

Evaluación operativa de masas cerámicas de taponamiento para el desarrollo de un
procedimiento de sellado de la piqueta en un horno de fundición

Karoll Viviana Vega Quiroga

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Directora

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Codirector(es)

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales

Iván Javier Sánchez Carlos

Ingeniero Metalúrgico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este logro, con gran respeto y cariño, a las personas que influenciaron positivamente en mi camino profesional dejando una huella indeleble en mí:

A Dios, por guiarme en este camino, darme la fortaleza y la paciencia para avanzar en mi formación académica y personal.

A mis padres, Gelson Vega y Consuelo Quiroga, por sus sacrificios y amor profundo, por su confianza, apoyo y seguridad hacia mí, permitiéndome enfocar en mis sueños. A mis hermanas y sobrinas por su alegría y amor inquebrantable.

Al Padre Juvenal, por su apoyo incondicional y por fortalecer mi fe con su ejemplo y enseñanzas.

A mi abuelita Claris y a mis tíos Lino y Vilma, por su amor y respaldo que siempre me acompañaron en este proceso.

A mis profes Ana María Pérez y Mauricio Rincón, con gran afecto, les agradezco profundamente por sus enseñanzas, su confianza, apoyo y por guiarme con sus valiosos consejos en mi vida profesional y académica.

A mis amigos y colegas, quienes se convirtieron en una compañía para vivir experiencias inolvidables fundamentadas en el cariño, el respeto y la lealtad.

Agradecimientos

A la empresa Cerro Matoso S.A. por brindarme la oportunidad de aprender en un entorno tan enriquecedor, en especial a Angie Chico, Ivan Sánchez y Alex Gutiérrez, quienes me brindaron sus conocimientos y me guiaron para aprender y fortalecer mis competencias profesionales y personales.

A los operadores de Colada & Sangría por su cooperación y disposición con base en su conocimiento y experiencia para el desarrollo de mi proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme acceder a literatura especializada y a mi querida Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por proporcionarme las bases fundamentales a través del conocimiento y enseñanzas impartidas por los profesores, para hacer de este proyecto una realidad.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Fundamentación teórica	17
2.1 Industria Pirometalúrgica.....	17
2.1.1 <i>Evolución de la producción de acero</i>	17
2.1.2 <i>Ferroaleaciones</i>	17
2.1.3 <i>Pirometalurgia</i>	17
2.2 Horno de fundición de ferroaleaciones	18
2.2.1 <i>La piqueta como elemento crítico del horno</i>	19
2.3 Masa Cerámica de Taponamiento.....	20
2.3.1 <i>Definición de la masa cerámica de taponamiento</i>	20
2.3.2 <i>Función de la masa cerámica en el sellado y apertura de la piqueta</i>	21
2.3.3 <i>Parámetros clave para el desempeño de la masa cerámica</i>	21
2.3.4 <i>Materiales comunes en las masas cerámicas</i>	23
2.3.5 <i>Innovaciones en la composición de las masas cerámicas</i>	26
2.4 Procedimiento de Apertura y cierre de piqueta	27
2.4.1 <i>Apertura de la piqueta</i>	27
2.4.2 <i>Cierre de la piqueta</i>	27
3. Metodología	28

3.1 Revisión bibliográfica.....	28
3.1.1 <i>Búsqueda de literatura especializada</i>	28
3.1.2 <i>Identificación de composición química relevante en masas cerámicas de taponamiento</i> ...	28
3.2 Revisión y comparación de las masas cerámicas de taponamiento	28
3.2.1 <i>Revisión de fichas técnicas</i>	28
3.2.2 <i>Análisis comparativo</i>	28
3.3 Evaluación de parámetros operativos	29
3.3.1 <i>Cálculo de cantidad necesaria de masa para el sellado de la piqueta</i>	29
3.3.2 <i>Pruebas experimentales</i>	29
3.3.3 <i>Seguimiento a la dureza de las masas cerámicas de taponamiento</i>	29
3.3.4 <i>Análisis comparativo</i>	29
3.4 Desarrollo del procedimiento de sellado de la piqueta.....	29
3.4.1 <i>Definición del procedimiento</i>	29
3.4.2 <i>Diseño de un flujograma</i>	30
3.5 Seguimiento a la implementación del procedimiento.....	30
3.5.1 <i>Implementación del procedimiento</i>	30
3.5.2 <i>Determinación del procedimiento estándar</i>	30
3.6 Presentación Informe final.....	30
4. Resultados y análisis.....	30
4.1 Efecto de la composición química en las masas cerámicas de taponamiento.....	30
4.2 Evaluación de parámetros operativos	33
4.2.1 <i>Carga de taponadora de metal</i>	33
4.2.2 <i>Pruebas experimentales</i>	37

4.2.2.1 Resultados	37
4.3 Desarrollo del procedimiento de sellado de la piqueta	42
4.4 Resultados de aplicación.....	44
5. Conclusiones.....	46
6. Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices.....	53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Composición química de los dos tipos de masa</i>	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Dependencia de la temperatura del volumen específico de cuarzo, cristobalita y tridimita</i>	24
Figura 2 <i>Frecuencia de porcentaje de carga de la taponadora durante la operación.</i>	34
Figura 3 <i>Corte longitudinal de máquina taponadora de metal.</i>	34
Figura 4 <i>Estimación del consumo y desperdicio de masa cerámica</i>	36
Figura 5 <i>Efecto de la temperatura en la masa remanente de cada tipo</i>	38
Figura 6 <i>Relación de la temperatura con la masa remanente y la longitud de taladro</i>	39
Figura 7 <i>Relación de la longitud de taladro y pérdida de masa de cada tipo</i>	39
Figura 8 <i>Relación de la cantidad y pérdida económica de la masa remanente durante cada operación</i>	40
Figura 9 <i>Dureza de las masas en el empaque y mesa de carga</i>	41
Figura 10 <i>Procedimiento de carga de la taponadora de metal</i>	42
Figura 11 <i>Procedimiento de sellado de la piquera de metal</i>	43
Figura 12 <i>Registro mensual de la longitud de taladro</i>	44
Figura 13 <i>Consumo mensual de la masa cerámica de taponamiento</i>	45
Figura 14 <i>Evaluación de dureza</i>	45
Figura 15 <i>Representación gráfica de la inyección de masa dentro del horno</i>	53
Figura 16 <i>Representación gráfica de la formación del hongo dentro del horno de fundición</i>	53
Figura 17 <i>Masa remanente de la taponadora con una carga habitual de arcilla de los operadores</i>	55

Figura 18	<i>Fuga de masa entre la piqueta y la cara de la boquilla de la taponadora.....</i>	55
Figura 19	<i>Zona longitudinal de la pared del horno en el área de la piqueta de metal.....</i>	56
Figura 20	<i>Escala de clasificación con relación a la dureza equivalente</i>	58

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Representación gráfica de la formación del hongo dentro del horno de fundición.	53
Apéndice B. Diagrama de fases $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	54
Apéndice C. Masa remanente con una carga habitual de arcilla.	55
Apéndice D. Plano de la estructura de la pared del horno en la zona de la piqueta de metal	56
Apéndice E. Análisis What If	57
Apéndice F. Límites establecidos de dureza.....	58

Glosario

Canal: sistema que transporta el metal fundido de la piqueta del horno de fundición hacia el crisol

Colada: proceso de extracción de metal de un horno de fundición

Crisol: recipiente cubierto de refractario internamente capaz de soportar las altas temperaturas del metal fundido que recibe en su interior

Runout: derrame de metal o escoria

Taphole clay: masa cerámica de taponamiento para piqueta

Taponadora de metal: máquina capaz de inyectar la masa cerámica de taponamiento hacia el interior de la piqueta

THC: taphole clay

Resumen

Título: Evaluación operativa de masas cerámicas de taponamiento para el desarrollo de un procedimiento de sellado de la piqueta en un horno de fundición.

Autor: Karoll Viviana Vega Quiroga.

Palabras Clave: Masa cerámica de taponamiento, Resina fenólica, Piqueta, Ferroníquel.

Descripción:

La masa cerámica de taponamiento es un insumo crítico en las operaciones de hornos de fundición, debido a que su adecuado funcionamiento influye directamente en la continuidad de los procesos en la industria, así como en la seguridad operativa. Esta investigación evaluó mediante pruebas experimentales el desempeño de dos masas de taponamiento a base de resina fenólica utilizadas para el sellado de la piqueta de un horno eléctrico de producción de ferroníquel. Se analizó la composición química de las masas tipo A y tipo B y se evaluaron sus desempeños en condiciones reales de operación. Los resultados obtenidos señalaron que la masa tipo B mostró un mejor comportamiento presentando mejores resultados en los parámetros operativos como longitud de taladro, dureza, facilidad de extrusión y limpieza. A partir de estos resultados, se seleccionó e implementó el uso de la masa tipo B, obteniendo una optimización del consumo acompañado de una reducción de costos económicos. Además, se implementó la estandarización del procedimiento de sellado de la piqueta, siendo divulgado en el área de operación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Ana María Pérez Ceballos. Doctora en Ingeniería. Codirector: Mauricio Rincón Ortíz. Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales. Codirector: Iván Javier Sánchez Carlos. Ingeniero Metalúrgico.

Abstract

Title: Operational evaluation of taphole clay for the development of a taphole sealing process in a smelting furnace.

Author(s): Karoll Viviana Vega Quiroga

Key Words: Taphole clay, Phenolic resin, Taphole, Ferronickel.

Description:

The taphole clay is a critical input in the operations of smelting furnaces, since its adequate performance directly influences the continuity of processes in the industry, as well as operational safety. This research evaluated by means of experimental tests the performance of two phenolic resin-based taphole clay used to seal the taphole of an electric furnace for ferronickel production. The chemical composition of type A and type B masses was analyzed, and their performance was evaluated under operating conditions. The results indicated that the type B mass showed better behavior, presenting better results in operating parameters such as drill length, hardness, ease of extrusion and cleanliness. Based on these results, the use of type B mass was selected and implemented, obtaining and optimization of consumption and a reduction in economic costs. In addition, the standardization of the taphole sealing procedure was implemented and disseminated in the operation area.

* Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering Program. Director: Ana María Pérez Ceballos. PhD in Engineering. Co-director: Mauricio Rincón Ortíz. PhD in Science and Technology Mention Materials. Codirector: Iván Javier Sánchez Carlos. Metallurgical Engineering.

Introducción

En la extracción de metales, durante el proceso de reducción y fusión, las condiciones técnicas y operativas deben ajustarse a los requerimientos específicos de cada procedimiento para garantizar un escenario eficiente y seguro (Gregurek et al., 2016). Para este proceso es fundamental mantener el orificio de la piqueta en óptimas condiciones para cuando se requiera su apertura y cierre durante la extracción de metal y/o escoria (Steenkamp y Reynolds, 2022).

Considerando los riesgos asociados en los procesos pirometalúrgicos, en la operación industrial se usa una amplia variedad de orificios de piqueras (Nelson y Hundermark, 2016). En ese contexto, las empresas se centran en seleccionar un adecuado diseño, hacer mantenimientos específicos y realizar reparaciones pertinentes a la piqueta con el objetivo de disminuir los riesgos asociados (Gregurek et al., 2016). Sin embargo, centrarse únicamente en la infraestructura no garantizará totalmente la vida útil de las piqueras, ya que esta depende de otros factores, siendo fundamental considerar todas las características que influyen en el orificio como un sistema integrado, incluyendo la masa cerámica de taponamiento, cuyo papel es altamente relevante (Nelson y Hundermark, 2016). Esta masa condiciona directamente la vida útil del orificio de la piqueta; su rendimiento, funcionalidad y aplicación están sujetos a las características y parámetros operativos de cada horno (Sinha et al., 2020). Estudios previos demuestran que una selección inadecuada de esta masa puede comprometer la seguridad y la eficiencia operativa (Morales et al., 2018), aumentando tiempos de inactividad y costos no programados de mantenimiento.

Por consiguiente, es imperativo la selección de una masa cerámica de taponamiento basándose en el efecto de la composición química sobre su desempeño, el cual debe cumplir con los requisitos necesarios del proceso operativo. Este proyecto busca contribuir al desarrollo

metodológico de la industria mediante la optimización de procesos de sellado de piqueta y la implementación de mejores prácticas de selección de masas cerámicas de taponamiento, basándose en criterios específicos de operación.

El presente trabajo de grado se enfoca en la importancia del desarrollo de un procedimiento de sellado de la piqueta para garantizar la seguridad y la continuidad de los procesos operativos. Mediante un análisis comparativo, se realizaron pruebas durante la operación para evaluar el desempeño de las masas cerámicas, considerando parámetros como longitud de taladro, tiempo de inyección, cantidad de masa remanente, dureza, facilidad de inyección, facilidad de taladrado entre otros, con la finalidad de desarrollar un procedimiento para el taponamiento que se ajuste a los requisitos técnicos y operativos. Con esto, se espera aportar a los estudios realizados sobre este campo de la industria pirometalúrgica, considerando la gran importancia e impacto que tiene el sellado de la piqueta en la seguridad y eficiencia del proceso.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un procedimiento para el sellado de la piqueta de un horno de fundición utilizando masa cerámica de taponamiento.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar a partir del análisis de la literatura especializada el efecto de la composición química en la selección de masa cerámica de taponamiento más adecuada para el material fundido en producción.

Evaluar los parámetros operativos de las masas cerámicas de taponamiento para identificar su comportamiento en condiciones de operación.

Elaborar un flujograma que describa el procedimiento establecido para el sellado de la piqueta.

2. Fundamentación teórica

2.1 Industria Pirometalúrgica

2.1.1 Evolución de la producción de acero

La producción de acero ha tenido significativos avances a lo largo de los años, convirtiéndose en un componente fundamental para el desarrollo de la civilización. Su uso se remonta desde hace más de 3.000 años, pero fue en el siglo XIX, con la revolución industrial, que el acero alcanzó una producción a gran escala en diferentes partes del mundo (World Steel Association, 2024). En 2023, se registró que su producción global fue de 1.892 millones de toneladas (Basson, 2024) y su versatilidad ha permitido transformar industrias como la tecnología, la construcción, el transporte, la agricultura, entre otras.

2.1.2 Ferroaleaciones

Las ferroaleaciones fueron desarrolladas para modificar la microestructura y las propiedades del acero, al añadir elementos de aleación como cromo, níquel, vanadio, molibdeno y cobalto, permitiendo mejorar propiedades como la resistencia a la corrosión, la dureza y la tenacidad del acero (Cahn y Haasen, 1996). La producción de ferroaleaciones es relevante en la industria minera y metalúrgica, ya que, es responsable de la recuperación primaria y refinamiento de los metales contenidos en los minerales de interés por medio de procesos pirometalúrgicos (Gasik, 2013).

2.1.3 Pirometalurgia

La pirometalurgia es el campo mediante el cual se extraen y refinan metales a partir de minerales naturales empleando altas temperaturas. En estos procesos, además del metal líquido se genera una fase llamada escoria, que consiste en una mezcla de óxidos metálicos que contienen

los minerales de la ganga, es decir, los que no son de interés económico o contienen una cantidad mínima del metal de interés (Bellemans et al. 2018). Los procesos de reducción, fusión y refinación realizados en hornos especializados alcanzan temperaturas superiores a los 1000°C, llegando casi hasta los 2000°C (Laputka y Xie, 2021).

2.2 Horno de fundición de ferroaleaciones

Actualmente, la mayoría de las ferroaleaciones, como las cálcicas, de cromo, manganeso, ferróniquel y silicio, se producen en hornos eléctricos de arco sumergido. Esto se debe a la alta afinidad que tienen estos elementos con el oxígeno, lo que dificulta producir ferroaleaciones en altos hornos. En los hornos eléctricos, se cargan y funden las materias primas como los minerales, agentes reductores, adiciones de hierro y fundentes, para luego, realizar la extracción de escoria y metal (Gasik, 2013). Luego de extraer el metal, el orificio de la piqueta se sella con una masa cerámica que se calienta y sinteriza, manteniendo el metal en estado líquido en el interior del horno y la presión interna de este (Ribeiro, 2010).

Los hornos eléctricos tienen diferentes configuraciones según las necesidades operativas. Pueden incluir sistemas eléctricos de corriente continua o alterna, arcos eléctricos de tipo sumergido o cubierto, forma circular o rectangular y el uso de 1, 3 o 6 electrodos y pueden ser abiertos o cerrados (Nelson, 2014).

Específicamente en las ferroaleaciones de ferróniquel, el proceso pirometalúrgico se caracteriza principalmente por la práctica mediante fases de fundición. Inicialmente el mineral extraído de la mina es mezclado y sometido a un proceso de precalentamiento, generalmente en un horno rotatorio. Seguidamente, se realiza el proceso de calcinación alcanzando temperaturas de 800°C en hornos rotatorios y luego se realiza una transferencia de calcinación a los hornos eléctricos. Durante esta fase, se realiza la extracción y granulación de escoria constantemente y la

extracción de metal. En algunas industrias realizan un refinado del metal en bruto y se entrega el producto granulado de ferróníquel. La estabilidad en estas fases operativas permite que los hornos eléctricos funcionen correctamente y se haga efectivo el desarrollo a gran escala mediante el método RKEF (*Rotary Kiln and Electric Furnace*) para ferróníquel (Nelson, 2014). Este método, caracterizado por su confiabilidad, representa el 77% de la producción a nivel mundial de ferróníquel (Zevgolís et al., 2022).

En la operación de los hornos de fundición, es relevante la objetividad que se tiene para el manejo de los cambios que ocurren en el proceso, relacionados a la composición química del mineral, del metal fundido o incluso a cambios en las materias primas. Considerando la importancia de cumplir los objetivos principales los cuales son mantener una operación segura, lograr la producción establecida y entregar un producto de calidad, durante una operación eficiente. Un factor clave y de gran relevancia para este tipo de procesos que implican altas temperaturas durante el cambio de fases de los materiales, es la seguridad, ya que, en las operaciones de ferróníquel, la temperatura del metal está por encima de los 1400°C y la temperatura de la escoria puede superar los 1500°C (Goodall, 2022). Una operación que cumpla con los estándares de seguridad permite dar cumplimiento a la continuidad en la operación y a todas las fases del proceso. Por lo que, los procesos de colada requieren actualizaciones constantes, adaptando los datos operativos y técnicos a nuevas mejoras que son necesarias debido a los cambios del proceso y a las nuevas tecnologías. Esto asegura que las operaciones respondan de manera efectiva a los desafíos actuales y mantengan un alto estándar de calidad y seguridad (Gregurek et al., 2022).

2.2.1 La piqueta como elemento crítico del horno

Uno de los elementos más críticos de los revestimientos refractarios de un horno es la piqueta (Coetzee y Sylven, 2010). Se conoce como piqueta al orificio por donde se retiene y se

extrae el metal fundido en el interior del horno. Este elemento está expuesto a altas temperaturas y a altos números de ciclos de coladas, las cuales implican apertura y cierre constante del orificio, dejando en claro que es una parte fundamental de la operación y de gran complejidad (Ribeiro, 2010). La apertura de una piqueta es un trabajo de alto riesgo y que reviste una alta importancia en la operación del horno (Morales et al., 2018). Así mismo, el procedimiento de cierre de la piqueta es de gran relevancia para asegurar la contención del metal fundido y prevenir accidentes, garantizando el sellado del orificio mediante la inyección de la masa por medio de una taponadora. Cualquier detalle es relevante para esta área por el riesgo que representa, una falla en la piqueta puede tener un impacto devastador en las operaciones (Steenkamp y Reynolds, 2022).

