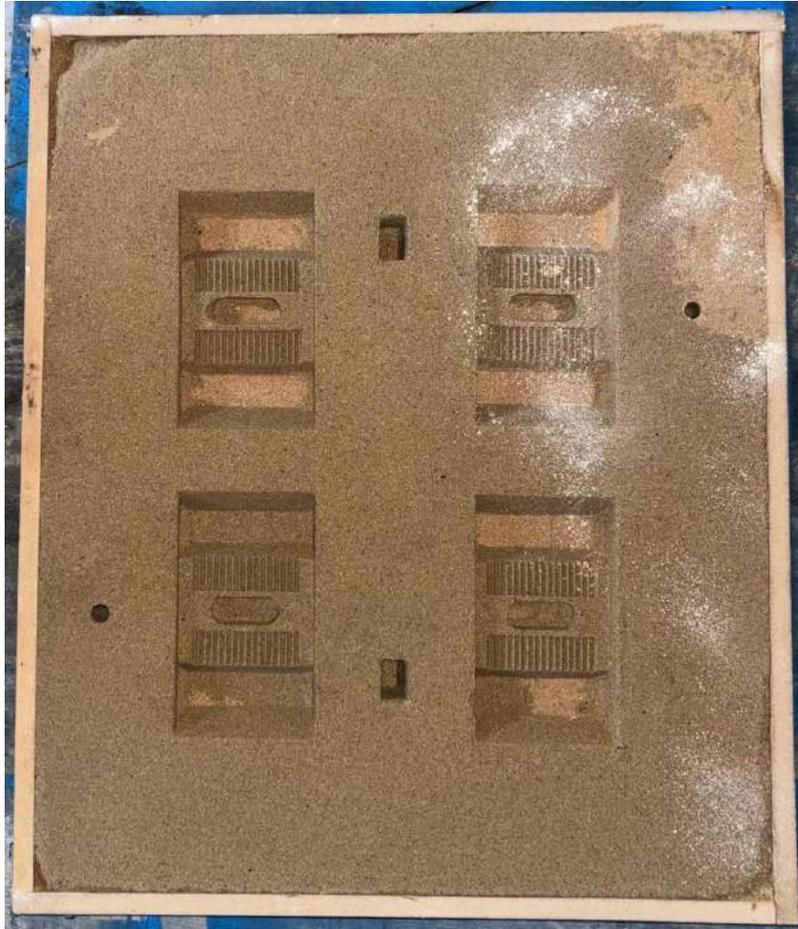


**Figura 3.8.** Noyos de arena con aglutinante.

La placa modelo se colocó con sumo cuidado en la caja de moldeo, asegurando una alineación precisa. Para lograr esta exactitud, se utilizó una técnica con varillas equidistantes, que mantienen la posición correcta de la placa durante todo el proceso. Se inició con el llenado del bajero, que se compacta para conseguir una distribución uniforme de la arena alrededor del modelo.

Posteriormente, se realizó la extracción de la placa de la mitad inferior del molde, una etapa que requirió un manejo meticuloso para evitar daños tanto en el molde como en el modelo.

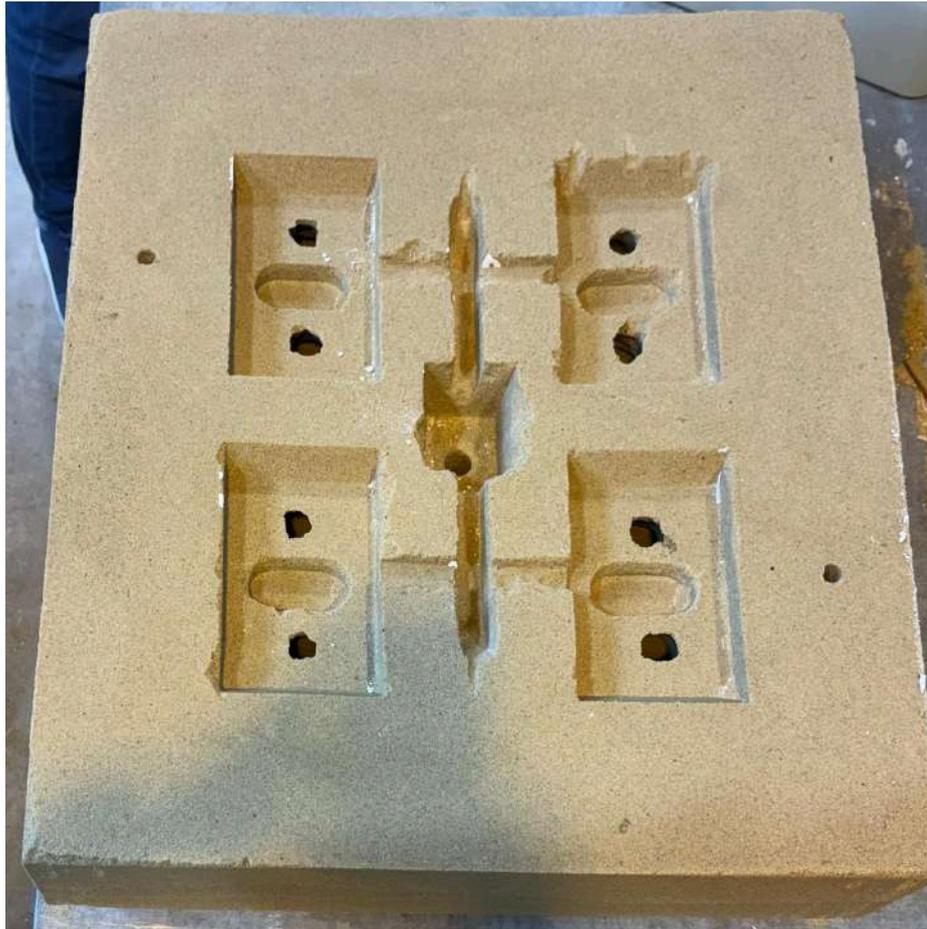
Durante este proceso, se verificó que las cavidades y los detalles del diseño estuvieran correctamente formados, garantizando una reproducción precisa de las piezas. Se exhibe en la Figura 3.9 la mitad inferior del molde en detalle.



**Figura 3.9.** Bajero de la caja de moldeo.

A continuación, se moldeó la mitad superior de la caja de moldeo. La placa de moldeo se colocó cuidadosamente en la caja junto con los realimentadores, asegurando una alineación precisa. Luego, se llenó y compactó la mezcla, logrando una distribución uniforme de la arena alrededor del modelo.

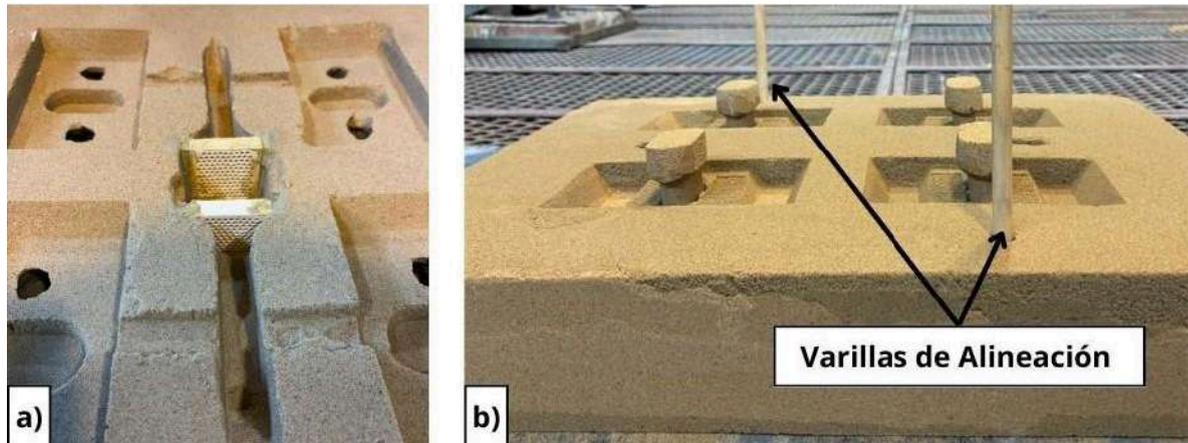
Tras el secado, se llevó a cabo la extracción de la placa y de los realimentadores. Durante esta etapa, se verificó que las cavidades, canales y detalles del diseño estuvieran correctamente formados, lo que garantiza un flujo óptimo del material fundido en las etapas posteriores. En la Figura 3.10 se observa la mitad superior del molde en detalle.



**Figura 3.10.** Sobre de la caja de moldeo.

Se realizó una revisión minuciosa del molde para identificar posibles imperfecciones o irregularidades. Cualquier defecto menor fue corregido manualmente antes de avanzar a la fase de fundición. Con el molde preparado, se garantiza que las condiciones de temperatura, humedad y compactación de la arena se mantuvieran dentro de los parámetros adecuados para asegurar la calidad del proceso de moldeo.

Finalmente, se colocaron los filtros y los noyos dentro del molde cuidando su alineación, Figura 3.11, y luego se fijaron en su lugar con bentonita. Posteriormente, se cerró el molde asegurando su alineación con las varillas y un sellado firme entre las partes, Figura 3.12.



**Figura 3.11. a) Sobre con Filtros; b) Bajero con Noyos**



**Figura 3.12. Molde cerrado. Sobre y bajero pegado con bentonita.**

#### 3.1.4. Colado

El proceso de colada inicia con la elaboración de la hoja de carga, la cual permite determinar las cantidades necesarias de elementos de aleación para obtener los 38 kg de la composición deseada, como se detalla en la Tabla 3.7. Para mayor información, la hoja de carga se encuentra adjunta en el Anexo I. En este procedimiento, se emplea chatarra de acero con composición química conocida, complementada con ferroaleaciones que aportan los elementos de aleación requeridos.

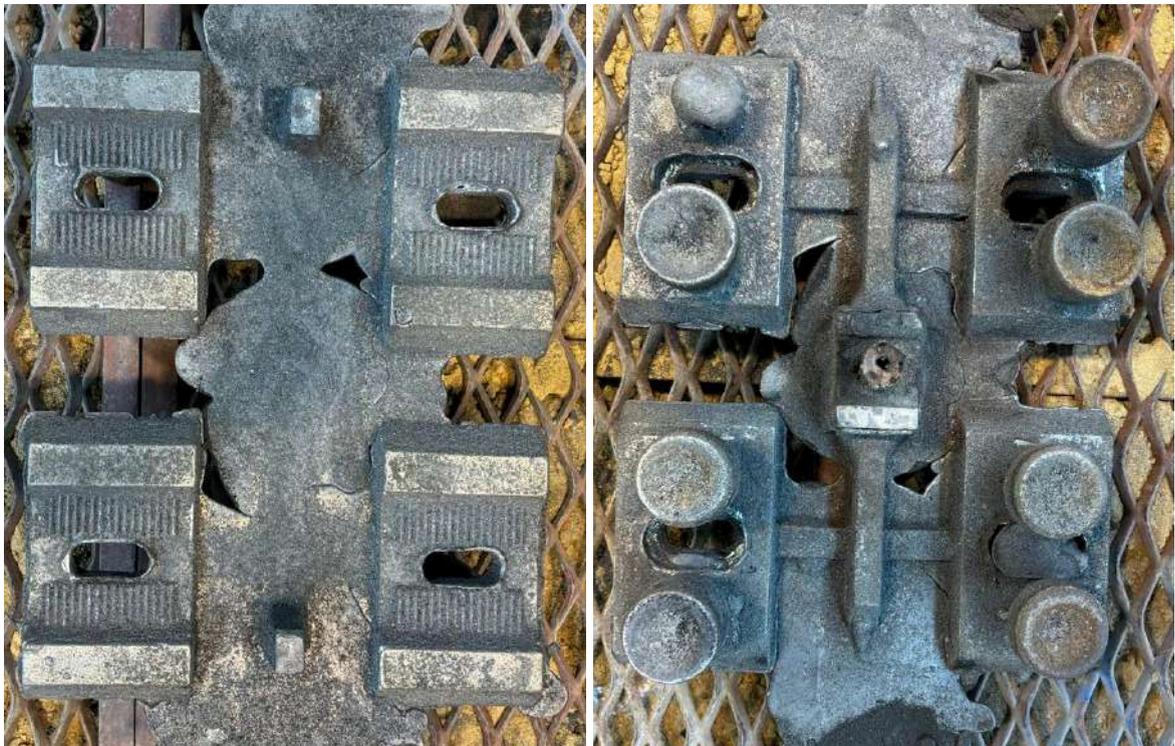
**Tabla 3.7.** Composición química buscada para el acero colado.

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0,4	2	0,6	< 0,01	< 0,04	0,5	0,5	0,5

El metal fue fundido en un horno de inducción, monitoreando los parámetros térmicos para asegurar que cumpliera con las especificaciones requeridas.

Una vez que el metal alcanzó una temperatura de 1600 °C, fue trasvasado del crisol a la cuchara. La determinación de la temperatura de colada se realizó en cuchara, al momento de colar, por medio de un pirómetro óptico de inmersión, vertiendo el metal a 1560 °C. El llenado del molde se llevó a cabo de forma lenta y uniforme a través del sistema de alimentación, lo que garantizó el completo llenado de las cavidades internas y redujo significativamente el riesgo de defectos, como porosidades o inclusiones de aire. Durante el proceso, se detectó una filtración de metal porque no se agregó el peso necesario al molde para contrarrestar la presión metalostática, lo que provocó su levantamiento parcial. A pesar de esto, la filtración no afectó las dimensiones finales ni la funcionalidad de la pieza.

Para optimizar el rendimiento de los realimentadores se aplicó polvo exotérmico, lo que favoreció la alimentación continua del metal en las zonas críticas. Finalizado el enfriamiento se procedió con el desmoldeo, obteniendo la pieza de la Figura 3.13.



**Figura 3.13.** Pastillas después del desmoldeo. Se observan canal de bajada y alimentación, ataques, filtros y realimentadores.

En la Figuras 3.14 se muestra la pastilla luego del desmoldeo, corte de canales, mazarotas, y rebabado.



**Figura 3.14.** Piezas PABLC realizadas en el INTEMA, con rechupe superficial a la izquierda de la cara frontal, en la zona del realimentador.

Al observar la pieza, se identificaron cavidades superficiales conocidas como rechupes abiertos. La hipótesis sugiere que estas cavidades se originaron por una combinación de falta de volumen y un rendimiento insuficiente de los realimentadores, haciendo que la contracción del material no fuera compensada adecuadamente por la falta de metal líquido disponible.

La falta de llenado en los realimentadores se debió a la filtración en la unión entre el sobre y el bajero, previamente mencionada, que consumió parte del metal necesario. Además, como se muestra en la Figura 3.15, el rendimiento de los realimentadores fue bajo, a pesar de la adición de polvo exotérmico. El canal de conexión de la mazarota se enfrió antes de que la pieza sea adecuadamente alimentada, lo que resultó en una cavidad pequeña o inexistente dentro del realimentador.



**Figura 3.15.** Vista interior de mazarotas, evaluación de eficiencia mediante rechupe interno.

Por cuestiones estéticas, más que funcionales, se rellenaron las cavidades superficiales de tres pastillas, para ser utilizadas posteriormente en pruebas de campo. Para esto se utilizaron electrodos E6013 Conarco 13A.

Se cuantificó el error en las piezas, pesando antes y después de la reparación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.8, determinando el porcentaje de material faltante en cada pieza, el que en ningún caso excedió el 1,5 % del volumen de la pieza.

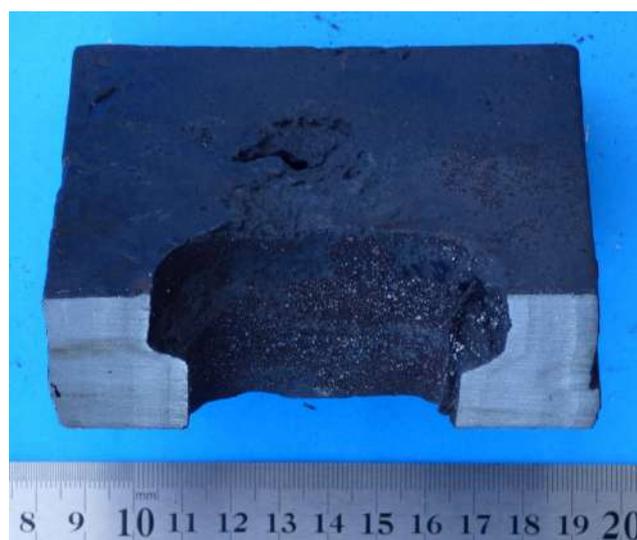
**Tabla 3.8.** Peso de las pastillas antes y después del proceso de rellenado.