2.3 Masa Cerámica de Taponamiento

2.3.1 Definición de la masa cerámica de taponamiento

La masa cerámica de taponamiento es un refractario plástico (Dash et al., 2009). También conocida como arcilla para grifo o *Tap Hole Clay* (THC, por sus siglas en inglés). Como su nombre lo indica, esta masa se usa para rellenar y tapar el orificio de la piqueta, sin embargo, más allá de esta tarea cumple un papel importante para toda la producción de una planta, ya que, tiene el control de evitar una fuga de metal líquido, protege la zona interna del horno, y así mismo puede permitir una fácil apertura y cierre de la piqueta (Ribeiro, 2010). Su calidad de diseño y fabricación es importante para mantener la estabilidad y funcionamiento de un horno, y seguridad en una piqueta, adaptándose a los requerimientos y parámetros operativos de cada horno (Sako et al., 2018). Cualquier alteración o fallo de la masa, afecta la sincronización de la producción debido a que esto causa retrasos inesperados en toda la operación (Ribeiro, 2010).

2.3.2 Función de la masa cerámica en el sellado y apertura de la piqueta

Las masas encargadas de sellar los orificios de piqueta, al ser inyectadas, deben tener la capacidad de llevar el metal líquido al horno, contrarrestando el flujo del metal y rellenando de masa el orificio de la piqueta (Ribeiro, 2010). Así mismo, durante el sellado es necesario formar una estructura de taponamiento en forma de hongo dentro del horno, conectada al orificio de la piqueta. Este hongo protege el refractario en las zonas cercanas de este orificio (Miranda et al., 2014) y ayuda a mantener la masa dentro de la longitud del orificio de la piqueta (Kitamura, 2014).

Un proceso de taponamiento deficiente puede conllevar al colapso o no formación del hongo, infiltración del metal líquido, perforación difícil e inadecuada provocando un desgaste e incluso fisura en el material refractario que conforma el orificio de la piqueta (Miranda et al., 2014).

La masa cerámica de taponamiento es considerada como adecuada cuando sella rápidamente la piqueta, presenta una unión adecuada, mantiene una longitud constante del orificio de la piqueta y permite una fácil perforación (Dash et al., 2009).

Una masa sin calidad garantizada conlleva a altos riesgos como protección ineficaz al interior de la piqueta y mayor consumo para sellar la misma, siendo un comportamiento indeseable para cualquier industria de fundición (Sako et al., 2018) y económicamente inviable ya que, la masa cerámica de taponamiento es uno de los insumos que más costos representa en las industrias de fundición por lo cual el consumo de esta masa debe ser el necesario que garantice un sellado efectivo y que cumpla con los requisitos de seguridad en el proceso.

2.3.3 Parámetros clave para el desempeño de la masa cerámica

Para indicar un buen desempeño y funcionamiento de la masa cerámica, se requieren características fundamentales como buena plasticidad, endurecimiento rápido, buena adherencia a

la masa remanente dentro del orificio, facilidad de apertura, compatibilidad medioambiental y capacidad de almacenamiento conservando su vida útil. Estas propiedades aseguran una adecuada inyección de la masa en la taponadora de metal, un sellado eficiente y seguro reduciendo el tiempo de exposición de la taponadora a altas temperaturas, la correcta formación del hongo, una fácil perforación con el taladro, una disminución de emisiones al medio ambiente y la preservación del material conservando sus propiedades, respectivamente (Ribeiro, 2010).

Adicional, Dash (2009) refiere que, para mejorar el rendimiento de la masa cerámica, debe presentar características como una longitud estable y controlable del orificio de la piqueta, una fácil perforación de la masa sinterizada y una velocidad de fundición uniforme que depende de la textura de la masa dentro del orificio del horno. Un orificio liso contribuye a la posibilidad de tener un flujo laminar durante la extracción del metal, evitando perturbaciones en el flujo del metal que causan turbulencias, por lo que, un indicativo de que probablemente la textura de la masa cerámica de taponamiento será lisa dentro del horno es una perforación fácil y sencilla.

El diseño de la masa debe cumplir requisitos físicos y químicos, considerando factores como vida útil, rendimiento y productividad en caliente (Gupta et al., 2014). Además, su diseño debe satisfacer tres pilares esenciales: alta resistencia a la corrosión y erosión del refractario, capacidad de adherencia y correcto comportamiento plástico y resistencia mecánica en todo el rango de temperaturas (Sako et al., 2018).

El envejecimiento de la masa es influenciado por la interacción del aglutinante con los granos de la masa y por la transformación del aglutinante debido a la evaporación de volátiles, oxidación y procesos de polimerización. Adicional, la vida útil de las masas está directamente relacionada con las condiciones climáticas de almacenamiento (Dash et al., 2009).

2.3.4 Materiales comunes en las masas cerámicas

Este tipo de masas presentan una composición química compleja debido a las condiciones extremas de exposición, como las altas temperaturas (Ribeiro, 2010). Diversos autores han estudiado el aporte de cada material al desarrollo de la estructura y propiedades de la masa. A continuación, se expone una recopilación sobre la información relevante de estas materias primas.

El *tap hole clay* (THC) se compone principalmente de tres grupos de materiales: el agregado, la matriz y el aglutinante. El agregado es un material granular grueso usado como relleno y debe ser químicamente inerte al metal fundido y a la escoria. La matriz está compuesta por un grano más fino y le confiere propiedades especiales como resistencia a la corrosión y erosión, optimización de la densidad, entre otras. Por último, el aglutinante permite la unión de estos materiales, asegurando la cohesión de la mezcla de compuestos (Kumar et al., 2018).

La alúmina (Al_2O_3) es un material refractario con alta dureza, resistencia a la abrasión, temperatura de fusión elevada y es muy estable químicamente (Doremus, 2008). Es un tipo de materia prima principal, ya que proporciona estabilidad química a la masa cuando entra en contacto con el metal fundido (Sako et al., 2018). Se emplea tanto como agregado y como matriz en la masa taponadora (Kumar et al., 2018) y su función está relacionada a la refractariedad, resistencia a la abrasión y erosión de la masa (Ribeiro, 2010). Adicional, el alto contenido de alúmina tiene efectos positivos, debido a que aumenta la resistencia a la corrosión por escoria y mejora las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y a la flexión en caliente (Youn et al., 1997, como se citó en Ribeiro, 2010).

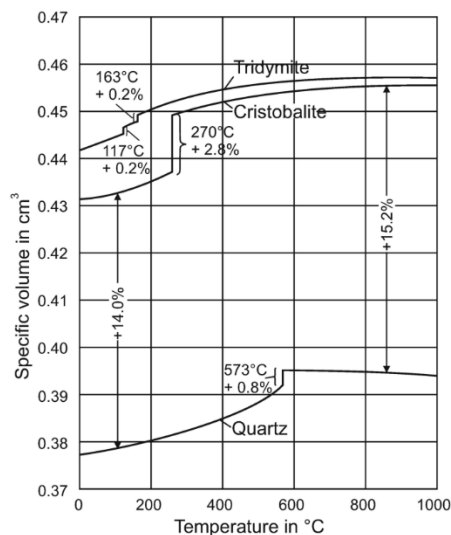
La sílice (SiO_2) también es un material refractario fundamental en la composición de las masas taponadoras. Una de sus funciones principales es su capacidad de expansión térmica entre 600°C y 1000°C (Dash, et al., 2009), esto se debe porque la sílice experimenta transformaciones

alotrópicas durante el calentamiento, las cuales generan cambios volumétricos (Leyva et al., 2010). A temperaturas superiores de 1000°C, inicia la transformación de cuarzo a cristobalita, alcanzando su máxima expansión en volumen que equivale a un 15% (Salmang y Scholze, 1982, como se citó en Aasly, 2008) como se observa en la Figura 1.

Samukawa et al. (2000), evaluaron la capacidad de adhesión y expansión de la sílice en relación con el comportamiento de la masa. Con este estudio evidenciaron que la SiO₂ influye directamente en la capacidad de adherencia entre la masa nueva inyectada y la masa antigua ya sinterizada, debido a que aumenta la sinterabilidad y la resistencia. Así mismo, su expansión es mayor permitiendo que la masa alcance longitudes dentro de los límites de seguridad del orificio de piqueta.

Figura 1

Dependencia de la temperatura del volumen específico de cuarzo, cristobalita y tridimita.



Nota. El gráfico representa la expansión en volumen en relación con la temperatura de los polimorfos principales de la sílice. Adaptado de *Refractory Materials. In: Introduction to Applied Mineralogy* (p.137), por Götze y Göbbels 2023, Springer.

La arcilla facilita la inyección de la masa y mejora la adherencia, sin embargo, es un material que a altas temperaturas provoca la contracción de la masa. Por ende, su uso debe ser controlado y contrarrestado con materiales capaces de inducir la expansión de la masa (Ribeiro, 2010).

El carbono es una materia prima clave en la masa de taponamiento. De sus funciones se tiene que, aporta un mejoramiento a la resistencia a la corrosión, tiempo de perforación y permeabilidad (Kumar et al., 2018).

El grafito es una fuente de carbono, que por su estructura laminar su función principal es aportar una mayor plasticidad y por ende favorece el proceso de extrusión. Adicional, puede influir en el mejoramiento de la resistencia a la corrosión de la masa (Ribeiro, 2010).

La eficacia del grafito sobre la resistencia a la corrosión depende de su composición en un rango determinado. Según Niu et al. (2002) como se citó en Ribeiro (2010), existe un rango ideal de contenido de grafito que aumenta la resistencia a la corrosión dependiendo en función de las condiciones operativas.

El carburo de silicio (SiC) es un material clave en la resistencia a la corrosión, también actúa como antioxidante y reduce la oxidación de otros materiales que componen la masa (Ribeiro, 2010). Adicional, tiene una muy baja reactividad con la escoria, por lo que, es un componente importante como materia prima de la masa (Sako et al., 2018).

Los aglutinantes son los responsables de mantener las partículas unidas en la mezcla de arcilla, e influyen en mayor medida en la reología de la arcilla (Dash et al., 2009).