	Pastilla		
	1	2	3
<b>Peso pastilla con rechupes [ kg ]</b>	4,324	4,43	4,284
<b>Relleno de rechupes [ kg ]</b>	4,37	4,46	4,34
<b>Volumen de relleno [g]</b>	46	30	56
<b>Porcentaje de relleno [%]</b>	1,06	0,68	1,31

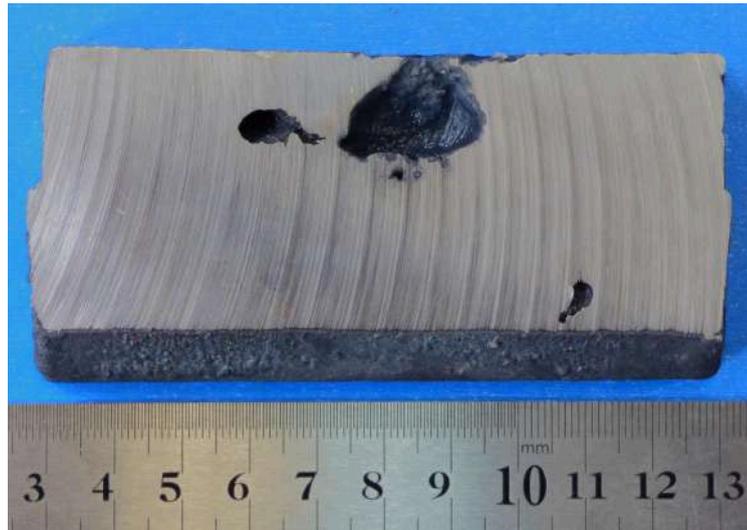
Una de las pastillas fabricadas se cortó en diferentes planos para evaluar la presencia de cavidades o defectos de colada, para verificar los cálculos realizados y, a la vez, comparar con las piezas fabricadas por los distintos proveedores del EMVIAL.

Los cortes se efectuaron en secciones que, según se estimaba, serían las últimas en solidificar, lo cual aumenta la probabilidad de formación de rechupes internos. Como se observa en las Figuras 3.16 y 3.17, la pieza presenta rechupes abiertos únicamente en la zona de los realimentadores. Este resultado es positivo, ya que indica que la pieza solidificó correctamente y que, de haber tenido suficiente volumen en los realimentadores, no se habrían formado estos rechupes, lo que mejoraría aún más la calidad de la pieza.

Es importante considerar que la presencia de rechupes o microrechupes puede actuar como un concentrador de tensiones en la estructura de la pieza. Estas pequeñas cavidades internas se convierten en puntos débiles, facilitando la iniciación y propagación de fisuras, particularmente en el procedimiento de montaje de la pieza. También, la presencia de cavidades actúa como un lugar que concentra y acelera el desgaste y acorta la vida útil de la pieza.



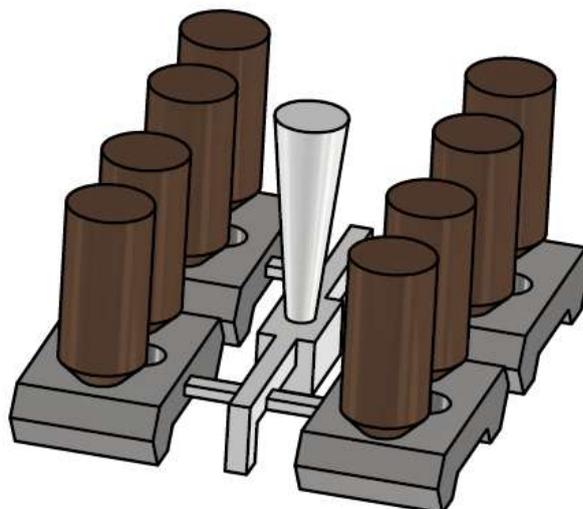
**Figura 3.16.** Corte transversal en la zona de sujeción de la pieza.



**Figura 3.17.** Corte transversal en la zona del rechupe superficial, donde se observa el rechupe abierto a la superficie y dos macrorechupes aislados que no comprometen la integridad de la pieza.

Con el fin de evitar las filtraciones, se plantea aumentar la presión de prensado, lo que impediría la apertura del molde por la presión metalostática. Asimismo, para mejorar el rendimiento de los realimentadores, se recomienda aumentar la sección de contacto entre estos y la pieza, para evitar el congelamiento prematuro y garantizar una alimentación continua de metal líquido hasta la completa solidificación.

En la Figura 3.18 se presenta el modelo final propuesto, adecuado para la obtención de pastillas libres de defectos.



**Figura 3.18.** Modelo final con correcciones realizadas.

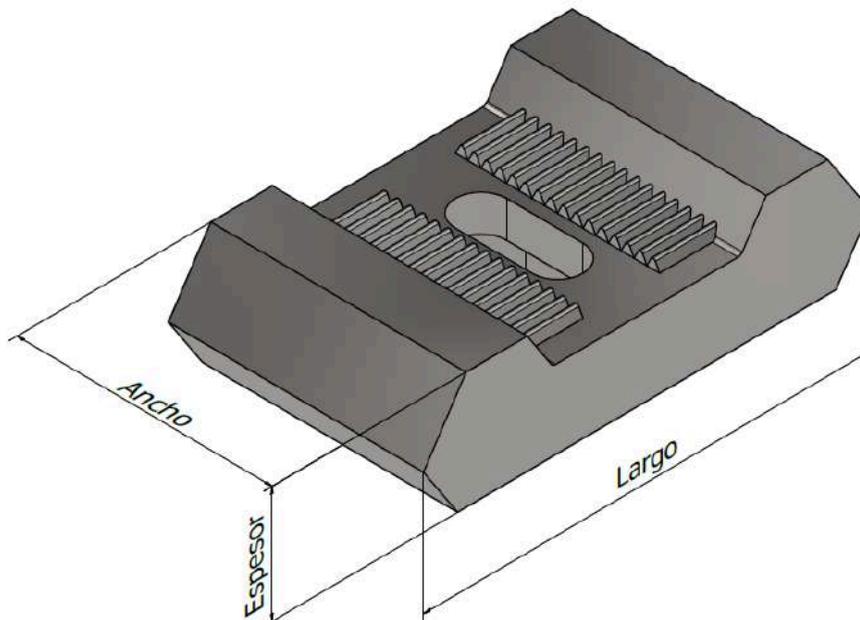
### 3.2. Tratamiento Térmico en Pastilla LUCAAL 1° Partida

Se desarrolló una variante en las pastillas de primera partida de LUCAAL mediante un ciclo austemperado, con el objetivo de obtener una microestructura de matriz bainítica de alta resistencia. El proceso comienza con una etapa de austenización a una temperatura  $T_y = 920\text{ °C}$  durante un tiempo  $t_y = 120$  minutos, seguida de un enfriamiento controlado en un baño de sales a  $T_b = 250\text{ °C}$  durante 120 minutos. El ciclo se ilustra en la Figura 1.13

Con esta variante, se pretende evaluar el cambio en la resistencia a la abrasión de la pastilla y analizar si mejora su desempeño en la máquina, brindando así una solución práctica y de bajo costo.

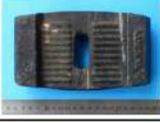
### 3.3. Caracterización de Pastillas

En esta sección se analizan las pastillas de los tres proveedores del EMVIAL y también la pastilla diseñada y fabricada en el INTEMA. Además, se incluyó la caracterización de una muestra obtenida mediante el tratamiento térmico de austemperado, aplicado al material de la pastilla de fundición nodular de la marca Lucaal. La Tabla 3.9 incluye la identificación adoptada para las distintas variantes de pastilla/material estudiadas, y también se listan las dimensiones principales y el peso de cada pastilla. En la Figura 3.19 presenta un esquema de referencia con las dimensiones principales utilizadas en la caracterización de las piezas.



**Figura 3.19.** Esquema toma de medidas en pastillas

**Tabla 3.9.** Comparación de Pastillas a analizar.

Identificación	Fabricante	Material	Dimensiones			Peso [kg]	Imagen
			Largo [cm]	Ancho [cm]	Espesor [cm]		
PLFN	Lucaal	Fundición Nodular	17,5	10,2	4,8	4	
PLFB	Lucaal	Fundición Blanca	17,5	10,2	4,8	4,3	
PGFB	Galarreta	Fundición Blanca	17,5	10,3	4,6	4,2	
PFFB	Fracchia	Fundición Blanca	19,5	11,8	3	3,4	
PABLC	INTEMA	Acero Bainítico Libre de Carburos	17,5	10,2	4,7	4,4	
PLADI	Lucaal + INTEMA	Fundición Nodular Austemperado	17,5	10,2	4,8	4	

### 3.3.1. Análisis de Composición Química

El análisis de la composición química de las pastillas se realizó utilizando un espectrómetro de emisión óptica con excitación por chispa, que se basa en la generación de una chispa de alta energía que descarga en la superficie de la muestra en una atmósfera de argón. La chispa provoca la vaporización de una pequeña cantidad del material, generando un plasma que emite luz, que es dirigida hacia el sistema óptico del espectrómetro, donde se dispersa en diferentes direcciones de acuerdo a la longitud de onda característica de los elementos presentes en la muestra, permitiendo identificar y cuantificar su concentración. Los resultados obtenidos se listan en la Tabla 3.10

**Tabla 3.10.** Composición química de las piezas estudiadas (% peso).

\*Se trata de valores aproximados obtenidos mediante una curva de calibración general.

Muestra	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
PLFN	-	0,13	4,5*	0,15	0,04	0,10	0,68	0,06	0,12
PLFB	4,5*	4*	1,16	0,16	1,61	0,17	0,25	0,15	0,22
PGFB	4,31	0,48	0,61	0,4	16*	0,06	0,09	0,05	0,03
PFFB	4,23	1*	1,33	1,85	13*	1*	0,37	0,05	0,04
PABLC	0,59	0,89	2,32	0,65	0,54	0,49	0,01	0,03	0,02

En la mayoría de las fundiciones, la interacción entre los elementos de aleación juega un papel determinante en las propiedades del material final. La adición de elementos como el cromo fomenta la formación de carburos en lugar de grafito, estabilizando el carbono en una estructura que aporta dureza y resistencia. Para lograr mejoras significativas en la resistencia a la abrasión, se requiere la aleación con elementos como níquel, cromo y molibdeno, ya sea de forma individual o combinada. Sin embargo, dado que el uso de estos aleantes representa un costo adicional, es necesario que las mejoras en el desempeño del servicio justifiquen el incremento en los costos.

La norma ASTM A532 determina la composición química correspondiente a distintas clases y tipos de fundición blanca resistentes a la abrasión, Tabla 3.11. Observando los valores de los aleantes y comparando con las fundiciones blancas analizadas se observa que la pastilla PLFB corresponde a la clase I tipo A, también conocida como NiHard I. La pastilla PGFB es Cr-Mo, de clase II tipo B y la PFFB de clase II tipo A.

**Tabla 3.11.** Clasificación ASTM A532. Fundiciones blancas resistentes a la abrasión.

Clase	Tipo	Denom. ASTM	Composición Química - % peso									Nombre
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S	
I	A	Ni-Cr-HC	2,8-3,6	<2,0	<0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	<1,0		<0,3	<0,15	NiHard I
I	B	Ni-Cr-LC	2,4-3,0	<2,0	<0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	<1,0		<0,3	<0,15	NiHard I
I	C	Ni-Cr-GB	2,5-3,7	<2,0	<0,8	<4,0	1,0-2,5	<1,0		<0,3	<0,15	
I	D	Ni-HiCr	2,5-3,6	<2,0	<2,0	4,5-7,0	7,0-11	<1,5		<0,1	<0,15	NiHard IV
II	A	12 %Cr	2,0-3,3	<2,0	<1,5	<2,5	11-14	<3,0	<1,2	<0,1	<0,06	
II	B	15 %Cr-Mo	2,0-3,3	<2,0	<1,5	<2,5	14-18	<3,0	<1,2	<0,1	<0,06	Cr-Mo
II	D	20 %Cr-Mo	2,0-3,3	<2,0	1,0-2,2	<2,5	18-23	<3,0	<1,2	<0,1	<0,06	Cr-Mo
III	A	25 %Cr	2,0-3,3	<2,0	<1,5	<2,5	23-30	<3,0	<1,2	<0,1	<0,06	Alto Cr

### 3.3.2. Análisis Macroscópico

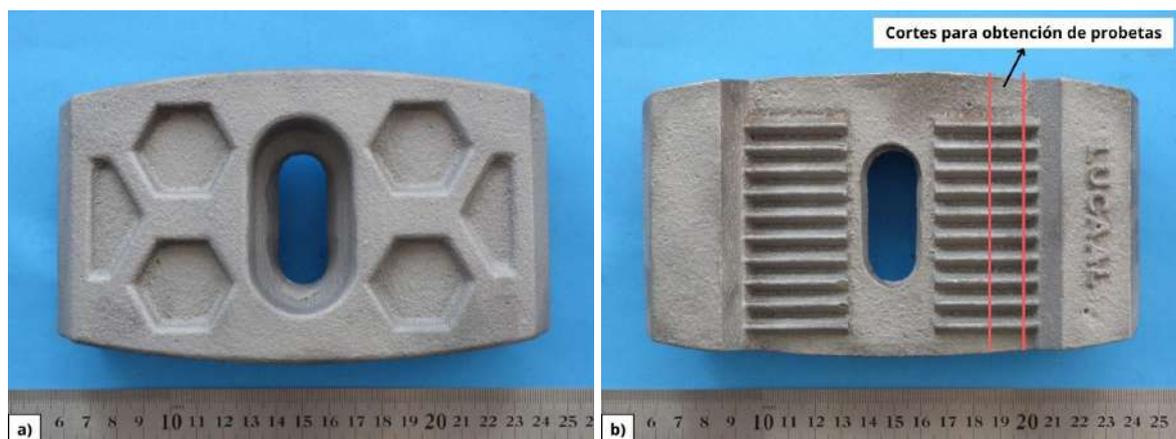
El análisis macroscópico de la pastilla de sacrificio se centra en la observación de sus características externas y superficiales

#### PLFN:

El anverso y reverso de esta pastilla se observa en la Figura 3.20. La pastilla presenta una forma algo ovalada, casi rectangular, con los valores para dimensiones y peso listados en la Tabla 3.9.

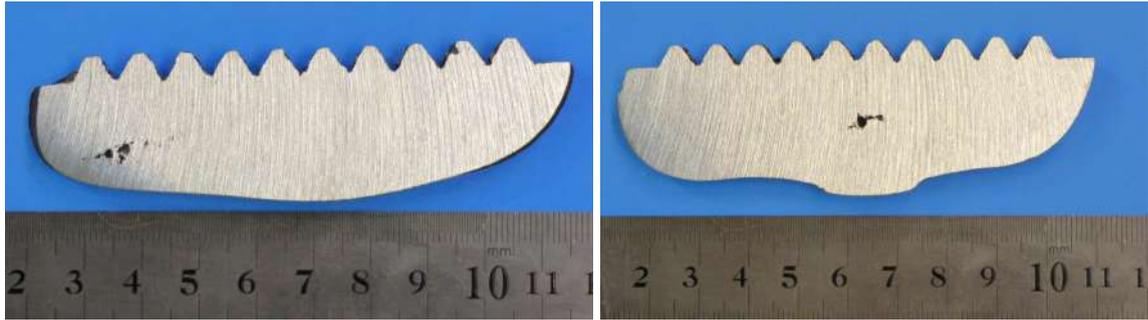
En el anverso posee cavidades en forma de hexágonos, que se supone están presentes para mejorar el arrastre del material en el mezclado. En el reverso presenta un dentado que posibilita el desplazamiento relativo entre la pastilla y el brazo en el que va montada, para compensar la pérdida de dimensiones por desgaste. Este diseño facilita la fijación al brazo, reduciendo las cargas sobre los bulones y mejorando la estabilidad, así como la posibilidad de girar la pieza para su mejor aprovechamiento.

La superficie de la pastilla se observa con la textura propia del proceso de fabricación por colada en molde de arena. No se observa la presencia de fisuras, y tampoco de cavidades superficiales como resultado de la colada.



**Figura 3.20.** Pastilla PLFN, a) anverso de la pastilla, b) reverso de la pastilla .

Los cortes de material realizados para otros estudios de caracterización, Fig 3.20 b), se utilizaron también para el análisis macroscópico, como se muestra en la Figura 3.21, observándose macrorechupes, que representan una debilidad estructural que podría comprometer el desempeño de las pastillas en servicio.