Generalmente, los tipos de aglutinantes usados son el alquitrán o la resina fenólica. El uso de alquitrán presenta algunas desventajas como aglutinante, ya que, su endurecimiento es lento y su fuerza de unión es baja a la temperatura que se encuentra la piqueta, además, su generación de

humos y gases contaminantes es alta, representado un riesgo a la salud y medio ambiente considerando la presencia de compuestos de benzopireno, un hidrocarburo carcinógeno (Dash et al., 2009).

Por otro lado, el uso de resina fenólica tipo resol se empezó a implementar, debido a la seguridad que representa en comparación con el alquitrán, el cual es una amenaza a la salud del personal que lo manipula. Adicional, esta resina presenta una buena resistencia a altas temperaturas y una mayor velocidad de endurecimiento de la masa cerámica de taponamiento (Kumar et al., 2018). Como desventaja, la resina fenólica tiene una vida útil corta, debido a la polimerización y al aumento en la viscosidad durante su almacenamiento (Dash et al., 2009).

2.3.5 Innovaciones en la composición de las masas cerámicas

Para las industrias es importante considerar los aspectos ambientales que puede influir negativamente en las condiciones de trabajo y salubridad de los trabajadores y medio ambiente.

La industria de ferroníquel ha demostrado un interés en avanzar hacia una producción más sostenible, centrándose en enfoques como el ahorro de energía, el control de emisiones e implementación de materias primas que reduzcan el impacto ambiental (Bartzas y Komnitsas, 2015). Un desafío importante para las industrias es la transición de aglutinantes a base de alquitrán hacia resinas fenólicas, lo que mejora la seguridad al reducir componentes carcinógenos y la generación excesiva de humos que representan un riesgo ecológico y biológico. El objetivo es que estas llamadas "resinas verdes" aseguren la calidad de la masa cerámica utilizada en el taponamiento (Kumar et al., 2018) y, además, contribuyan al compromiso de las industrias hacia la sostenibilidad.

2.4 Procedimiento de Apertura y cierre de piqueta

2.4.1 Apertura de la piqueta

Para el procedimiento de apertura, la perforación se realiza con un taladro capaz de soportar los esfuerzos y tensiones durante el movimiento. Según el proceso se usa perforación por percusión pura, rotación pura o la combinación de estos dos, dependiendo de cual estrategia se ajusta más a las condiciones técnicas y de operación del horno (Dienenthal, 2014). Los operadores siempre buscan una perforación limpia y suave que minimice los daños al refractario (Dienenthal, 2014). Generalmente, si no se cuenta con un taladro de impacto, la perforación se realiza únicamente a la masa. Una vez encontrado el metal solidificado se procede a realizar la punción con oxígeno utilizando una lanza térmica de forma manual (Gregurek et al., 2016). Aunque este producto puede desgastar significativamente los refractarios, si es seleccionada adecuadamente su operación puede ser eficiente sin comprometer perjudicialmente la vida útil del refractario (Morales et al., 2018). La punción con oxígeno es la etapa final de apertura de la piqueta. Una vez fundido el metal solidificado, el metal contenido en el horno comienza a drenar por el canal hacia el crisol.

2.4.2 Cierre de la piqueta

Posteriormente al llenado del crisol, se realiza el cierre de piqueta. La masa cerámica se inyecta por medio de una taponadora de metal hidráulica o neumática con variación en la presión según el equipo (Ribeiro, 2010). Esta masa debe tener la capacidad de acumularse alrededor de las paredes internas del orificio y al final formar un tapón con forma de hongo como se muestra en el Apéndice A, este factor es supremamente importante para la protección interna del orificio por lo cual, el tiempo y temperatura de sinterización son factores clave para la formación de este (Nelson y Hundermark, 2016). De esta forma, se garantiza que el metal permanezca en el horno y su presión no provoque una fuga inesperada.

3. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos se realizaron las siguientes actividades.

3.1 Revisión bibliográfica

3.1.1 Búsqueda de literatura especializada

Durante el desarrollo experimental, se realizó una revisión bibliográfica sobre las masas cerámicas de taponamiento en hornos de fundición, con un enfoque en su composición química y funcionamiento principal para la operación.

3.1.2 Identificación de composición química relevante en masas cerámicas de taponamiento

Se identificaron las composiciones químicas con mayor importancia en las masas cerámicas de taponamiento empleadas en procesos pirometalúrgicos y su impacto en la eficiencia del taponamiento.

3.2 Revisión y comparación de las masas cerámicas de taponamiento

3.2.1 Revisión de fichas técnicas

Se realizó una revisión de las fichas técnicas de las masas cerámicas de taponamiento estudiadas para identificar su composición química.

3.2.2 Análisis comparativo

Se realizó una comparación entre las dos masas cerámicas estudiadas con la finalidad de determinar la que mejor funcionamiento puede presentar durante la operación con base en la revisión bibliográfica realizada.

3.3 Evaluación de parámetros operativos

3.3.1 Cálculo de cantidad necesaria de masa para el sellado de la piqueta

Se determinó la cantidad necesaria de masa cerámica para el sellado de la piqueta, considerando parámetros como el tamaño de la taponadora de metal, el desgaste del orificio, la masa remanente y la longitud interna de la piqueta.

3.3.2 Pruebas experimentales

Se definieron los parámetros evaluativos y se realizaron pruebas experimentales con la cantidad de masa calculada a los dos tipos de masa cerámica de taponamiento. Durante cada colada se registraron los datos correspondientes a la longitud de taladro de perforación, peso de masa cerámica cargada, peso de masa cerámica remanente, temperatura de colada, tiempo de sellado de metal, dureza de masa remanente y percepción del operador respecto a la facilidad de perforación, inyección de la masa y limpieza de la taponadora de metal.

3.3.3 Seguimiento a la dureza de las masas cerámicas de taponamiento

Se llevó un registro de la dureza de la masa cerámica de taponamiento dentro de su empaque y en la mesa de carga, con la finalidad de llevar un seguimiento a su condición física antes del proceso de carga a la taponadora de metal.

3.3.4 Análisis comparativo

Se realizó un análisis comparativo de los datos obtenidos, identificando el mejor desempeño de las masas cerámicas durante la operación para su posterior selección.

3.4 Desarrollo del procedimiento de sellado de la piqueta

3.4.1 Definición del procedimiento

Se definieron los pasos específicos del procedimiento de sellado de la piqueta, considerando los resultados obtenidos en las pruebas.

3.4.2 Diseño de un flujograma

Se desarrolló un flujograma que describa el proceso estipulado.

3.5 Seguimiento a la implementación del procedimiento

3.5.1 Implementación del procedimiento

Se implementó el procedimiento llevando un registro de datos de longitud de taladro de perforación, consumo de masa cerámica, temperatura de colada y dureza de la masa. De esta manera se implementó el registro del desempeño de la masa, para garantizar una operación segura y eficiente y realizar ajustes si es necesario.

3.5.2 Determinación del procedimiento estándar

Se determinó el procedimiento estándar para el sellado de la piqueta.

3.6 Presentación Informe final

Finalmente, se redactó el libro de tesis de grado, considerando los factores influyentes en el proceso experimental, así como los resultados y análisis respectivos.

4. Resultados y análisis

4.1 Efecto de la composición química en las masas cerámicas de taponamiento

La revisión de las fichas técnicas de las masas proporcionadas por los proveedores permitió obtener la composición química de cada tipo de masa, la cual se observa en la Tabla 1.

Tabla 1

Composición química de los dos tipos de masa

	Análisis químico					
	% Al ₂ O ₃	% SiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% SiC	% C	% TiO ₂
Tipo A	33,5	51,6	-	10,4	-	-
Tipo B	38,1	37,6	1,7	7,2	12,7	1,0

Adicional, el área de salud ocupacional de la empresa realizó las pruebas biológicas respecto a los componentes descritos en las fichas de seguridad de cada tipo de masa. En los comunicados presentan que las exposiciones están por debajo del límite de detección de componentes como formaldehído en la masa tipo A y sílice en fracción respirable en la masa tipo B.

Con base en la composición de alúmina (Al_2O_3), la masa tipo B tiene una mayor proporción por lo que, se puede inferir que tendrá una mejor resistencia a la abrasión y a la corrosión por escoria y una mayor estabilidad química (Doremus, 2008; Ribeiro, 2010). Esto es importante en operaciones de hornos eléctricos de ferróníquel, ya que las temperaturas están por encima de los 1400°C (Goodall, 2022). Por lo que, la masa tipo B puede tener un mejor comportamiento en relación con la estabilidad química frente a un entorno agresivo.

La proporción de sílice (SiO_2) es mayor en la masa tipo A, lo que permite inferir que tendría un mejor comportamiento frente a la expansión térmica (Dash et al., 2009), siendo beneficioso en el sellado de la piqueta de metal. Este parámetro puede relacionarse con los resultados de longitud de taladro obtenidos en las pruebas realizadas.

Según Callister y Rethwisch, (2013), los componentes esenciales de la mayoría de refractarios cerámicos son el sistema sílice-alúmina y entre 25-45% en peso de Al_2O_3 se conforman los principales refractarios de alta pureza. Considerando la composición de los dos tipos de masa, sus principales compuestos son Al_2O_3 y SiO_2 y ambas están dentro del rango de 25-45% de Al_2O_3 . Según el diagrama de fase $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Apéndice B), dentro de este rango de composición de las masas tenemos las fases de equilibrio mullita y cristobalita, los cuales son potenciales refractarios por sus propiedades destacables. La mullita presenta propiedades como alta estabilidad térmica, estabilidad a la corrosión y una apropiada resistencia y tenacidad a la fractura, sin embargo, tiene

una baja expansión térmica (Schneider et al., 2008), la cual es compensada con la presencia de cristobalita debido a su alta fracción volumétrica, lo que permite la expansión de la masa cerámica una vez inyectada dentro del horno y así, alcanzar longitudes de taladro adecuadas, teniendo los beneficios de las propiedades de la mullita y cristobalita durante la operación. Asimismo, esta fase se encuentra en estado sólido hasta los 1587°C, por lo que, las condiciones de temperatura de metal en la operación del horno de fundición están en un rango entre 1400°C a 1500°C, siendo un valor por debajo de los 1587°C.

El carburo de Silicio presente en las dos masas puede ser suficiente para otorgar los beneficios de resistencia a la corrosión, antioxidación y baja reactividad con la escoria.

La masa tipo B presenta una cantidad de carbono en forma de grafito, esto es relevante ya que, este componente le aporta beneficios de mejoramiento de la plasticidad (Ribeiro, 2010), lo que puede ayudar a facilitar la extrusión e inyección de la masa en el proceso de taponamiento. Este parámetro se relaciona con la evaluación de la longitud de taladro y la percepción de los operadores frente a la inyección y perforación de la masa.

Ambas masas están compuestas de resina fenólica como aglutinante, esto le proporciona tiempos de endurecimiento más rápidos durante el sellado de la taponadora y al no tener compuestos carcinógenos ni generación excesiva de humos, representa un impacto positivo en la seguridad operacional y ambiental y en la sostenibilidad de los procesos. Sin embargo, es de especial cuidado la vigilancia en los tiempos de caducidad de la masa, ya que su vida útil es corta por los procesos de polimerización (Dash et al., 2009).

En términos generales, la masa tipo A tendrá mejor comportamiento frente a la oxidación y expansión térmica, permitiendo que se lleve un control de longitud establecida de sellado de la piqueta. La masa tipo B, al tener mayor proporción de alúmina y composición de carbono y sílice,

puede mostrar un comportamiento más favorable en condiciones de corrosión y de temperatura extrema. La presencia de Alúmina y carbono la hace adecuada en procesos con altas temperaturas y exigencia química, como en la industria de ferróníquel en la que la composición química en las materias primas del horno eléctrico puede variar y alcanzar temperaturas muy altas de aproximadamente de 1500°C.

4.2 Evaluación de parámetros operativos

4.2.1 Carga de taponadora de metal

Se llevó a cabo una fase preliminar en la cual se encuestaron todos los operadores de colada y sangría. El objetivo de esta encuesta fue obtener datos precisos sobre la cantidad de bloques de masa o panelas que cada operador cargaba en la taponadora de metal vacía. La capacidad de la taponadora es de 36 litros representando el 100% de volumen de carga de la taponadora, por lo que, cargarla al 100% significa llenar en volumen de masa toda su capacidad.

Los resultados de estas encuestas mostrados en la Figura 2, revelaron una variabilidad significativa en las cantidades de pasta taponadora utilizadas por cada operador evidenciando que no había una estandarización en los datos de carga, sin embargo, el dato más representativo y reiterativo equivale a un 79% de volumen de masa en la taponadora. Usando este como referencia, se identificó que una cantidad considerable de pasta taponadora quedaba como masa remanente, mientras que las longitudes de taladro superaban los 20 cm, límite de seguridad establecido por la empresa, lo que sugería una pérdida innecesaria de material como se muestra en el Apéndice C.

La masa remanente es aquella cantidad de masa que no fue inyectada completamente durante la operación quedando en la taponadora de metal. Este factor es clave en el consumo de este insumo, ya que, tener mayor cantidad de masa remanente nos puede indicar un sellado inadecuado del orificio de piqueta o un desperdicio si la longitud de taladro supera el límite de

Según Nelson y Hundermark (2016), del volumen del cañón de una taponadora solo alrededor del 24% es entregado al orificio de la piqueta y el restante se atribuye a las demás funciones específicas como limpieza de boquillas, expulsión de desechos, fuga de arcilla entre el grifo y la cara de la boquilla, formación del hongo y limpieza de la taponadora de arcilla.

Adicionalmente, el desperdicio de la masa también puede deberse a algunos factores como almacenamiento incorrecto sin control de temperatura o almacenamiento más allá de su vida útil, perjudicando el desarrollo y buen funcionamiento del material, afectando su uso y teniendo que desechar.

Para la cuantificación de la pasta se consideran las funciones específicas que atribuye Nelson y Hundermark (2016). La evaluación de estas fases nos permitirá identificar posibles oportunidades para reducir el consumo de pasta taponadora, manteniendo simultáneamente los estándares de calidad y seguridad operativa.

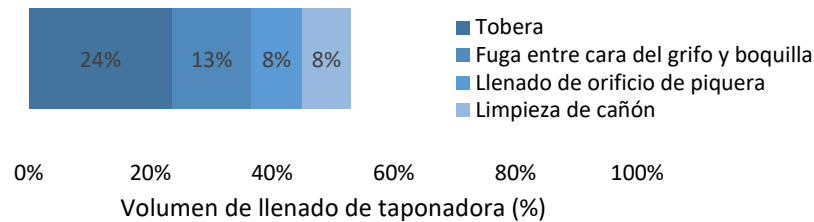
Es de gran importancia que en cada extrusión siempre debe quedar carga en la tobera. Esto se debe a que el pistón puede ejercer presión hasta el límite entre la tobera y el cañón. Debido al cambio de forma en la tobera, el tamaño del pistón no le permite continuar su recorrido más allá de este límite.

De las funciones específicas que cumple la masa, se estimó su cantidad en términos de porcentaje de llenado de la taponadora de metal. Considerando el volumen de masa en la tobera, este representa aproximadamente un 24% de llenado de la taponadora. Teniendo en cuenta la longitud interna de la piqueta y el desgaste que sufre el orificio, la porción de masa que queda dentro del orificio de la piqueta constituye alrededor del 8% de llenado de la taponadora, la masa remanente que queda para limpieza de cañón es de aproximadamente un 8% en volumen y la fuga evidenciada entre la boquilla de la taponadora y el grifo es de un 13%. Esto equivale un 53% en

total de volumen de llenado de la taponadora como se observa en la Figura 4, de las cuales, la limpieza de cañón y la fuga entre la cara de la piqueta y la boquilla de la taponadora representan un 21% de oportunidad de mejora con la finalidad de reducir el desperdicio que se relaciona con estas dos funciones. La fracción restante necesaria constituye a las demás funciones que no pueden ser calculadas como el reemplazo del hongo y la expulsión de desechos.

Figura 4

Estimación del consumo y desperdicio de masa cerámica



Nota. El gráfico representa una estimación del consumo y desperdicio de la masa mediante el porcentaje de volumen de carga de la taponadora.

Adicionalmente, con los resultados de las encuestas se calculó el cuartil 1 como medida de referencia para buscar una optimización del consumo, teniendo como resultado un volumen aproximado de 68% de llenado de la taponadora de metal. Con base en esta información, se tomó la decisión de iniciar las pruebas con la cantidad de masa equivalente al 68% de llenado de la taponadora, representando una fracción significativa de su capacidad, al considerar que está por encima de las funciones específicas estimadas y representadas en la Figura 4 y es una carga usada por algunos de los operadores encuestados.

Ante esta observación, se decidió realizar un análisis de "What If" para evaluar el impacto potencial al disminuir los niveles de carga de pasta taponadora en el proceso y los posibles escenarios que pueden ocurrir como se observa en el Apéndice E. Este análisis nos permitió

determinar las condiciones ideales para la realización de pruebas más específicas garantizando condiciones seguras de operación.

4.2.2 Pruebas experimentales

Con base en lo previamente analizado, se procedió a implementar las pruebas experimentales con el objetivo de validar los resultados obtenidos durante la fase de análisis preliminar. Estas pruebas se realizaron llevando un seguimiento de la masa y de la longitud del taladro, ya que, esta es una tarea crítica y requiere evaluar los factores que ayudan a controlar y asegurar las condiciones de operación, salvaguardando la integridad física de los operadores y el proceso.

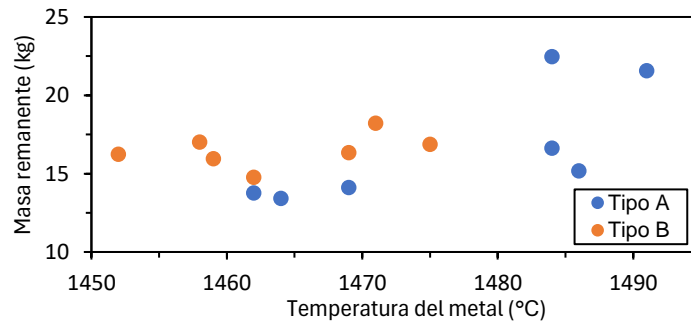
Adicional se llevó un registro de datos de parámetros como: peso de la masa cargada, peso de la masa remanente, temperatura de colada, dureza de la masa (dentro del empaque y en la mesa de carga), tiempo de sellado de metal, y la percepción del operador respecto a la facilidad de perforación, inyección de la masa y limpieza de la taponadora de metal. Estos parámetros proporcionan una base integral para evaluar el desempeño de las masas cerámicas y buscar mejoras en el proceso de manera segura y eficiente.

4.2.2.1 Resultados. La temperatura afecta la masa tipo A de una forma más notoria que para la masa tipo B como se observa en la Figura 5. Esto es debido a que, en los resultados de las pruebas, en el rango de temperatura de la masa tipo A, la masa remanente presentó una variabilidad considerable cuyo coeficiente de variación fue de 22,6 %, mostrando que a mayor temperatura la cantidad de masa remanente es mayor. En cambio, la masa tipo B, presentó un comportamiento más estable en relación con la cantidad de masa remanente con un coeficiente de variación de 6,4 %, mostrando una menor sensibilidad a la temperatura. La diferencia del coeficiente de

variación de la masa tipo A indica que presenta un comportamiento 3,5 veces más variable que el encontrado para la masa tipo B, esto nos puede indicar que la temperatura impacta en mayor medida el transporte de la masa tipo A dentro del orificio de la piqueta.