**Figura 3.21.** Microrechupes en el interior de la pieza de PLFN.

PLFB:

En la Figura 3.22 se observa una pastilla PLFB. Esta pastilla posee la misma geometría y dimensiones que la PLFN, aunque fue fabricada en fundición blanca, de acuerdo a la composición listada en la Tabla 3.9.

Esta pastilla, si bien es nueva, sufrió una fractura, Fig.3.22 (izq), durante el montaje. Se observa que esto fue debido a la presencia de defectos de colada, Figura 3.23, sumado al área reducida en esta parte de la pieza.



**Figura 3.22.** Pastilla PLFB.



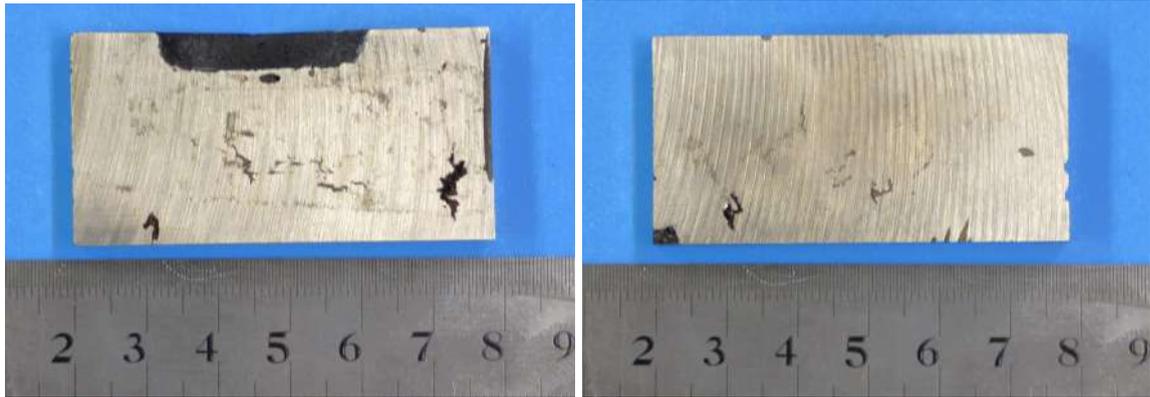
**Figura 3.23.** Superficie de fractura en pastilla PLFB.

Estas pastillas tienen la misma geometría y dimensiones que las pastillas PLFN. Sin embargo, al inspeccionarlas, Figura 3.24, se observan porosidades en la superficie que actúan como puntos de concentración de desgaste. La fractura presenta una superficie brillante, lo que sugiere una ruptura frágil en la zona de menor sección de la pastilla. También se detectan múltiples cavidades internas, que funcionan como concentradores de tensión y facilitan la propagación de la fractura.



**Figura 3.24.** Porosidad pastilla PLFB.

A través de cortes transversales de la pastilla, se observó la presencia de rechupes como se muestra en la Figura 3.25, que explican la fragilidad de la pastilla y los eventos de fractura.



**Figura 3.25.** Defectos internos y microrechupes PLFB.

PGFB:

El análisis macroscópico de las pastillas provistas por el Ing. Galarreta, Figura 3.26, presenta una geometría que difiere de las anteriores, ya que en este caso es rectangular. Esto hace que su peso sea algo superior al de las pastillas Lucaal, como se observa en la Tabla 3.9. Además, si bien el agujero para montaje es alargado, en el reverso no presenta el dentado para asegurar la posición relativa al brazo en el que va montada.



**Figura 3.26.** Pastilla del proveedor Ing. Galarreta, PGFB.

Al inspeccionar la pastilla no se detectan fracturas, fisuras o rechupes que comprometan su integridad estructural.

PFFB:

El análisis macroscópico de las pastillas del proveedor Fracchia, Figura 3.27, muestra que, si bien la forma es similar a la del proveedor Lucaal, sus dimensiones son diferentes, como se observa en los valores listados en la Tabla 3.9. En este caso no se observan defectos de colada

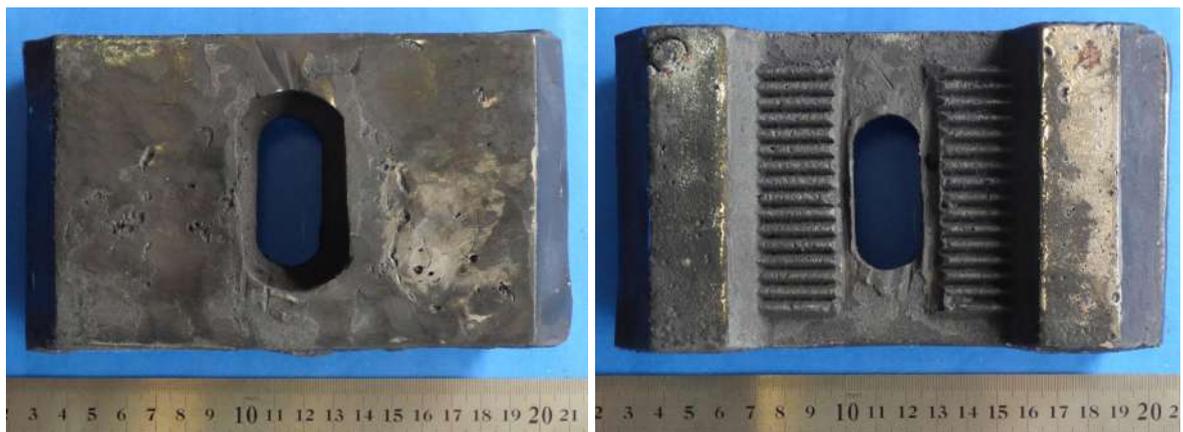


**Figura 3.27.** Pastilla Guillermo Fracchia SRL, PFFB

La cara frontal de estas pastillas no presenta cavidades diseñadas para el arrastre de material en el mezclado. No obstante, en el reverso, esta pastilla también presenta el dentado que permite ajustar su posición relativa al brazo en el que va montada. En este caso el agujero es redondo, debido a que el orificio corredera se encuentra en el brazo porta pastilla.

**PABLC:**

Del análisis macroscópico de la pastilla fabricada en este proyecto final, Figura 3.28, se observa que posee la misma geometría y dimensiones que el modelo PGFB (Ing. Galarreta), aunque su peso es algo mayor, Tabla 3.9, debido a la filtración producida en la colada, que dio como resultado un pequeño aumento en el espesor (2 mm) de la pieza.

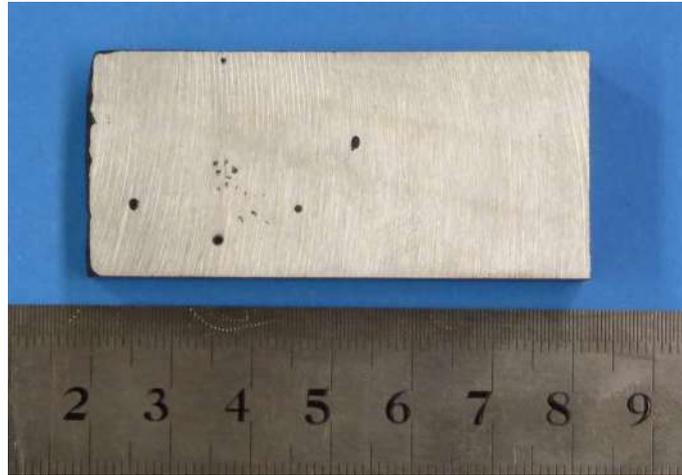


**Figura 3.28.** Pastilla PABLC, fabricada en INTEMA como parte de este proyecto final.

Aunque se realizó un relleno para corregir los rechupes superficiales, aún persisten algunos defectos característicos del proceso de fabricación. No obstante, no se observan fracturas, fisuras, ni rechupes de gran magnitud que puedan comprometer su funcionamiento.

Además, este diseño incorpora el dentado en la cara posterior, para optimizar el ajuste y el posicionamiento en la máquina.

También se analizaron las probetas que se obtuvieron de las pastillas, Figura 3.29, donde se observa la presencia de defectos que, en este caso, son esféricos. Esta porosidad como resultado del proceso de solidificación, también afecta la reserva de tenacidad de la pastilla.



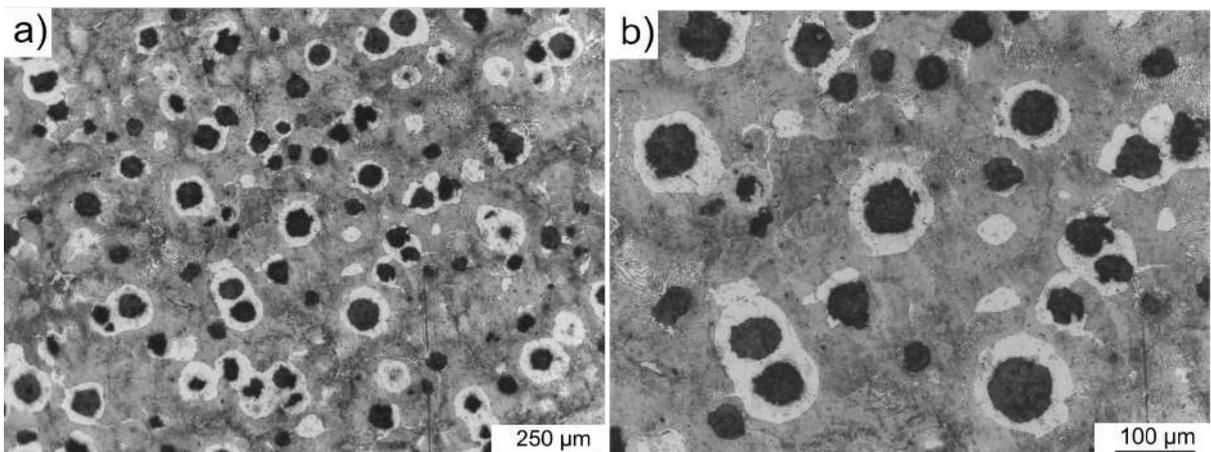
**Figura 3.29.** Porosidad interna PABLC.

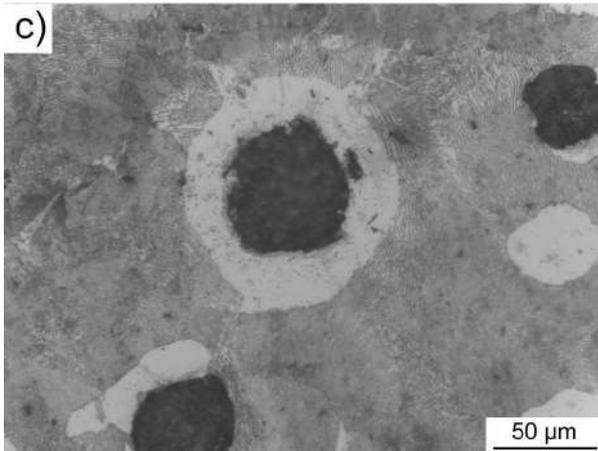
### 3.3.3. Metalografía

El análisis microestructural realizado mediante microscopía óptica se muestra en las Figuras 3.30 a 3.35.

#### PLFN:

La Figura 3.30 muestra la microestructura de PLFN, revelando una fundición nodular con grafito tipo ojo de buey, y una nodularidad superior al 80 %. Por lo tanto, la matriz presenta ferrita (fase blanca) contorneando el grafito (fase negra) y el resto es del tipo perlítica.



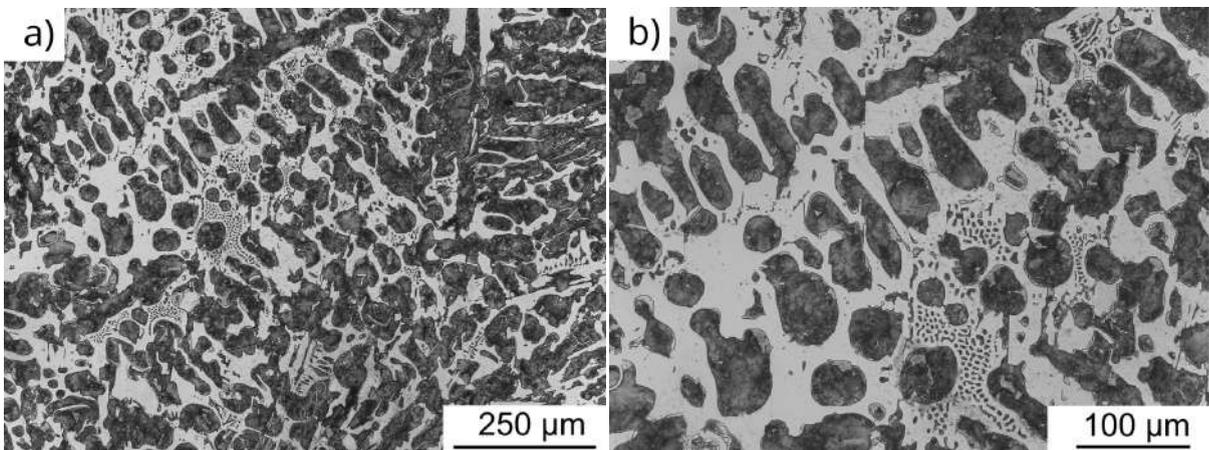


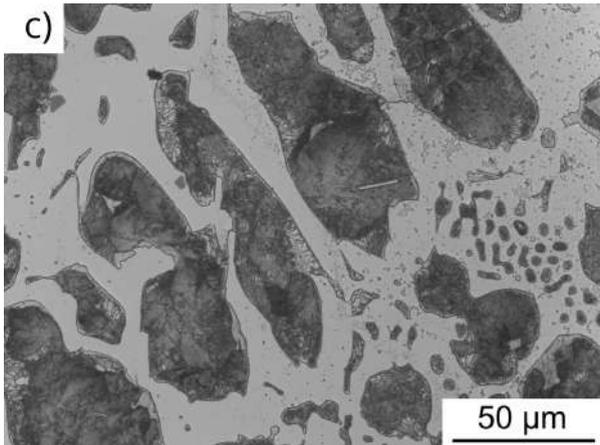
**Figura 3.30.** Microestructura de la pastilla PLFN, revelada con Nital 2 %.

- a) 10X,
- b) 20X,
- c) 50X.

**PLFB:**

La Figura 3.31 muestra la microestructura de las pastillas PLFB, revelando que se trata de una fundición blanca, caracterizada por la presencia de perlita que crece en forma dendrítica (fase oscura) distribuidas en una matriz de carburos (fase blanca). Esta apariencia es típica de una aleación con bajo contenido de cromo, aproximadamente 1 %Cr, donde la solidificación rápida minimiza la formación de grafito y favorece la presencia de carburos, la fase responsable de proporcionar alta dureza y resistencia a la abrasión. Los carburos ocupan aproximadamente un 31,6 % del área total de la microestructura, lo que corrobora su contribución a las propiedades mecánicas de la fundición.





**Figura 3.31.** Microestructura de las pastillas PLFB, atacada con Nital 2 %.

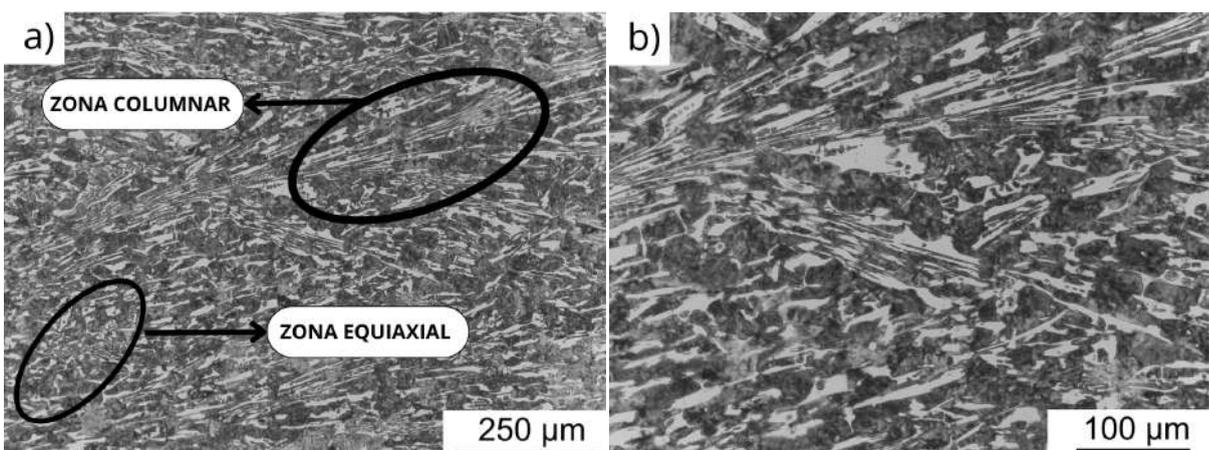
- a) 10X,
- b) 20X,
- c) 50X.