Figura 5

Efecto de la temperatura en la masa remanente de cada tipo



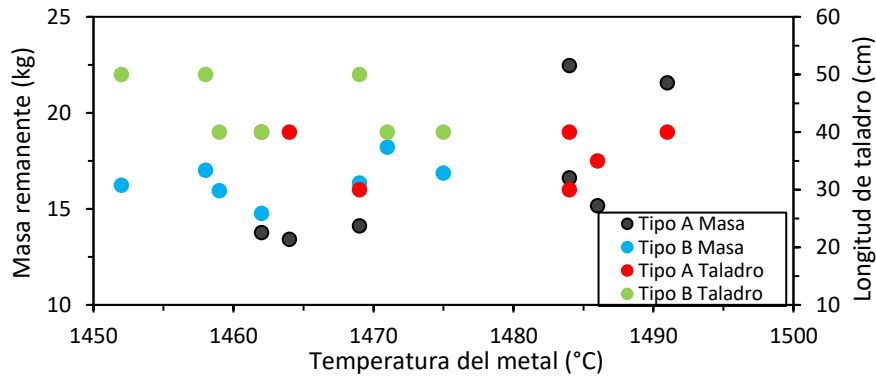
Nota. El gráfico representa la cantidad de masa remanente luego de cada colada durante las pruebas de cada tipo de masa.

De manera general, la masa tipo A muestra un comportamiento en el que, a mayor temperatura queda mayor cantidad de masa remanente y la masa tipo B muestra un comportamiento regular y estable.

Al comparar ambas masas en el rango de 1460°C a 1480°C, se observa que ambas fueron utilizadas en estas condiciones. Sin embargo, la masa tipo A muestra una menor cantidad de masa remanente en comparación con la masa B. Así mismo, respecto a los resultados de la longitud de taladro, todos están por encima del límite de seguridad, como se observa en la Figura 6 y Figura 7. No obstante, en general, la masa tipo A presentó longitudes de taladro menor que la masa tipo B. De esto se puede inferir que la relación entre la cantidad de masa remanente y la longitud de taladro no es inversa, es decir, tener menos masa remanente no implica necesariamente una mayor longitud de taladro.

Figura 6

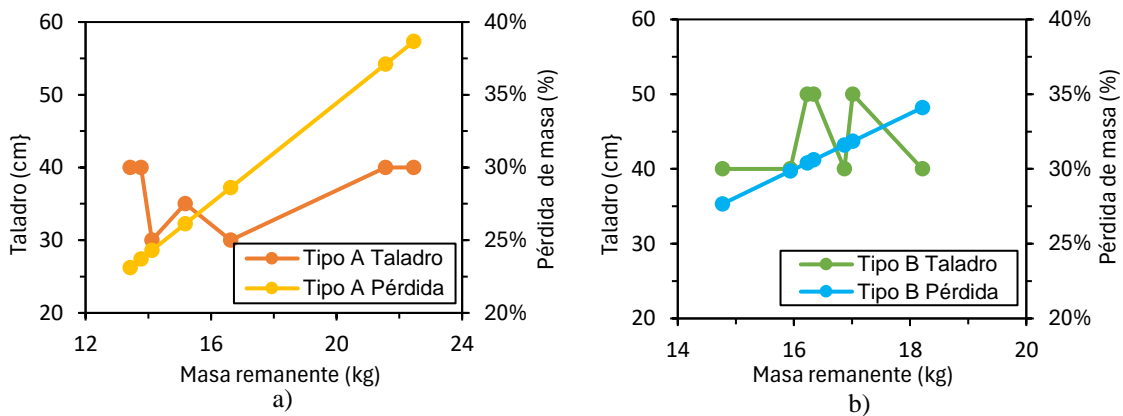
Relación de la temperatura con la masa remanente y la longitud de taladro



Respecto al porcentaje de pérdida de masa y como es de esperarse, según lo observado en la Figura 7, la masa tipo A presentó un menor porcentaje de pérdida en comparación con la masa tipo B. Esto se debe a que, por lo mencionado previamente, las cantidades de masa remanente fueron menores en la masa tipo A.

Figura 7

Relación de la longitud de taladro y pérdida de masa de cada tipo



Nota. a) masa tipo A, b) masa tipo B.

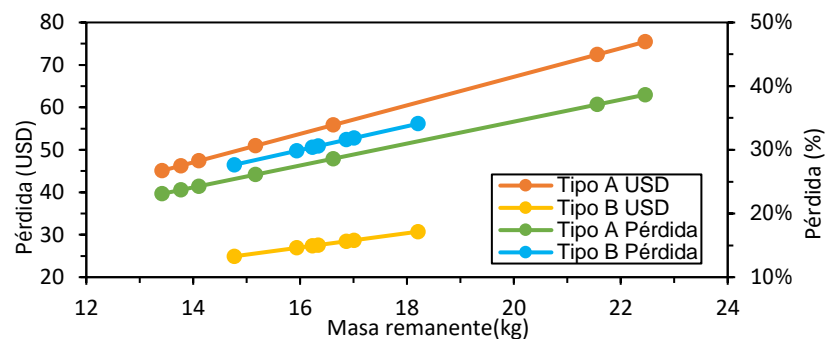
Respecto al costo unitario, la masa A tiene un valor 1,99 veces mayor que la masa tipo B. Desde un enfoque económico, el análisis expone que la masa A tiene una pérdida significativamente mayor en comparación a la masa B, ya que, a pesar de que la masa A tuvo una

menor cantidad de masa remanente durante las pruebas, su costo unitario es mayor significando una pérdida más elevada para la empresa, como se observa en la Figura 8.

Asimismo, se corrobora la importancia de optimizar el consumo de la masa, puesto que, según Nelson y Hundemark (2016), se ha demostrado que la reducción controlada de arcilla a la piqueta ha resultado en un aumento de la longitud de taladro.

Figura 8

Relación de la cantidad y pérdida económica de la masa remanente durante cada operación



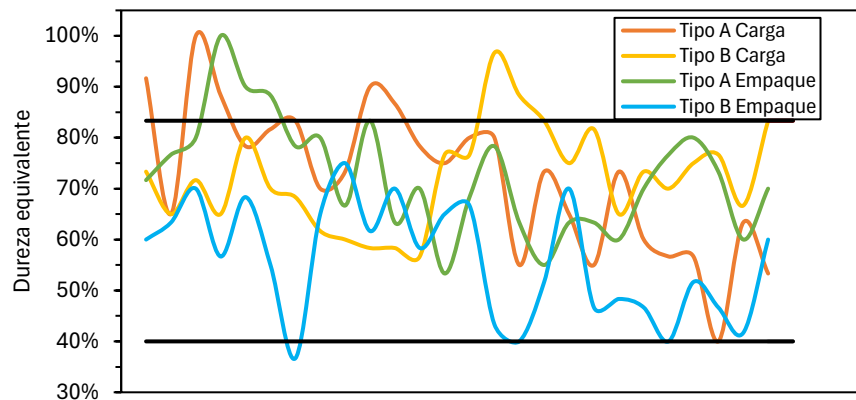
El análisis de dureza en el empaque nos muestra que la masa tipo A presenta una dureza 1.3 veces mayor en comparación con la masa tipo B. De las muestras evaluadas, el 15% de la masa tipo A en empaque supero el límite de dureza permitido para operación y la masa tipo B no registro alguna masa en empaque que superara el límite. Así mismo, de la masa puesta en la mesa de carga, el 19% de la masa tipo A y el 11% de la masa tipo B supero el límite de dureza establecido, lo que evidencia que la dureza aumenta cuando la masa es retirada de su empaque y puesta en la mesa de carga como se observa en la Figura 9. Según Dash et al. (2009), la polimerización y la viscosidad de la resina fenólica aumenta durante el almacenamiento de la pasta, así mismo, uno de los factores que activan el inicio de la polimerización es el calor (Estrada y López, 2017). Esto es relevante al considerar que las condiciones reales de temperatura son de aproximadamente 40-45°C, debido a la radiación generada por los hornos eléctricos, lo que se constituye como un factor influyente en

el inicio de la polimerización del aglutinante, lo que puede explicar el aumento de la dureza de la masa en la mesa de carga.

De forma general, las masas se encuentran dentro de los límites establecidos como rango de trabajabilidad para una extrusión eficiente. Este rango es representado por las líneas negras en la Figura 9 y fue determinado de acuerdo con la percepción y experiencia de cada operador para garantizar el desempeño funcional de la masa durante su aplicación, mostrado en el Apéndice F.

Figura 9

Dureza de las masas en el empaque y mesa de carga



Nota. El gráfico muestra la dureza equivalente de cada masa, dentro del empaque y en la mesa de carga. Adicional, se presenta un rango de trabajabilidad (líneas negras), definido para garantizar el mejor desempeño de la masa.

Para mantener la seguridad operativa, la taponadora se retira de la piquera entre 5 y 10 minutos después de completar la inyección de la masa dentro de la piquera. Esto garantiza que la pasta se sinterice en su totalidad, asegurando que no se produzcan filtraciones del metal.

Respecto a la limpieza de la taponadora, los operadores manifestaron que la masa tipo B tenía mejor expulsión, ya que no se adhería a las paredes internas de la taponadora de la forma que

lo hacia la masa tipo A. Esto se traduce en una disminución del tiempo de limpieza de la taponadora al no tener que eliminar las costras de masa adheridas, lo cual facilita el trabajo del operador.

4.3 Desarrollo del procedimiento de sellado de la piqueta

A partir de los resultados obtenidos y de los procedimientos ya establecidos por la empresa relacionados con la masa taponadora y la apertura y cierre de la piqueta, se definieron los pasos específicos con las modificaciones que integran mejoras potenciales al proceso.

En el procedimiento de arranque de subfase de colada (CMSA, 2021), se modificó la tarea 3 de verificación y acondicionamiento de la instrumentación y equipos de la subfase, y en el procedimiento de parada de subfase de colada (CMSA, 2023), se modificaron las tareas 3, 4, 5 y 6 de centrado del taponador, desplazamiento radial hacia adentro, inyección y retiro del taponador de metal. Estos pasos se resumen de manera general en los siguientes flujogramas.

Figura 10

Procedimiento de carga de la taponadora de metal

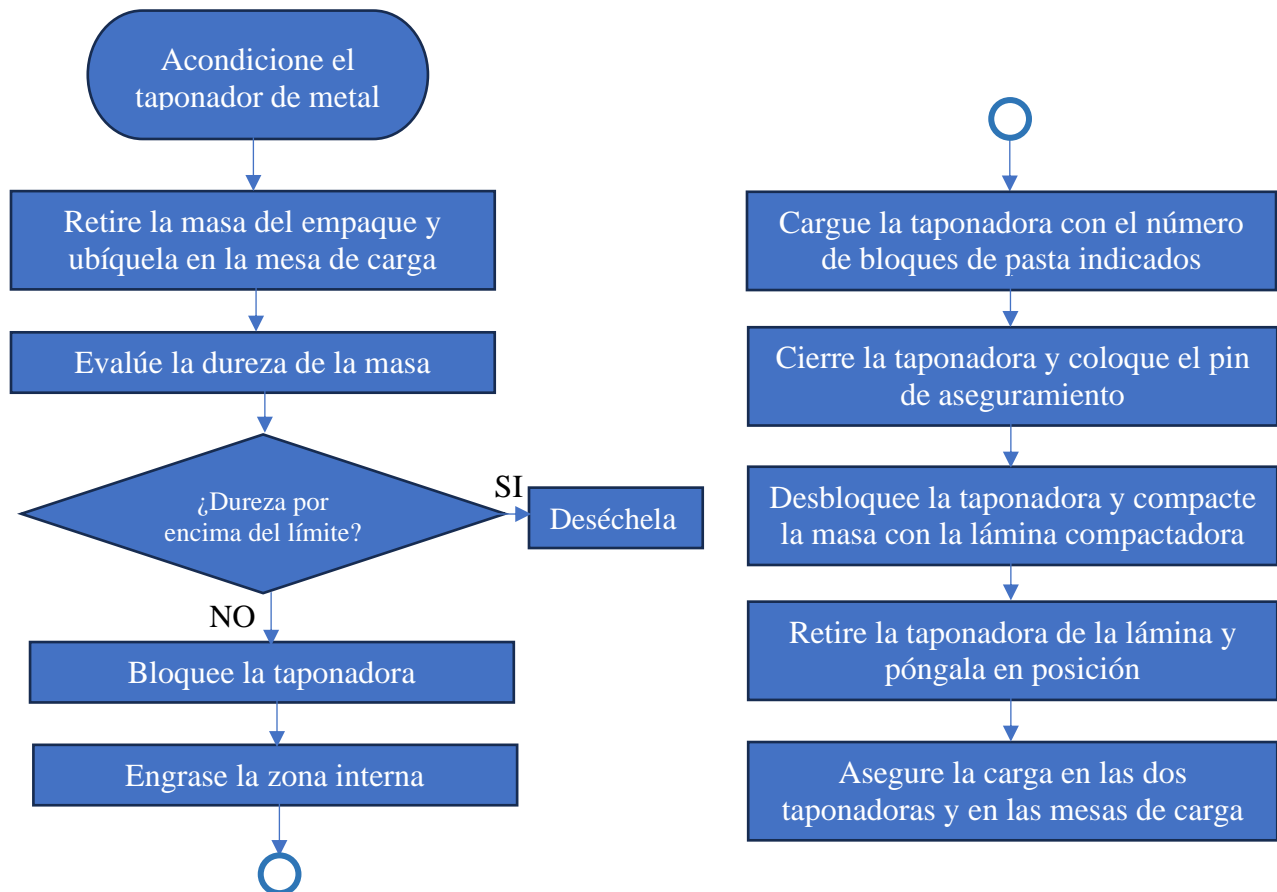
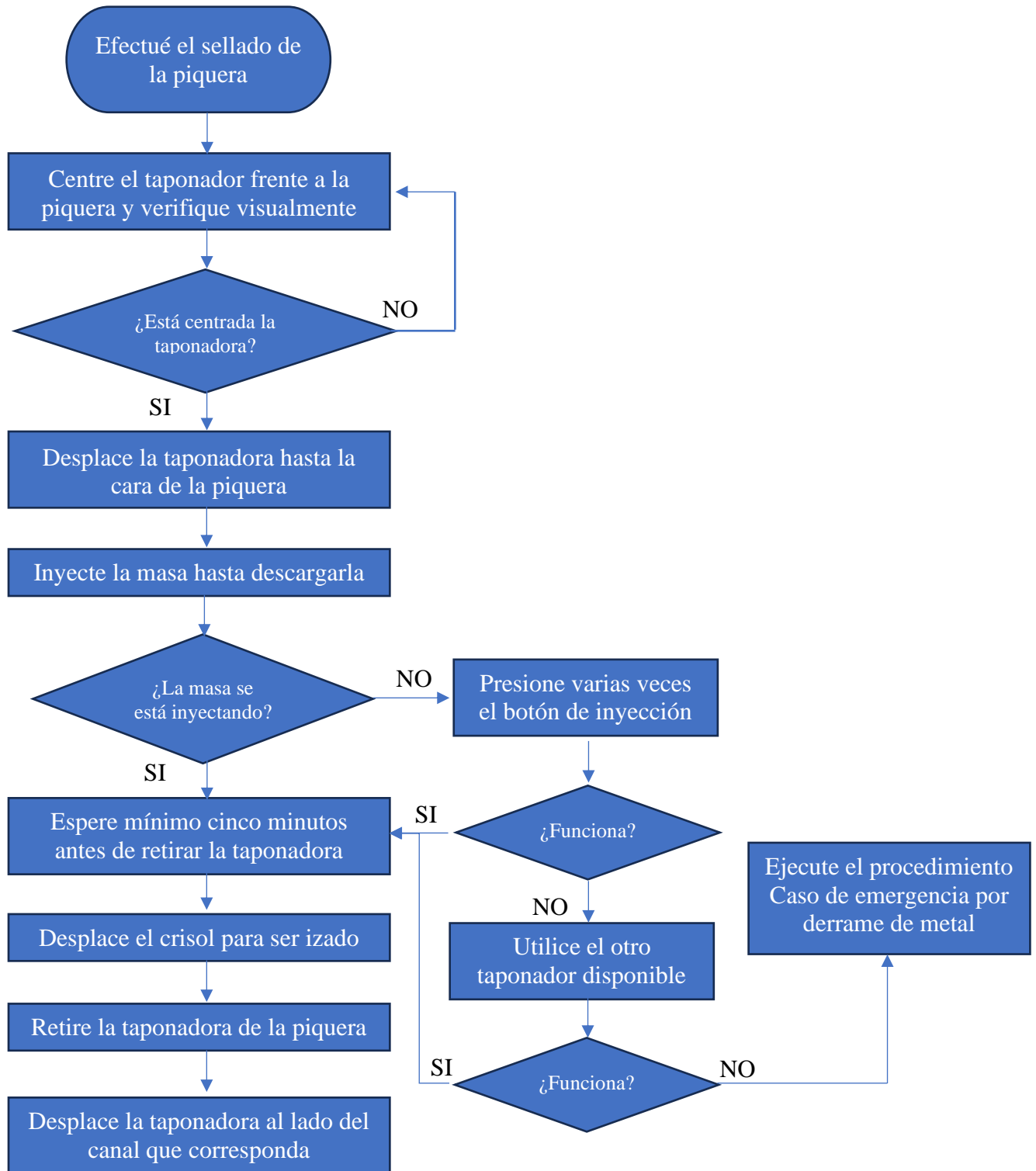


Figura 11

Procedimiento de sellado de la piqueta de metal



4.4 Resultados de aplicación

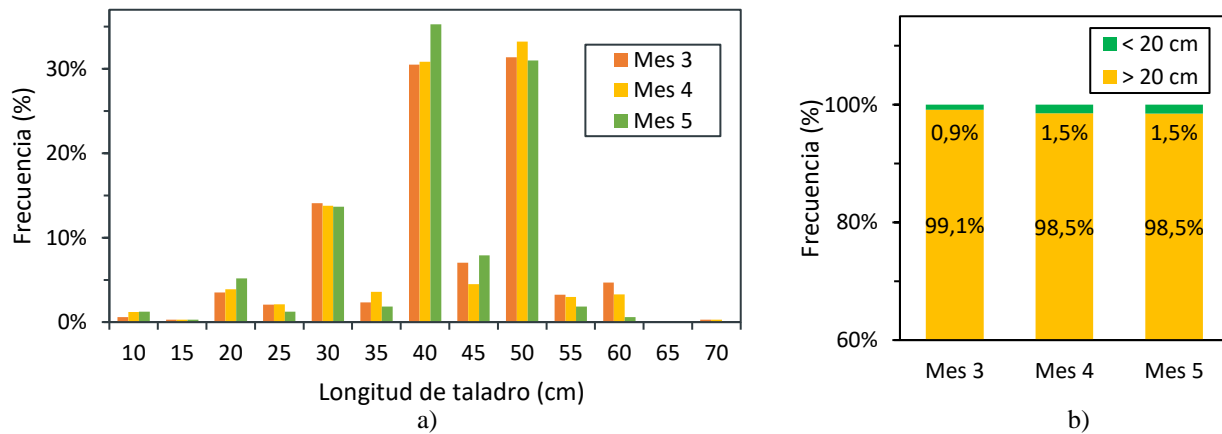
Luego de las aplicaciones de las pruebas, al mes siguiente (mes 3) se implementó el procedimiento mejorado con el uso de la masa tipo B. El registro de longitud de taladro mostró resultados positivos al tener una mayor frecuencia de longitud de taladro entre 30 y 50 cm como se muestra en la Figura 12 (a). Además, las longitudes menores a 20 cm representaron únicamente el 0,9% y 1,5% de las coladas registradas de cada mes, como se observa en la Figura 12 (b).

El consumo real mensual de la pasta taponadora, evidenció un comportamiento descendente en comparación con el plan mensual establecido como se muestra en la Figura 13. El índice de dureza de la masa en el empaque y en la mesa de carga, de manera general, estuvo dentro de los límites establecidos como se observa en la Figura 14. Esto valida la efectividad de la optimización del consumo de la pasta taponadora, garantizando el sellado eficiente, el cual se corrobora con un taladro por encima del límite de seguridad y sin eventos de *runout*.