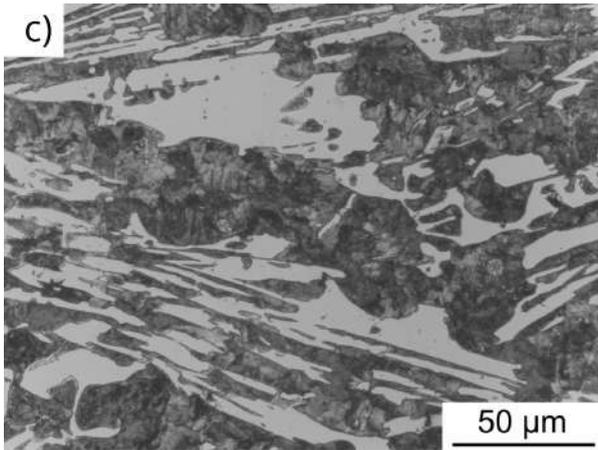
**PGFB:**

La Figura 3.32 muestra la microestructura de las pastillas de Galarreta, evidenciando una fundición blanca con un contenido de Cr > 15 %, el más alto entre los materiales estudiados. En este caso, se observa una menor formación de carburos eutécticos dentro de una matriz austenítica. Además, los carburos presentan una estructura alargada, probablemente debido a la dirección de extracción de calor durante la solidificación.

Al observar la sección completa de la pieza, se distinguen dos zonas: la zona periférica con un espesor de varios milímetros desde la superficie, en el exterior de la pieza, que muestra una disposición columnar de la estructura debido a una dirección preferencial de solidificación; y la zona central, donde los granos son mayormente equiaxiales, sin una dirección de solidificación preferente. Esta característica es propia del proceso de fabricación y también se observa en las otras pastillas.

El conteo de carburos mediante análisis de imágenes arrojó un cantidad del 22,6 %.





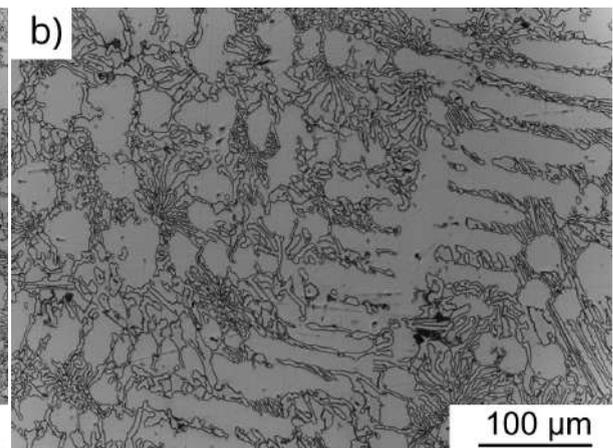
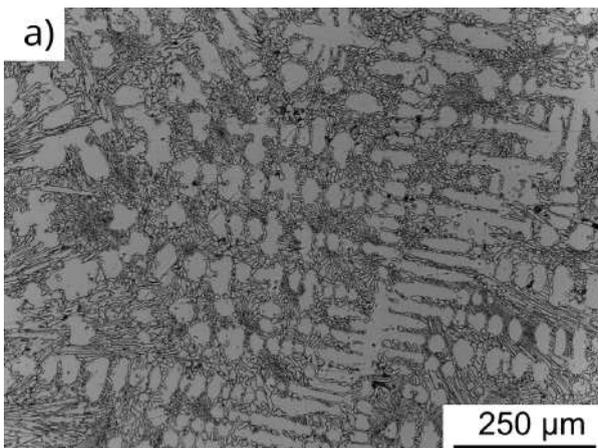
**Figura 3.32.** Microestructura pastilla PGFB atacada con Nital 2 %.

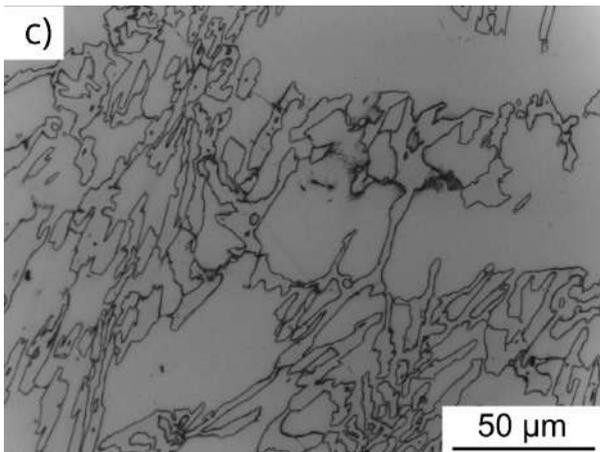
- a) 10X,
- b) 20X,
- c) 50X.

**PFFB:**

La Figura 3.33 revela la microestructura de las pastillas de Fracchia, mostrando que se trata de una fundición blanca hipoeutéctica, como surge de la presencia de la estructura dendrítica, que se observa en color blanco. El resto de la estructura, en tono grisáceo en la Fig.3.33 a) y b), corresponde a la ledeburita de la transformación eutéctica. Esta aleación posee Cr > 12 %, lo que promueve la formación de carburos eutéticos discontinuos, lo que promueve mayor tenacidad que aleaciones con Cr < 7 %. La fase dendrítica está compuesta por austenita, como surge del ataque con diferentes reactivos, además de la comprobación de su característica no-magnética, y la medición de dureza por micro-indentación.

El conteo que se efectuó sobre micrografías indican que los carburos ocupan aproximadamente un 19,5 % del área total de la microestructura.



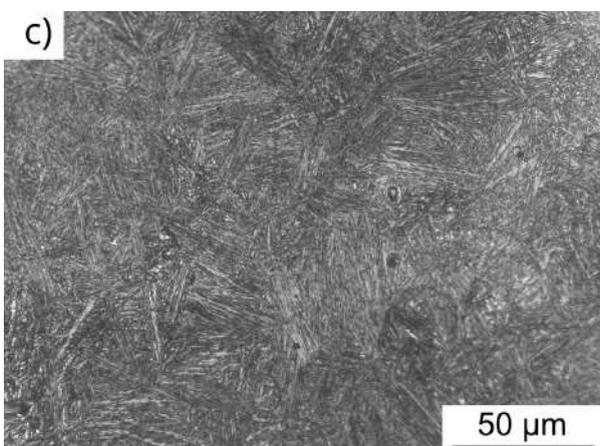
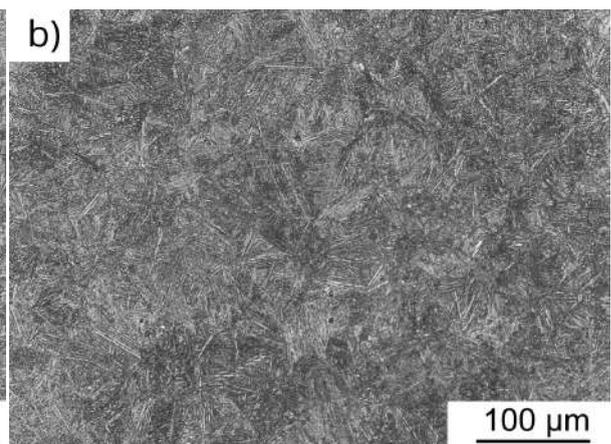
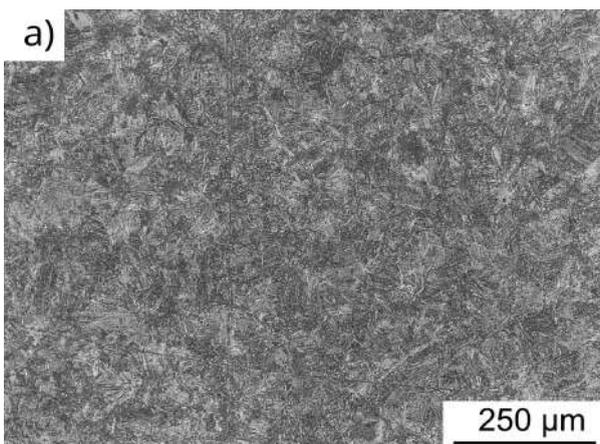


**Figura 3.33.** Microestructura de la pastilla del proveedor Fracchia, PFFB, atacada con Nital 2 %.

- a) 10X,
- b) 20X,
- c) 50X.

PABLC:

En la Figura 3.34 se observa la estructura de las pastillas fabricadas en este proyecto final, luego del tratamiento térmico de austemperado. Se revela una distribución homogénea de placas bainíticas finas del tipo acicular, característica de la temperatura utilizada en el austemperado  $T_b=260\text{ }^\circ\text{C}$ .

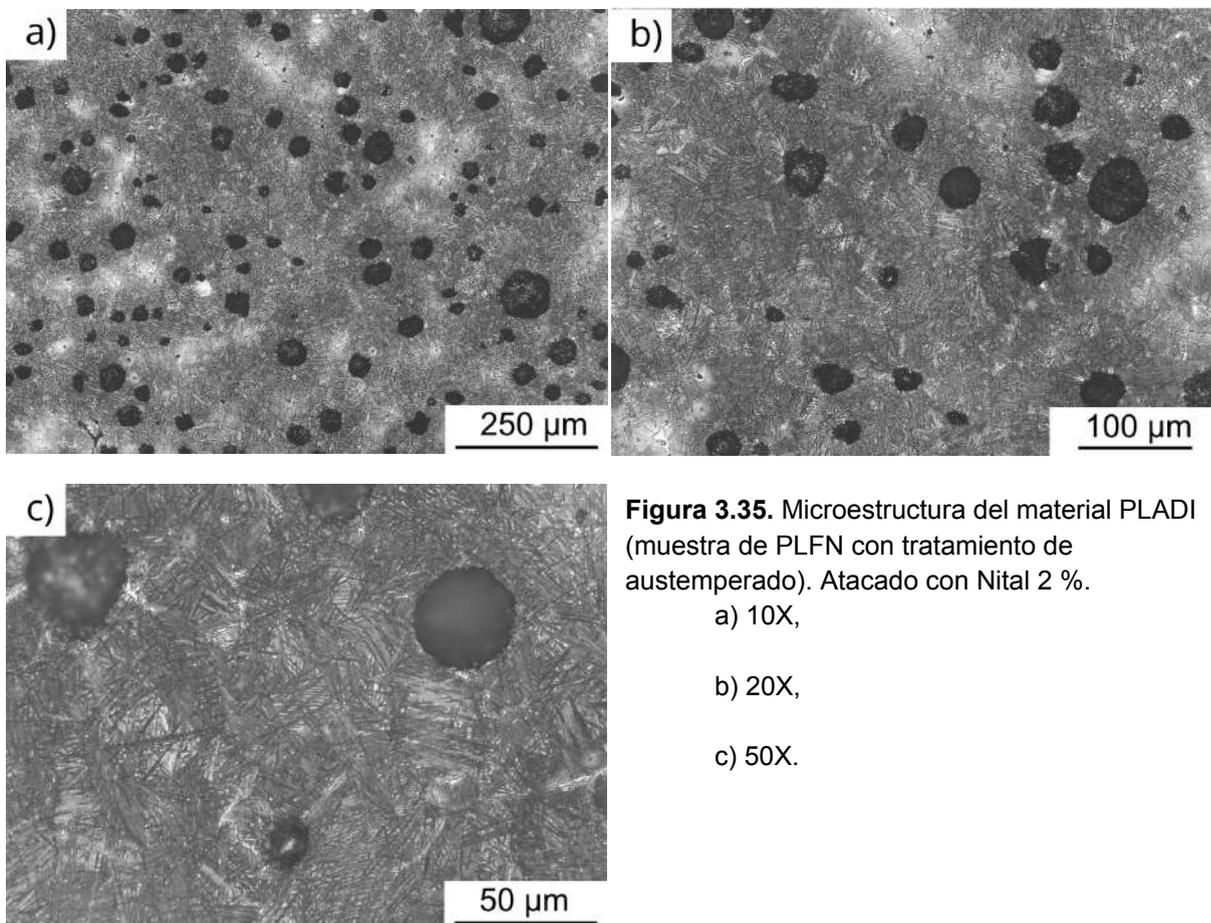


**Figura 3.34.** Microestructura de las pastillas PABLC, revelada con Nital 2 %.

- a) 10X,
- b) 20X,
- c) 50X.

## PLADI:

En la Figura 3.35 se observa la microestructura correspondiente a una muestra de la pastilla PLFN, a la que se le realizó un tratamiento térmico de austemperado, en inglés austempered ductile iron (ADI), convirtiéndola en la variante PLADI. Respecto de la Fig.3.30, este tratamiento térmico modifica la estructura de la matriz, la que ahora es del tipo bainítica y con morfología acicular, debido a la temperatura utilizada,  $T_b=260\text{ }^\circ\text{C}$ . Si bien el avance de la transformación es bueno, se observan algunas áreas claras en las que la transformación no se ha completado. Esto es común en estructuras de solidificación, ya que la microsegregación de elementos de aleación, estabilizan la estructura y retrasan la transformación bainítica en las porciones de material que solidifican en última instancia, también denominadas LTF, por last to freeze.



**Figura 3.35.** Microestructura del material PLADI (muestra de PLFN con tratamiento de austemperado). Atacado con Nital 2 %.

- a) 10X,
- b) 20X,
- c) 50X.

### 3.3.4. Medición de Dureza

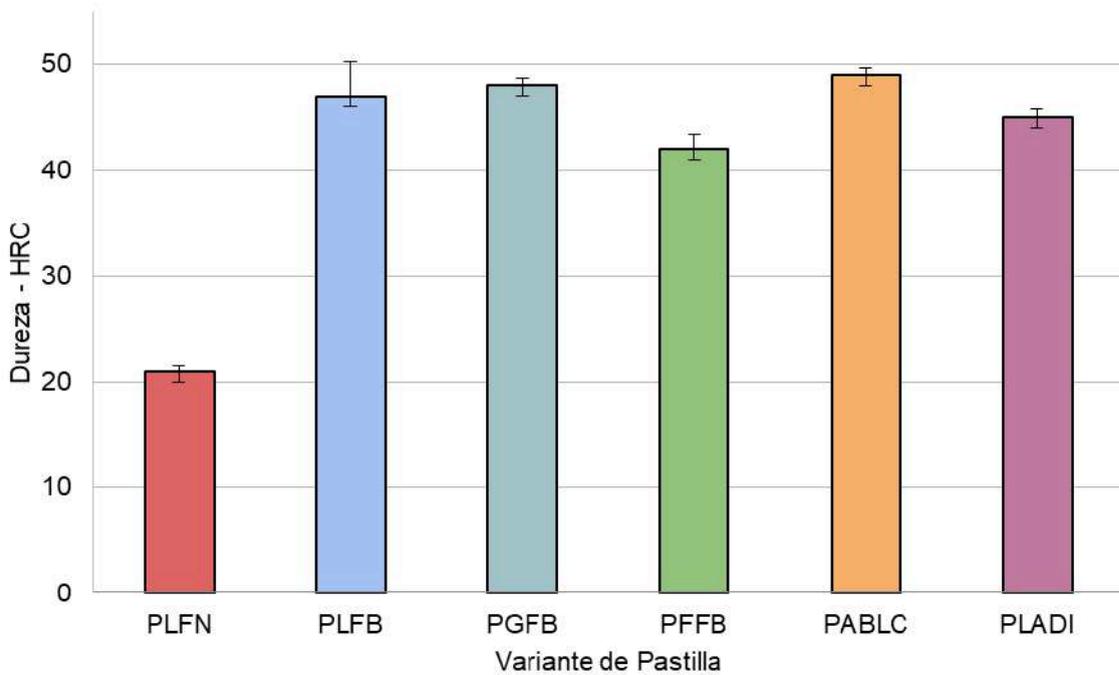
#### 3.3.4.1. Método Rockwell

En la Tabla 3.12 se listan los valores individuales de dureza medidos con el método Rockwell en la escala C (HRC), la dispersión y el valor medio. Las muestras PLFN poseen una dureza de 21 HRC, claramente inferior al resto de las pastillas analizadas, que arrojan

valores desde 43 HRC hasta 49 HRC. La Figura 3.36 muestra en forma gráfica la dureza promedio y su dispersión, para cada una de las pastillas analizadas.

**Tabla 3.12.** Dureza Rockwell C (HRC) de las distintas variantes de pastillas.

Identificación	Medición Dureza - HRC							Desv. Std.	Valor Medio
	1	2	3	4	5	6			
<b>PLFN</b>	20	20,5	21	21	21,5	21	<b>0,5</b>	<b>21</b>	
<b>PLFB</b>	44	45	43	49,5	51	45	<b>3,2</b>	<b>47</b>	
<b>PGFB</b>	47	47	48	49	48	48	<b>0,8</b>	<b>48</b>	
<b>PFFB</b>	41	42,5	42	42	44	40	<b>1,4</b>	<b>42</b>	
<b>PABLC</b>	49	48	49	48,5	48	50	<b>0,7</b>	<b>49</b>	
<b>PLADI</b>	44,5	44,5	43	45	45	45	<b>0,8</b>	<b>45</b>	



**Figura 3.36.** Dureza promedio de las distintas pastillas. Método Rockwell escala C (HRC).

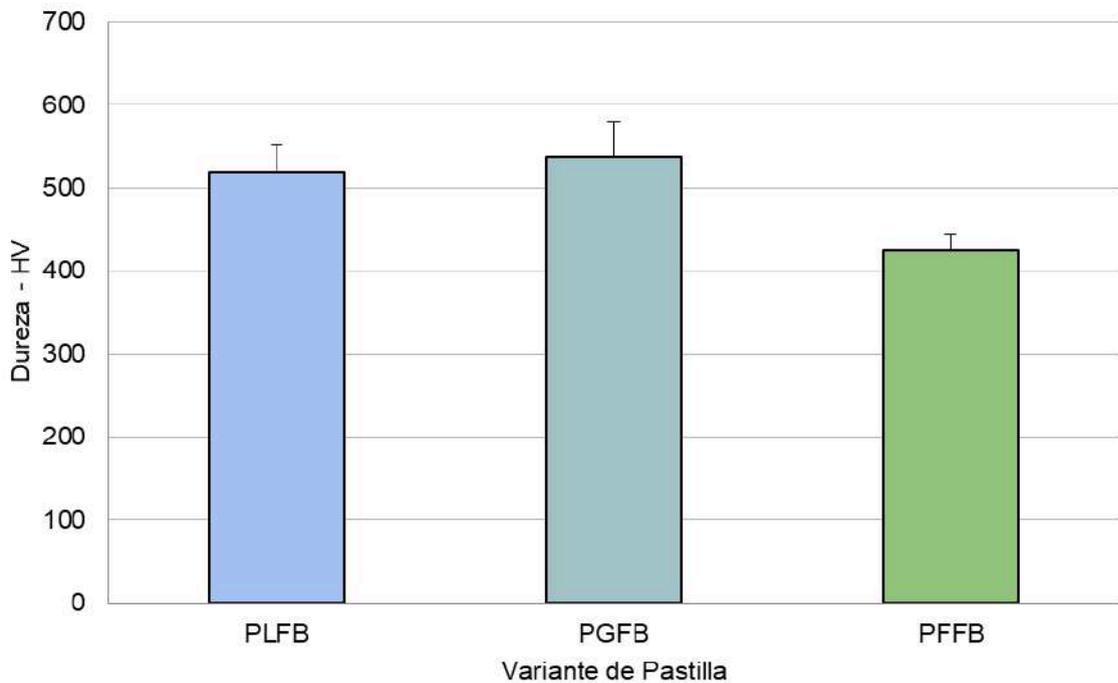
#### 3.3.4.2. Método Vickers

Para evaluar y comparar la dureza de las dendritas en las pastillas de fundición blanca, se empleó la técnica de micro-indentación Vickers. Las mediciones se realizaron en las zonas originalmente dendríticas del proceso de solidificación, que luego transformaron en perlita en las muestras PLFB y PGFB, mientras que en la muestra PFFB la dendrita austenítica pro-eutéctica permaneció estable hasta la temperatura ambiente (Fig.3.33). Los valores se presentan en la Tabla 3.13 y en la Figura 3.37, y muestran que las pastillas PGFB (538 HV)

y PLFB (518 HV) poseen una dureza similar al compararla entre sí, pero bastante superior en comparación con la muestra PFFB (425 HV). Estos resultados son coherentes con la caracterización microestructural.

**Tabla 3.13.** Dureza de la estructura dendrítica en las fundiciones blancas.  
Micro-indentación Vickers (HV).

Identificación	Medición Dureza - HV							Desv. Std.	Valor Medio
	1	2	3	4	5	6			
<b>PLFB</b>	578,9	503,2	537	490,2	492,1	505,1	<b>34,3</b>	<b>518</b>	
<b>PGFB</b>	578,9	564,8	570,4	533,2	497,2	481,6	<b>40,8</b>	<b>538</b>	
<b>PFFB</b>	426,7	389,1	426,2	431,7	431,7	442,9	<b>18,5</b>	<b>425</b>	

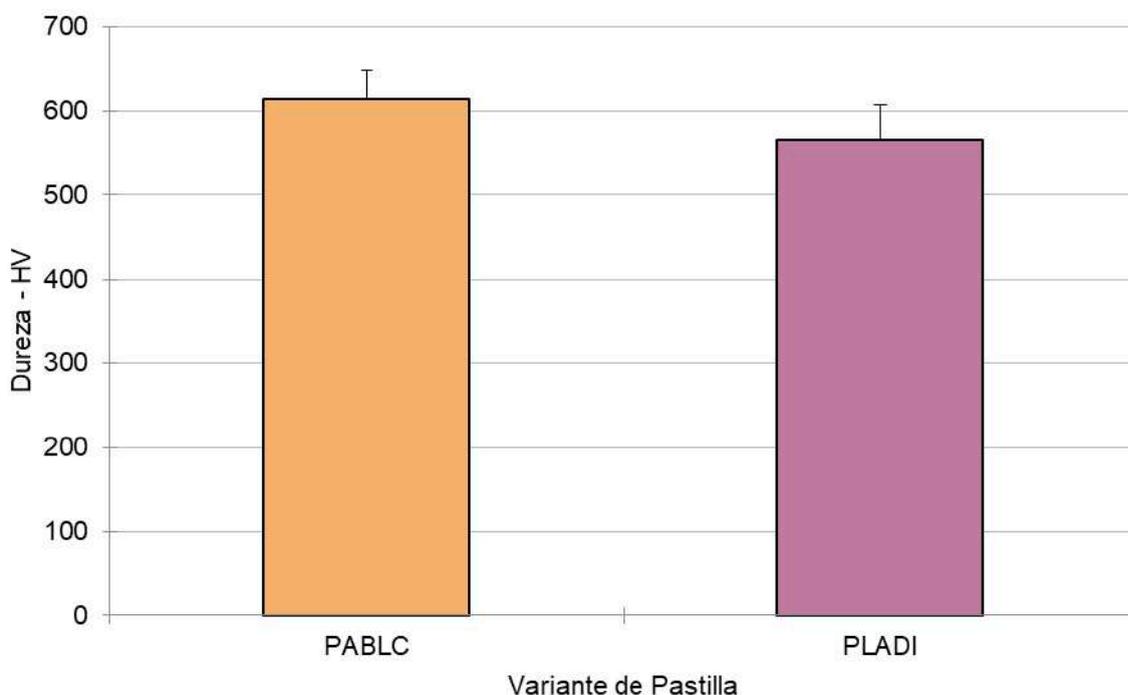


**Figura 3.37.** Resultados del ensayo de micro-indentación Vickers (HV) en dendritas de las fundiciones blancas.

Además, se efectuaron mediciones de dureza mediante micro-indentación en la bainita de la pastilla PABLC y en la matriz bainítica de la muestra PLADI, cuyos valores se listan en la Tabla 3.14 y la Figura 3.38. Se observa que la matriz bainítica en PABLC presenta una dureza superior a la de PLADI, lo que podría afectar la resistencia a la abrasión.

**Tabla 3.14.** Dureza de la muestra PABLC y de la matriz de PLADI.  
Micro-indentación Vickers (HV).

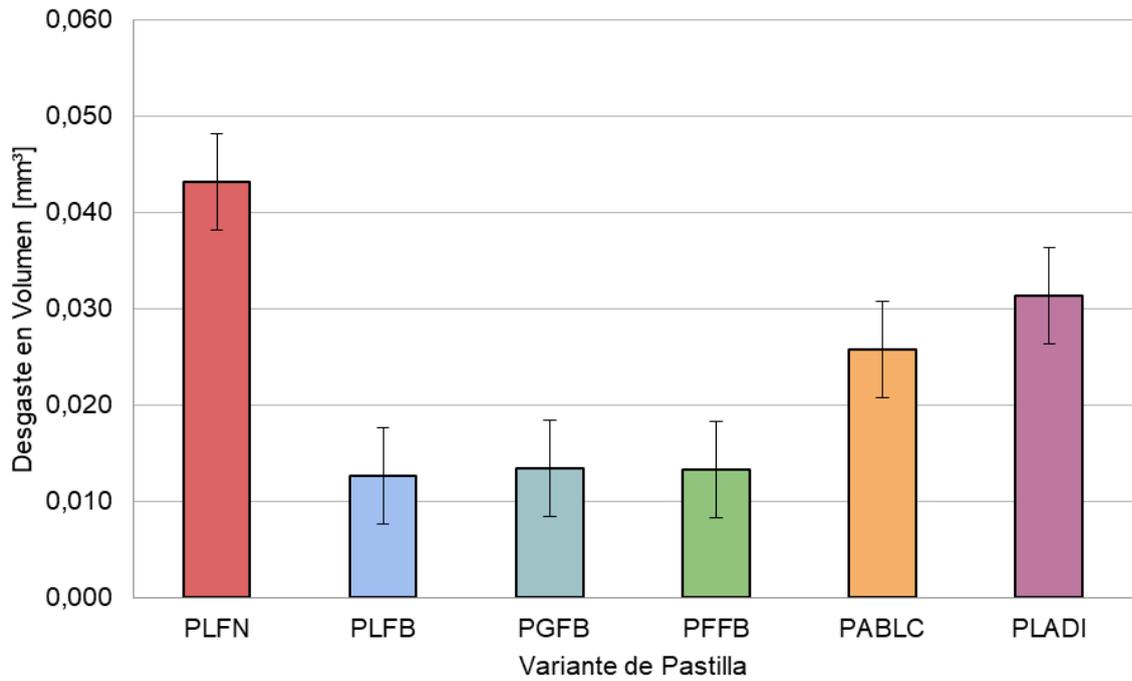
Identificación	Medición Dureza - HV							Desv. Std.	Valor Medio
	1	2	3	4	5	6			
PABLC	581,2	618,1	572	618,1	664,4	631,2	33,8	615	
PLADI	578,9	574,3	520,7	556,3	528,7	633,9	40,9	566	



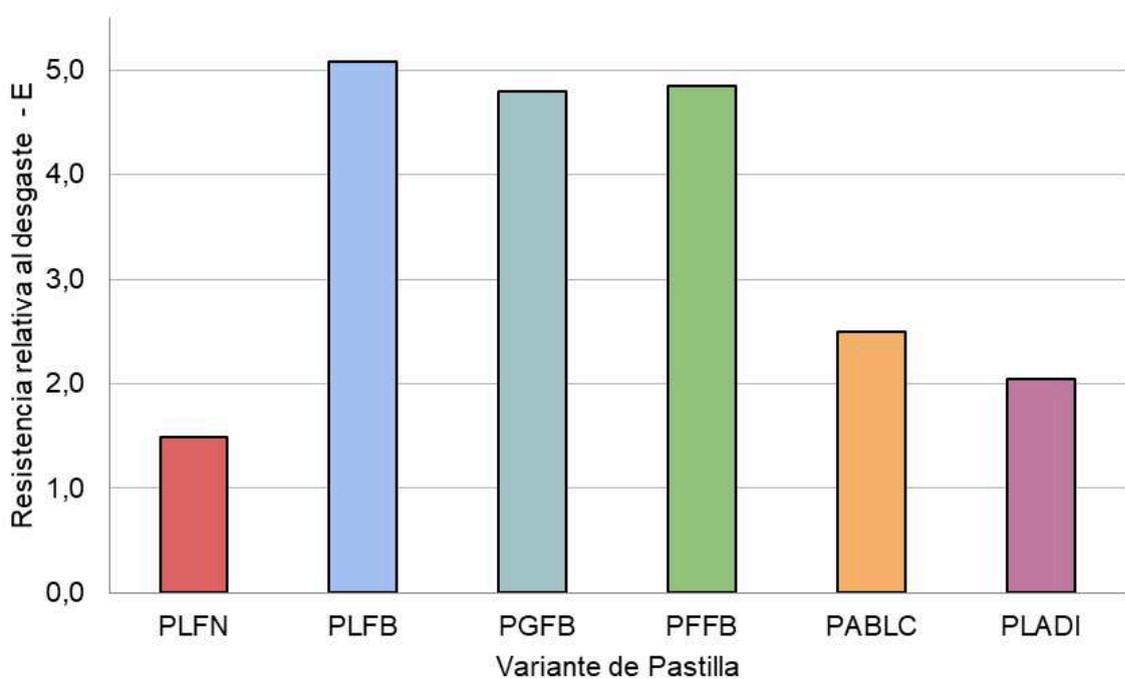
**Figura 3.38.** Dureza de la matriz bainítica en PABLC y PADI. Micro-indentación Vickers (HV).

### 3.4. Ensayo de Desgaste

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.39, en términos de volumen desgastado en función del tipo de pastilla o material. Para esto se midió la pérdida de peso y luego se calculó el volumen perdido utilizando una densidad de (7,8 g/cm<sup>3</sup>) para el acero, (7,0 g/cm<sup>3</sup>) para fundición nodular y (7,4 g/cm<sup>3</sup>) para fundición blanca. La Figura 3.40 muestra la resistencia al desgaste relativo, donde el valor  $E=1$ , corresponde a la resistencia del material de referencia, el acero SAE 1010. Valores superiores a la unidad significan que el material evaluado posee mayor resistencia a la abrasión que el material de referencia.



**Figura 3.39.** Resultados del ensayo de desgaste con rueda de goma y arena seca, según norma ASTM G65.



**Figura 3.40.** Resistencia al desgaste relativo,  $E$ , usando el acero SAE 1010 como referencia.

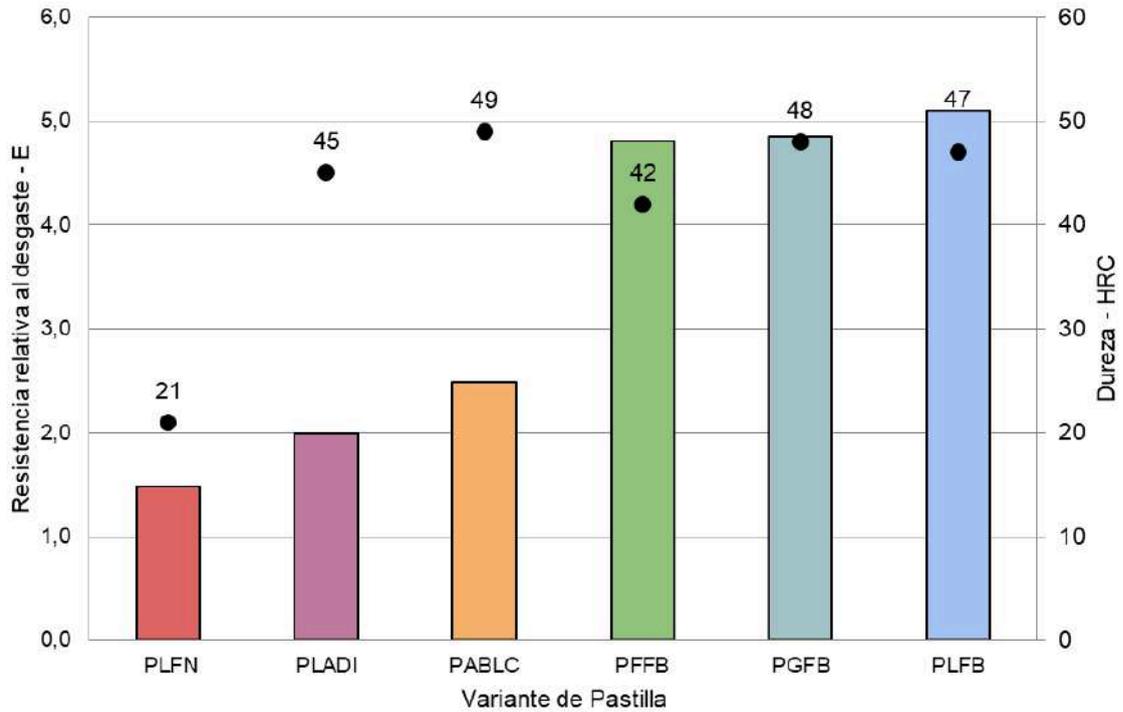
En la Figura 3.41 se combinan los valores de resistencia al desgaste relativo,  $E$ , y la dureza de las distintas muestras analizadas. Se observa que la pastilla con menor resistencia al

desgaste es la PLFN, con  $E=1,5$ , con una dureza de 21 HRC. Esto significa que, con una dureza muy superior a la del acero de referencia (SAE 1010, con 120 HBW  $\approx$  11 HRC), la abrasión mejora en una proporción menor al aumento de dureza. Esta situación también se observa al analizar el resultado obtenido al aplicar el tratamiento de austemperado, que transforma su matriz en bainítica, PLADI, alcanzando una dureza de 45 HRC, pero la mejora en la resistencia al desgaste, si bien es significativa y alcanza a  $E=2,0$ , no es proporcional al aumento de dureza.

La variante PABLC, que presenta una microestructura muy similar a la matriz de PLADI, mostró un valor de resistencia a la abrasión de  $E=2,5$ , mientras que PLADI alcanzó un valor de  $E=2,0$ . Esta diferencia puede explicarse, por un lado, porque la dureza de PABLC es 4 HRC superior a la de PLADI y, por otro lado, por la presencia de nódulos de grafito en PLADI, los cuales, a nivel microscópico, actúan como puntos de concentración de desgaste, acelerando la pérdida de material por abrasión. También resultó mayor la dureza de la matriz del PABLC que la de PLADI, como se observa en la Tabla 3.14. A nivel macroscópico, los poros expuestos en la superficie también contribuyen al desgaste, funcionando como iniciadores de surcos que amplifican el deterioro de la pieza.

Las pastillas de fundición blanca, con alto contenido de carburos y de gran dureza, muestran la mayor resistencia al desgaste, aunque se trata de una clase de material diferente. Para PGFB resultó  $E=4,8$ , la pastilla PFFB mostró  $E=4,85$ , mientras que para PLFB fue  $E=5,05$ . Estos valores para  $E$  son al menos 100 % superiores al de las variantes sin carburo, PLFN, PLADI y PABLC, aunque debe considerarse que se trata de tecnologías diferentes, con costos de fabricación, fabricabilidad y campo de aplicación muy distintos.

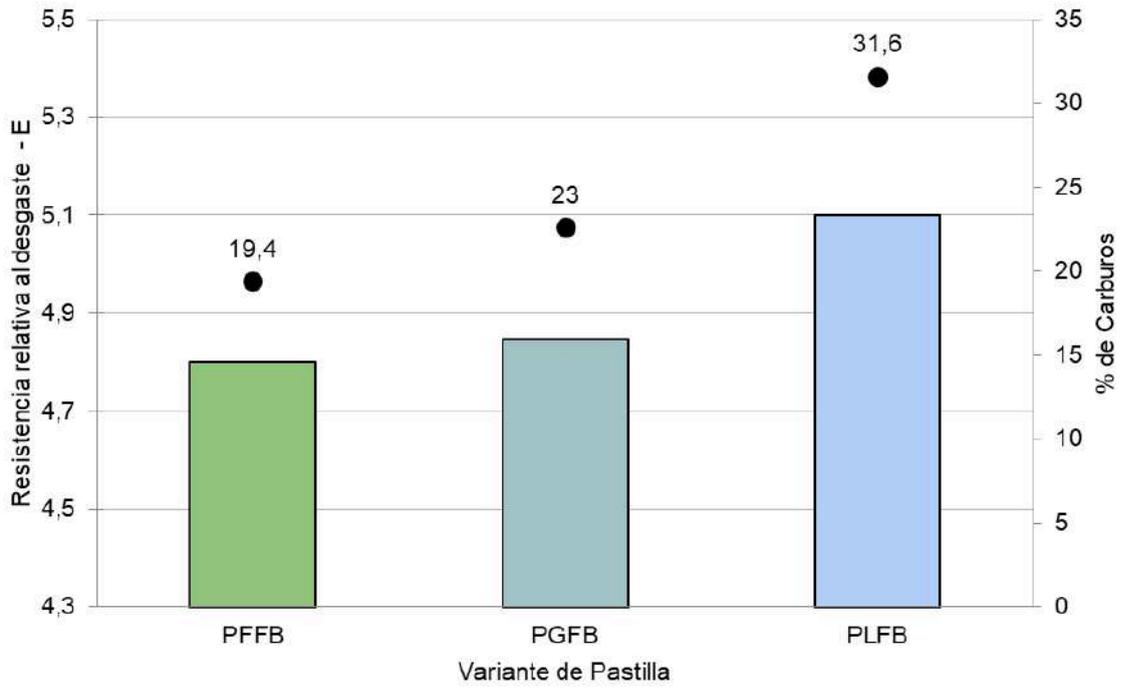
Los resultados de la Fig 3.41 muestran que en las condiciones de ensayo utilizadas, una alta dureza en el material es un factor importante para obtener alta resistencia al desgaste. Sin embargo, no es el único aspecto a considerar, ya que en materiales que no poseen carburos como PLADI y PABLC, aunque la dureza es elevada y del orden de las variantes de fundición blanca, su resistencia a la abrasión resultó muy inferior. Debe tenerse en cuenta que, si bien la dureza de las muestras sin carburos es elevada, en el caso de la fundición blanca, su estructura está compuesta por una gran proporción de fase carburo, con una dureza de al menos 1100 HV, y una fase que puede ser austenita o perlita fina, con durezas del orden de 430 HV y 540 HV, respectivamente.



**Figura 3.41.** Resistencia al desgaste relativo,  $E$  (barras) y dureza (puntos), para cada material.

Observando la Fig 3.41, se evidencia que tres de las pastillas evaluadas presentan una resistencia superior en comparación con el resto. Relacionando estos resultados con el contenido de carburos de las pastillas de fundición blanca, Figura 3.42, se observa que existe una relación entre estas variables y el rendimiento frente a la abrasión.

Los carburos, al ser fases duras, actúan como barreras frente al material abrasivo que intenta surcar la superficie y remover material, mejorando el comportamiento de las pastillas frente a la abrasión. Por lo tanto, la pastilla con el mayor contenido de carburos muestra también el mejor desempeño.

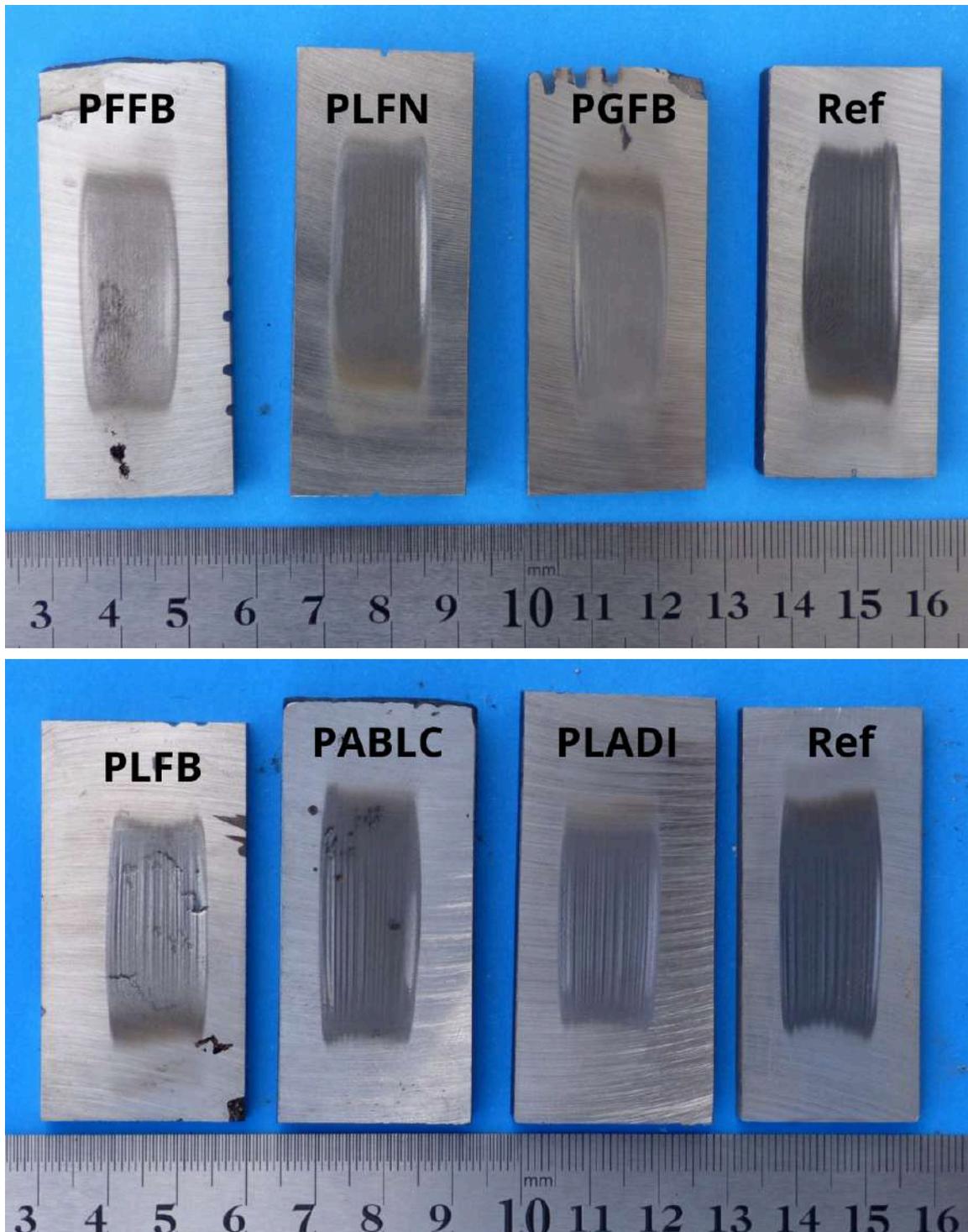


**Figura 3.42.** Resistencia al desgaste relativo, E (barras) y conteo de carburos (puntos), en fundiciones blancas.

### 3.4.1. Análisis de las Huellas de Desgaste

#### 3.4.1.1. Análisis Macroscópico de las Huellas de Desgaste

En la Figura 3.43 se observan todas las probetas con sus respectivas huellas de desgaste.



**Figura 3.43.** Huellas de desgaste ensayo ASTM G65.  
Dirección del flujo de arena y del surcado de arriba hacia abajo.

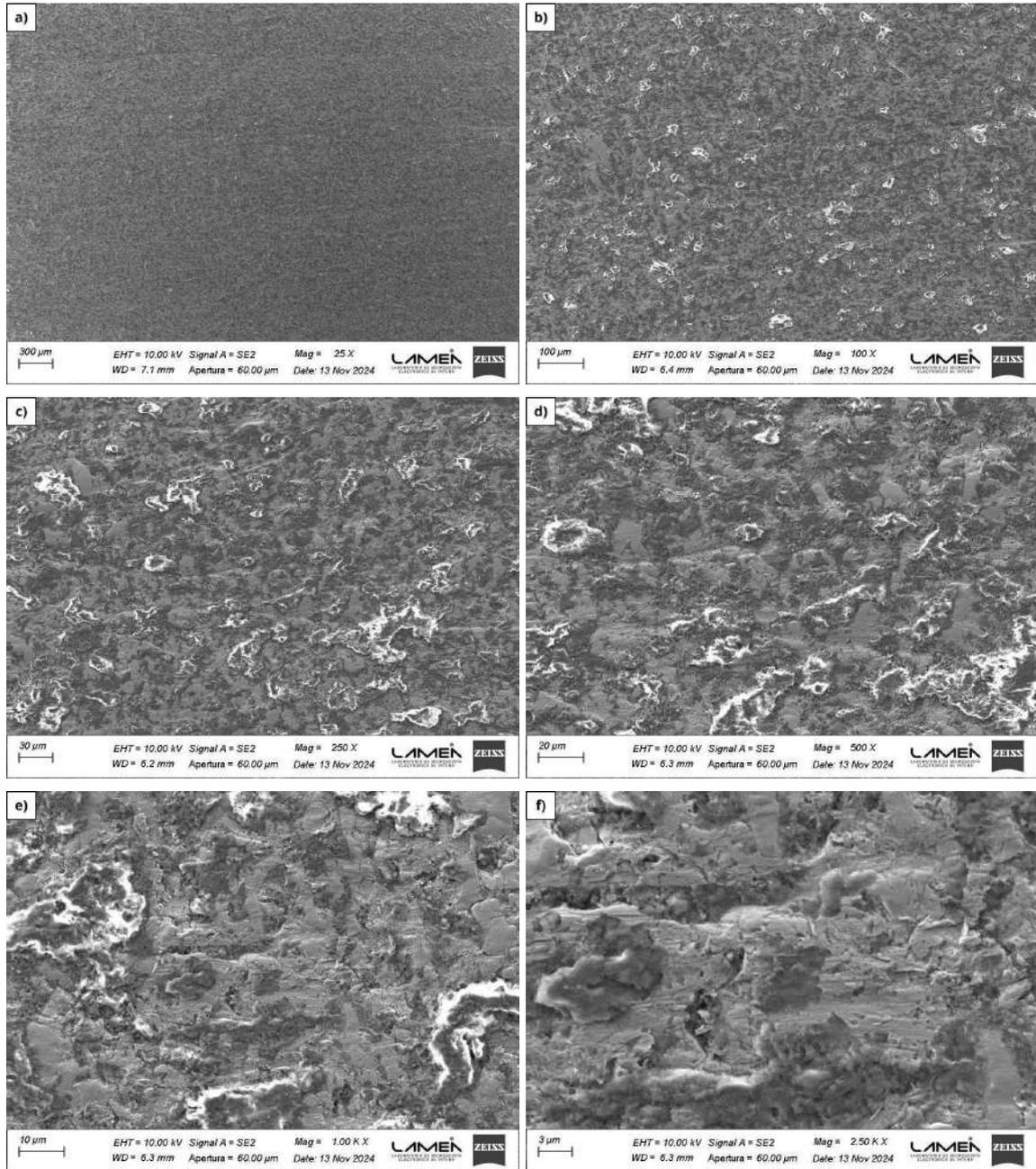
Aunque las huellas de desgaste presentan características generales similares, a escala macroscópica se distinguen canales formados por el solapamiento de surcos sucesivos generados por las partículas de arena. Estos canales tienen dimensiones aproximadas de décimas de milímetro. Por otro lado, los surcos individuales, con profundidades del orden de micrómetros, son el resultado de la acción directa de partículas de arena con un diámetro promedio de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ .

En las muestras de menor dureza, los canales son más profundos y numerosos, lo que indica un desgaste más severo. Por el contrario, en las muestras de mayor dureza, los canales son menos profundos y los surcos individuales se presentan con mayor definición. Este comportamiento resalta cómo la dureza del material no solo influye en la cantidad y profundidad de los canales, sino también en su nitidez, factores que impactan directamente en el rendimiento y la durabilidad del material bajo condiciones de servicio.

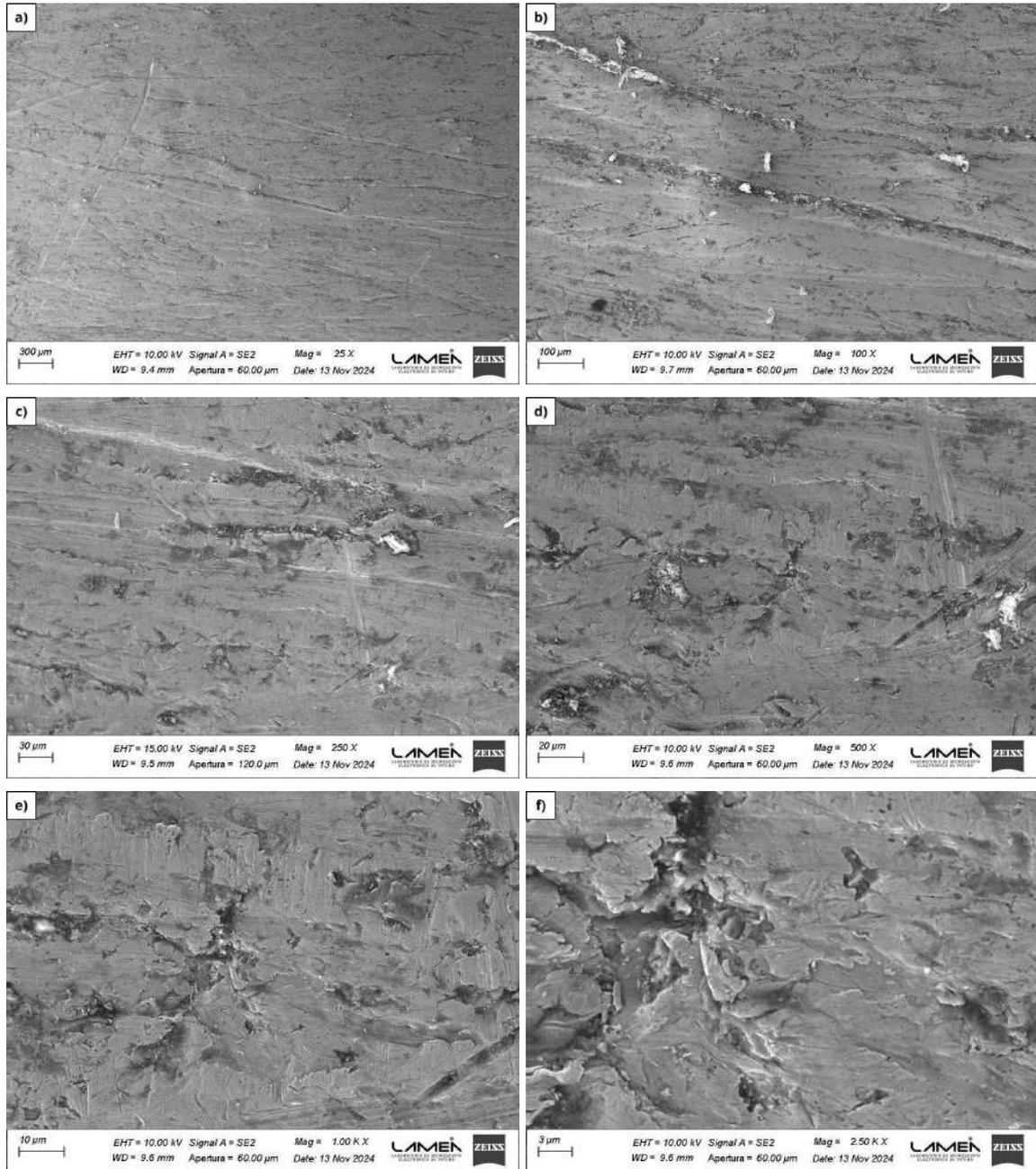
#### 3.4.1.2. Análisis con SEM

En la Figura 3.44 se muestra a diferentes aumentos, la huella de desgaste en la probeta PGFB sometida al ensayo de abrasión ASTM G65. Se observan los patrones característicos de desgaste abrasivo generados en el ensayo con rueda de goma y arena seca. A bajos aumentos, Fig.3.44 a), se aprecia la direccionalidad de la huella, debida al movimiento relativo entre rueda de goma, arena y probeta. No obstante, a mayores aumentos, también se observa que el daño en la superficie se caracteriza por la presencia de surcos de ancho y dirección variable. También indentaciones promovidas por la rodadura de las partículas abrasivas. En este tribosistema, las partículas no están perfectamente empotradas en la rueda de goma y, por lo tanto, tienen cierto grado de libertad para moverse lateralmente y también para rodar. No se observan surcos rectos, con ancho y profundidad constante, que son características relacionadas con la presencia del micro-corte. La remoción está dominada por micro-surcado y micro-fatiga. Otras variables importantes relacionadas con el micro-mecanismo de abrasión son, por un lado, la geometría de la partícula que en este caso es algo redondeada como se observa en la Fig.2.2 y, por otro lado, la carga aplicada en la partícula, que determina la profundidad del surco y su aptitud para producir micro-corte al surcar la superficie.

La Figura 3.45 muestra la huella de desgaste originada en servicio en la pastilla PGFB. Se observa que en servicio la abrasión es algo más severa, Fig.3.45 a) y b), con algunos surcos más profundos y largos que los observados en el laboratorio. Si bien, esto muestra que la severidad de la abrasión es algo mayor en el campo que en el laboratorio, también los micro-mecanismos de abrasión que dominan el desgaste son los mismos, micro-surcado y micro-fatiga, como surge al observar esta huella a mayores aumentos, Fig.3.45 e) y f).

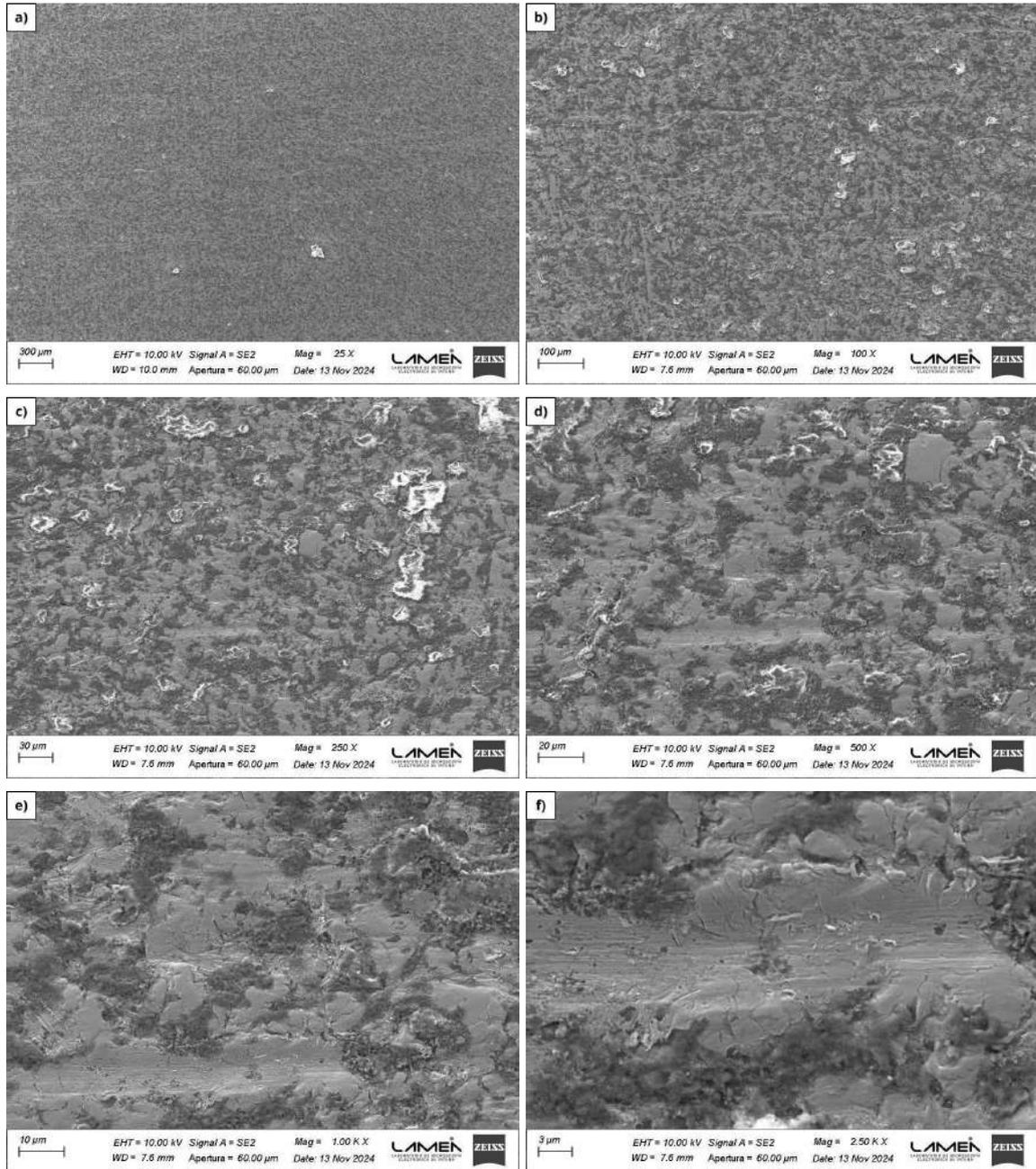


**Figura 3.44.** Imágenes SEM de una huella de desgaste ASTM G65 en la muestra **PGFB**, a) 25X, b) 100X, c) 250X, d) 500X, e) 1000X, f) 2500X.

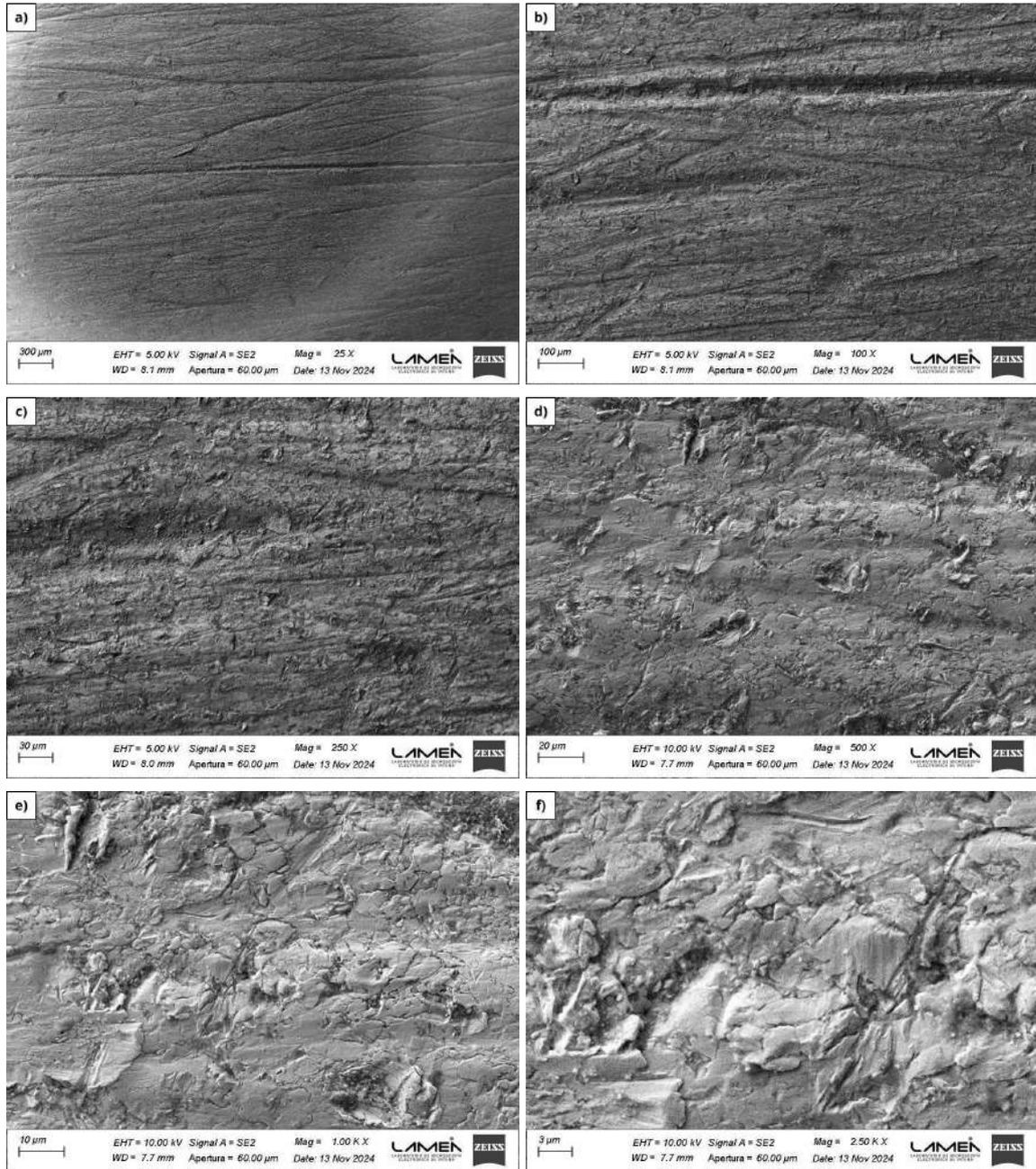


**Figura 3.45.** Imágenes SEM de una huella de desgaste en servicio, en pastilla **PGFB**, a) 25X, b) 100X, c) 250X, d) 500X, e) 1000X, f) 2500X.

Se realizó el mismo análisis para la muestra para ensayo ASTM G65 y para la pastilla del material PFFB, Figuras 3.46 y 3.47, respectivamente. A partir de esto resultan las mismas consideraciones, entre las que puede resaltarse el hecho que los micro-mecanismos de abrasión que dominan en ambos tribosistemas son el micro-surcado y la micro-fatiga, aunque en servicio la severidad es algo mayor.



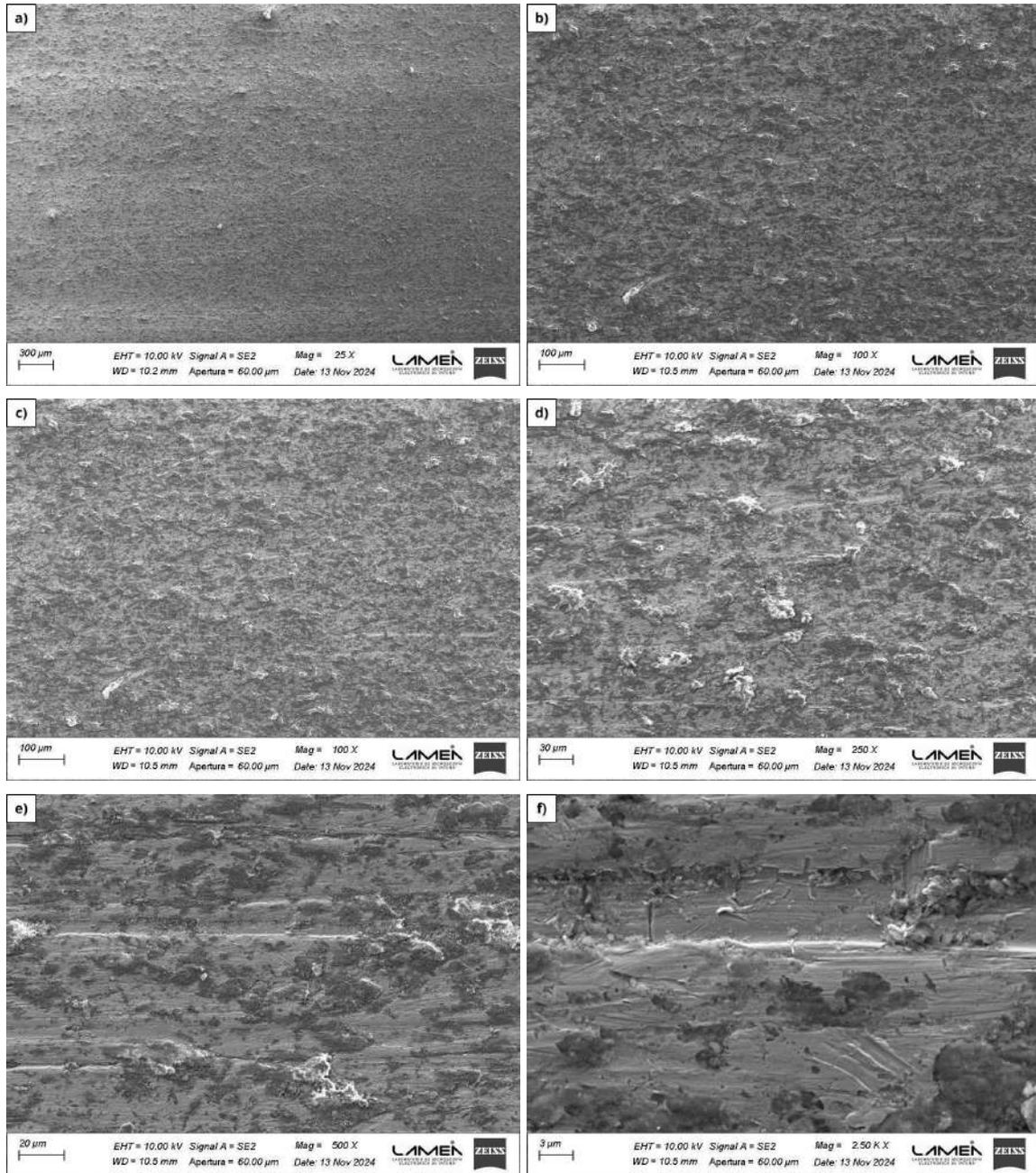
**Figura 3.46.** Imágenes SEM de una huella de desgaste ASTM G65 en muestra PFFB, a) 25X, b) 100X, c) 250X, d) 500X, e) 1000X, f) 2500X.



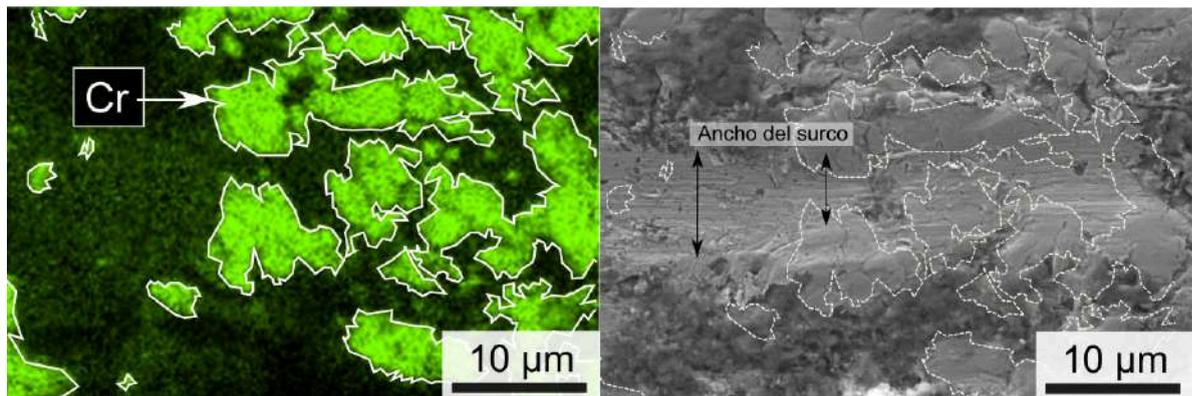
**Figura 3.47.** Imágenes SEM en huella de desgaste en servicio, en una pastilla PFFB, a) 25X, b) 100X, c) 250X, d) 500X, e) 1000X, f) 2500X.

Finalmente, en la Figura 3.48 se observa la huella de desgaste de la muestra PABLC obtenida en el ensayo ASTM G65. La imagen en la Fig. 3.48 f) (2500X) revela una abrasión algo más severa que la observada para PGFB, Fig.3.44 f), y para PFFB, Fig.3.46 f). Esto está relacionado con las características microestructurales, ya que en este caso, PABLC, el material no posee el refuerzo que provee la presencia de una fase de alta dureza como los carburos, que sí están presentes en PGFB y PFFB. La influencia de la fase de refuerzo se pone de manifiesto en la Figura 3.49, que muestra un mapeo de cromo realizado por EDS (espectroscopia de energía dispersiva) sobre la huella de desgaste en la muestra PFFB (aquella de la Fig 3.46). A la izquierda el mapeo muestra en color verde la presencia de cromo que puede asociarse a la fase carburo de cromo y a la derecha, superpuesto a la

imagen de la huella de desgaste, se observa el contorno de esa fase evidenciando que el ancho y la profundidad del surco se reducen al atravesar el carburo.



**Figura 3.48.** Imágenes SEM en huella de desgaste de ensayo ASTM G65 en muestra **PABLC**, a) 25X , b) 100X, c) 250X, d) 500X, e) 1000X, f) 2500X.



**Figura 3.49.** Mapeo de Cr realizado por EDS. Los carburos de Cr actúan como refuerzo limitando la profundidad de los surcos.

### 3.5. Comportamiento en Servicio

#### PLFN:

Las pastillas de este proveedor sufrieron desgaste, como se observa en la Figura 3.50, en pocas toneladas de asfalto producido. Aunque no existe información cuantitativa respecto de la velocidad de desgaste, la experiencia de los operadores de la planta de asfalto del EMVIAL fue contundente respecto de la alta tasa de abrasión, siendo una de las causas que motivaron el presente proyecto final.



**Figura 3.50.** Pastilla Lucaal, PLFN usada

Se pesó la pieza nueva antes de su uso en la máquina, y tras pocos ciclos de mezcla, se observó una pérdida de masa de 1,2 kg, equivalente al 30 % de su peso inicial. La elevada velocidad de desgaste puede atribuirse a una combinación de factores.

En primer lugar, la dureza de PLFN es baja, del orden de la mitad cuando se la compara con las variantes austemperadas y con las fundiciones blancas. Si bien la dureza no es la única variable que determina la aptitud en servicio frente a la abrasión, sí debe ser considerada como la principal variable, cuando la diferencia con las opciones de material contra las que se la compara es grande, como en este caso. Siendo la dureza la resistencia a la penetración, se observa entonces que esta propiedad determina la sección del surco que produce una partícula abrasiva al deslizar, lo que se ve reflejado en el volumen removido por abrasión, como indica la Ecuación 1. Cuando se comparan materiales con valores de dureza similares, en ese caso sí, otras variables se vuelven importantes, en particular la ductilidad o capacidad de deformación

En segundo lugar, la presencia de defectos en la pieza (debidos al diseño, rechupes, porosidad, etc.) genera aristas o bordes que concentran el desgaste, como se muestra en la Figura 3.51. Al examinar la imagen en detalle, se observa que la abrasión se vuelve más severa en las zonas con defectos o porosidad, produciendo un desgaste concentrado en forma de cola de cometa.



**Figura 3.51.** Porosidad pastilla PLFN.

En la Figura 3.52 se observan huellas características de desgaste abrasivo. Las huellas se presentan como rayas o surcos paralelos, indicando la acción de partículas duras que han deslizado sobre las pastillas. Las zonas más afectadas muestran un desgaste más pronunciado con pérdida de material visible, como se mencionó anteriormente. En algunos puntos, los surcos son más profundos, lo que sugiere una exposición prolongada a las fuerzas abrasivas o la presencia de partículas más duras o angulosas.



**Figura 3.52.** Huella de desgaste en pastilla PLFN.

#### PLFB:

En términos de desgaste, el aspecto general de este material es similar al descrito anteriormente.

Para esta variante de pastilla, se recibió una muestra que sufrió una fractura completa durante el montaje en el brazo porta pastilla al ajustar el bulón. La Figura 3.23 ilustra la

superficie de fractura, donde se evidencia un patrón característico de fractura frágil, acorde a su microestructura. Sin embargo, también se observan importantes defectos de colada en la superficie de fractura, los cuales reducen la sección resistente y favorecen la fragilidad del material. Además, la cuantificación de carburos reveló un porcentaje superior al registrado en las pastillas PGFB y PFFB. Este mayor contenido de carburos se correlaciona con un buen desempeño en los ensayos de desgaste, aunque a costa de una menor tenacidad.

El problema de fragilización es inherente al material, una fundición blanca con alta contaminación de azufre y fósforo, lo cual promueve la fragilidad y reduce la tenacidad del material. Estos elementos en niveles elevados aumentan la susceptibilidad a la fractura, especialmente bajo tensiones concentradas. Además, la presencia de defectos de colada, como poros y rechupes internos, actúa como concentrador de tensión, lo que facilita la formación y propagación de grietas bajo carga. Los defectos de colada observados en estas pastillas es la causa principal de su falla en el montaje.

Los ensayos de desgaste realizados en estas pastillas muestran muy buenos resultados. Sin embargo, la presencia de defectos de colada puede promover la falla en el montaje, es decir, incluso antes de prestar servicio.

#### PGFB:

Las pastillas del proveedor Ing. Galarreta presentó un comportamiento muy aceptable. Por un lado, mostraron un valor  $E$  muy elevado en laboratorio, pero también en servicio alcanzaron una producción alta de asfalto antes de mostrar signos de desgaste significativo. Además, del análisis de la pieza nueva se observó que no presenta defectos de colada, y tampoco se observa la presencia de defectos internos luego de un desgaste significativo, como se observa en la Figura 3.53. Cabe destacar en este punto que, tanto en los cortes realizados para la fabricación de muestras para microscopía óptica como para ensayos de desgaste, en ningún caso se observaron defectos internos del material.



**Figura 3.53.** Desgaste en pastilla PGFB.

Al observar la Fig 3.53, se evidencia una disminución concentrada en las dimensiones de la pastilla en solo una de las esquinas de la pastilla después de su uso en la máquina. No se pueden apreciar microcavidades o porosidades en la pieza luego de su uso.

Al igual que con las piezas de la primera partida de Lucaal, se realizó el pesaje de la pieza de Galarreta antes y después de su paso por la máquina. Tras varios ciclos, la pastilla perdió 1,1 kg, lo que equivale al 26 % de su masa. El buen rendimiento en servicio de estas pastillas se atribuye a su alta dureza, proporcionada por los carburos formados en esta fundición blanca. Además, la baja presencia de defectos y la mínima contaminación por azufre y fósforo les otorgan una tenacidad adecuada para esta aplicación.

La información sobre el rendimiento en servicio de las pastillas PFFB, PABLC y PLADI no está disponible, ya que no han estado en uso durante un período suficientemente prolongado como para cuantificar el desgaste.

La falta de datos limita la posibilidad de llegar a una conclusión definitiva sobre la conveniencia de su selección. Sin embargo, considerando el desgaste observado en las pastillas que ya estuvieron en servicio y los distintos ensayos realizados durante este proyecto, es posible hacer algunas estimaciones sobre su rendimiento. En el futuro se podrá realizar un seguimiento en condiciones de operación reales, lo que permitirá evaluar su desempeño y, a partir de allí, identificar posibles mejoras en su diseño o composición.

#### 4. Conclusiones

El trabajo realizado en el marco de este proyecto final de grado permitió realizar la **caracterización y desarrollo de piezas, originales y alternativas**.

Se realizó el análisis de la composición química, de la macro- y micro-estructura, se midió la dureza y se evaluó la resistencia al desgaste por abrasión mediante ensayos de laboratorio.

La evaluación de las pastillas de los distintos proveedores del EMVIAL permitió justificar el comportamiento en campo de las pastillas, tanto por la falla por fractura como por la resistencia al desgaste.

El trabajo incluyó el estudio de variantes alternativas obtenidas mediante el tratamiento térmico de austemperado, aplicado a una aleación de acero desarrollada en el INTEMA, PABLC, y también al material de la pastilla PLFN, que se convierte entonces en PLADI.

Los ensayos de desgaste en laboratorio mostraron que las fundiciones blancas poseen la mayor resistencia a la abrasión, seguidas por las variantes austemperadas, tanto de acero como de fundición nodular, PABLC y PLADI, respectivamente y, finalmente la PLFN (con estructura en bruto de colada).

Los análisis micro-estructurales y los ensayos de desgaste en laboratorio permiten justificar la observación en la planta de asfalto del EMVIAL, respecto de la baja resistencia a la abrasión de la variante de pastilla PLFN.

La selección de la pastilla más adecuada requiere la consideración de diversos factores. Si bien las fundiciones blancas poseen mayor resistencia al desgaste abrasivo, su baja tenacidad puede representar un problema, tanto en el montaje de las piezas como en servicio, ya que aumenta el riesgo de fracturas. Se encontró que hay una relación entre la cantidad de carburos, la resistencia al desgaste y la tenacidad de las pastillas.

Los materiales alternativos estudiados, como la fundición nodular austemperada (ADI) o el acero ABLC, si bien mejoran notablemente la resistencia a la abrasión, respecto de PLFN (con estructura ferrítico-perlítica en bruto de colada), no igualan la resistencia al desgaste de las fundición blanca, pero sí mejora la tenacidad y seguridad de las piezas, y facilita el mantenimiento.

Para tomar una decisión final sobre la pastilla más adecuada, se recomienda realizar ensayos de desgaste en campo y evaluar variables como la producción mínima que la máquina debe alcanzar sin paradas, el costo de mantenimiento y el costo unitario de las pastillas, lo que afecta el balance económico. La falla por fractura observada tiene que ver con la calidad metalúrgica de las pastillas. Siendo que se observaron múltiples defectos de fabricación, podría establecerse un control de calidad que asegure la calidad mínima requerida para esta aplicación.

## 5. Referencias

- Al-Rubaie, K.S., "Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys," *Wear*, 243 (2000) 92-100.
- American Society for Metals. (2004). *ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys (Vol. 1)*. ASM International.
- Archard, J.F. (1957), "Proc. R. Soc., London, 243, p.190."
- Archard, J. F.; "Contact and rubbing of flat surfaces", *J Appl Phys*, 24 (1953) 981-988.
- Avery, H. S.; "Measurement of wear resistance", *Wear*, 4 (1961) 427-449.
- Avery, H. S.; "The Measurement of wear resistance", Case Report 340-10, Dept. Rep.. 9-AE-134, American Brake Shoe Co., 1961.
- Beeley, P. R. (2001). *Foundry Technology*. Butterworth-Heinemann.
- Campbell, J. (2015). *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*. Butterworth-Heinemann.
- Cecarelli, B.A.; Dommarco, R.C. Martinez, R.A.; Martinez Gamba, M.R., "Abrasion and impact properties of partially chilled ductile iron," *Wear*, 256 (2004) 49-55.
- Challen, J.M., Oxley, P.L.B., "An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models," *Wear*, 53 (1979) 229-243. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(79\)90080-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(79)90080-2)
- D'Amico, S.; "Estudio sobre el desgaste del acero colado de alto silicio, con diferentes estructuras obtenidas por tratamiento térmico", Proyecto final de grado, 2023, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.
- Eyre, T.S. (1978), "Wear characteristics of metals," *Source Book on Wear Control Technology*, ASM, pp. 1-10.
- Heine, R. W., Loper, C. R., & Rosenthal, P. C. (1967). *Principles of Metal Casting*. McGraw-Hill.
- Schleg, F. (2003). *Casting Defects Handbook: Analysis and Prevention*. ASM International.
- Tenaglia, N.; "Aceros colados bainíticos libres de carburos: estudio de la estructura de solidificación, cinética de transformación y propiedades mecánicas", Tesis Doctoral, 2021, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/92051>

240920 (CN°329)		Acero Bainítico LC - Pastillas p/mezcladora + B 'Y' 1" - Ardiles - Ceriotti																									
Material	Kg.	%	% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Mg	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	%?	C.E	% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Mg	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	%?	% C.E	
BY 240503		0.000	3.660	3.490	0.290	0.042	0.058		1.010	0.360		0.060			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Chat gruesa		0.000	0.056	0.026	0.179	0.009	0.013								0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Copp. Ch Ang	35.800	64.136	0.031	0.027	0.150	0.008	0.019		0.008	0.003	0.031	0.005			0.03	0.03	0.14	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	
Chapa 316 L		0.000	0.012	0.595	1.371	0.001	0.029		0.210	11.430	16.35	2.540			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Retorno		0.000	3.540	2.770	0.190	0.020	0.050								0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Carburante	0.140	0.368	95.000						99.950						0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cobre puro		0.000													0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeSi Piedras	1.000	2.630	0.044	76.000		0.001	0.025								0.05	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeMn	0.350	0.920	5.700	0.150	50.000	0.005	0.250								0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeP		0.000					26.710								0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cr puro		0.000									99.20				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeCr Baco	0.260	0.694	0.074	0.870		0.051	0.026				70.67				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Niquel puro	0.160	0.500													0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeMo	0.260	0.763	0.200								99.990	70.000	1.990		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Noduliz. N° 1		0.000	45.700				6.190								0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	
Noduliz. N° 2		0.000	45.000				9.000						2.000		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Inoculante		0.000	75.000												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total	38.030	100.000	0.400	2.031	0.601	0.008	0.021	0.000	0.008	0.502	0.512	0.538			0.40	2.03	0.60	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.50	0.54	0.54	
<b>Procedimiento</b>																											
Colada para el PF Ardiles Ceriotti. Son cuatro pastillas de aceros bainíticos libres de carbono para mezcladora de asfalto a probar en el EMVial. La CQ es la sugerida por trabajos de Scheggia y D'Amico.																											
En función a la baja colabilidad se buscará salir del crisol por encima de 1.600°C.																											
No hay tratamiento del MB.																											
Se ataca una caja con 4 piezas de pastillas de sacrificio. Se cuela además Bloque "Y" 1"																											
<b>1 Extracción de 32 kg en cuchara mediana (nueva y sin bolsillo).</b>																											
El crisol se vacía. Se recomienda revisar el refractario del horno.																											
<b>Resultados finales:</b> El calentamiento bien, mas allá que al arrancar con 10 kg de semilla tarda en alcanzar el primer hierro líquido al generarse un pequeño puente que se abre a los 90°; luego, no abría que arrancar con mas de 8 kg. La CQ bien, apenas alto el C y el Mn. El ataque al molde sin problemas. Las mazarotas no realimentan bien..																											