Con estos resultados positivos se implementó el procedimiento estándar, realizando las modificaciones específicas en los procesos de arranque de subfase de colada y parada de subfase de colada.

Figura 12

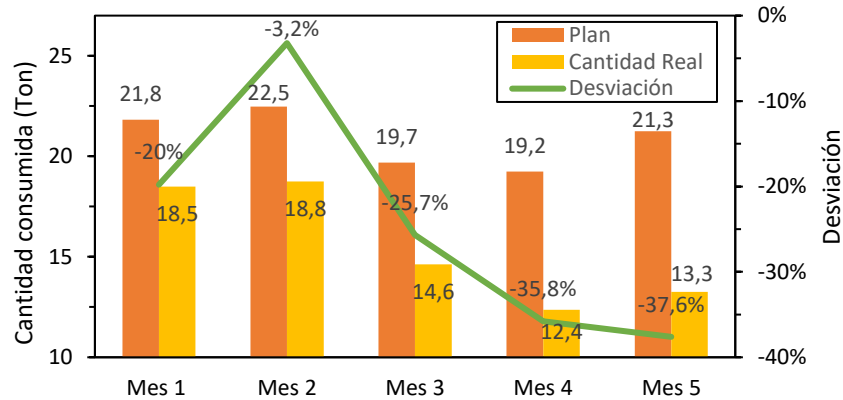
Registro mensual de la longitud de taladro



Nota. El gráfico muestra el porcentaje de frecuencia mensual de las longitudes de taladro. a) Porcentaje de frecuencia de las longitudes de taladro registradas, b) Porcentaje de frecuencia de longitud de taladro con relación al límite de seguridad establecido.

Figura 13

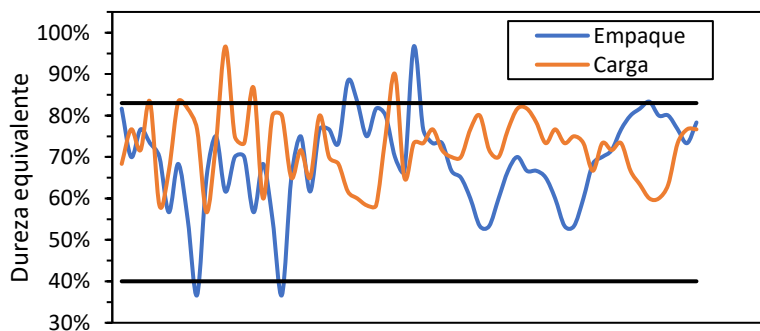
Consumo mensual de la masa cerámica de taponamiento



Nota. El gráfico muestra la desviación mensual con relación al consumo de la masa taponadora y el plan establecido.

Figura 14

Evaluación de dureza



Nota. El gráfico muestra la dureza equivalente tomada durante la operación luego de la implementación del procedimiento.

5. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación, se evaluó el comportamiento de dos masas cerámicas de taponamiento para piqueras de hornos eléctricos en condiciones reales de operación. Se obtuvieron los valores de los parámetros operativos y se realizó la selección de la masa más adecuada mediante un análisis comparativo de su desempeño. También, se implementó la estandarización del procedimiento optimizado de sellado de la taponadora de metal.

Según la literatura las dos masas son catalogadas como refractarios de alta pureza por su composición entre 25-45% de Al_2O_3 . Además, los resultados demostraron que a temperaturas de operación de $1450^{\circ}C$ y hasta de $1500^{\circ}C$, el desempeño de la masa tipo B fue superior logrando una mejor estabilidad operativa, donde parámetros como el porcentaje de pérdida de masa fueron superiores a la masa tipo A pero la longitud de taladro fueron en promedio 1.2 veces superiores a los registros de la masa A, demostrando la capacidad de la masa B de tener mayor aprovechamiento del consumo y mantener el orificio de la piqueta funcional durante los ciclos de operación en estos hornos. La menor dureza de la masa tipo B permitió que más del 90% de esta fuera utilizada al estar en condiciones adecuadas para la operación, en comparación con el 70% de uso de la masa tipo A. Esto facilitó tanto los procesos de perforación, inyección en la taponadora de metal, así como su limpieza interna, optimizando los tiempos operativos y reduciendo los riesgos asociados al trabajo manual en condiciones de alta temperatura. Estas ventajas, se atribuyen a la acción del sistema $SiO_2-Al_2O_3$ presente en forma de cristobalita y mullita, que le permiten soportar las altas temperaturas de operación, permitiendo su adherencia y la protección al refractario de factores como la corrosión y erosión, así mismo, el carbono que únicamente está presente en la masa tipo B en forma de grafito, le proporciona propiedades adicionales como plasticidad, que se relacionan

con el mejoramiento obtenido, según los operadores, en la extrusión e inyección de la masa, así como la facilidad de limpieza de la taponadora.

En línea con los parámetros ambientales y de salubridad, ambas masas cuentan con aglutinante a base de resina fenólica, lo que beneficia el cumplimiento de la industria de ferróníquel con los estándares de sostenibilidad ambiental al evitar el uso de insumos a base de alquitrán y reducir la emisión de humos contaminantes. Además, los cambios de dureza evidenciados en la masa una vez retirada de su empaque se atribuyen a los procesos de polimerización que sufren las masas por este tipo de aglutinante de resina.

La masa tipo A mostró un comportamiento satisfactorio, sin embargo, su desempeño fue superado por la masa tipo B en varios aspectos. Uno de ellos es su aumento en la dureza que limita su vida útil, ya que, estando en empaque presentó comportamientos de envejecimiento más rápidos equivalente a un 15% de masa que superó el límite de dureza permitido, mientras que la masa tipo B en empaque no supero el límite de dureza. Este factor es relevante en términos económicos, ya que, la masa tipo A cuesta 1,99 veces más que la masa tipo B y, al tener menor costo unitario representa una menor pérdida económica en caso de desperdicio o degradación de la masa, convirtiéndose en una alternativa eficiente para optimizar los costos de este insumo sin perjudicar la seguridad y calidad del proceso.

Como resultado final se seleccionó la masa tipo B, la cual demostró una notable estabilidad operativa durante los meses de uso con una longitud de taladro con un registro por encima de 20cm superior al 98% y una variabilidad por debajo del 20%, corroborándose como la opción más adecuada para las condiciones operativas del proceso. Asimismo, reemplazando el uso en promedio del 79% de llenado de la taponadora a un consumo estándar de 68%, se logró una optimización del consumo con una reducción significativa registrada hasta de un 38% en la

cantidad de pasta utilizada mensual y un ahorro acumulado del 99% durante los tres meses que se registró el consumo de la masa en este estudio, manteniendo la seguridad y eficiencia del proceso. Con esto, se llevó a cabo la estandarización del procedimiento de sellado de la piqueta de metal, siendo complementado con la divulgación al personal operativo y cerciorando el entendimiento de este.

La investigación enfocada a la industria de las ferroaleaciones aporta significativamente a la importancia de la optimización y mejora continua de los insumos de la operación. Este estudio resalta la importancia de adaptación a los nuevos retos y variables que surgen, manteniendo la flexibilidad en los procesos que permitan garantizar una operación eficiente pero alineada a las demandas actuales de la industria. Además, permite contribuir a un mejoramiento del desempeño productivo y un fortalecimiento de la sostenibilidad industrial.

6. Recomendaciones

Evaluación continua de los parámetros operativos al comportamiento de la masa tipo B en tiempo real, enfocado en factores como la longitud del taladro, dureza de la masa, temperaturas de operación y consumo mensual. Esto permitirá continuar llevando un seguimiento al comportamiento de la masa y realizar ajustes en caso de que sea necesario.

Desarrollo de programas de formación para el personal de colada y sangría en el manejo de la masa taponadora de metal, enfocado en el entendimiento del comportamiento del aglutinante frente a la exposición a altas temperaturas y condiciones de almacenamiento. Esto garantizará un adecuado uso de la pasta, así como, observaciones y sugerencias objetivas por parte de los operadores en caso de un comportamiento anormal en la pasta.

Referencias Bibliográficas

- Aasly, K. (2008). *Properties and behavior of quartz for the silicon process*. Norwegian University of Science and Technology. <http://hdl.handle.net/11250/235844>
- Bartzas, G., y Komnitsas, K. (2015). *Life cycle assessment of ferronickel production in Greece*. *Resources Conservation and Recycling*, 105, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.016>
- Basson, E. (2024). *World Steel in Figures 2024*. World Steel Association. <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>
- Bellemans, I., De Wilde, E., Moelans, N., y Verbeken, K. (2018). *Metal losses in pyrometallurgical operations- A review*. *Advances in Colloid and Interface Science*, 255, 47-63.
- Cahn, R. W., y Haasen, P. (Eds.). (1996). *Physical metallurgy*. Elsevier Science & Technology.
- Calderys. (s. f.). Tap Hole. Calderys. <https://calderys.com/iron-steel/iron-making/tap-hole>
- Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2013). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. (9ª ed). Wiley.
- CMSA (2000). Expansion project. Vol 1.
- CMSA (2010). General Arrangement: Electric Furnace. Sections.
- CMSA (2021). Arranque de subfase de colada. PR037107.
- CMSA (2023). Parada de subfase de colada. PR037112
- Coetzee, C., y Sylven, P. (2010). *No tap-hole–No furnace* [Sesión de conferencia]. SAIMM Refractories Conf, 55-66.

- Dash, S. R. (2009). *Development of improved tap hole clay for blast furnace tap hole* (Tesis doctoral). National institute of technology, Rourkela.
- Dienenthal, A. (2014). *A short history of the development of tapping equipment. Furnace Tapping 2014*, 203-216.
- Doremus, R.H. y Shackelford, J.F. (Eds.). (2008). *Alumina. Ceramic and Glass Materials*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73362-3_1
- Estrada, M. M., y López, B. Á. (2017). Dinámica de polimerización enfocada a reducir o prevenir el estrés de contracción de las resinas compuestas actuales. Revisión bibliográfica. *Avances Odontoestomatología*, 33(6), 261-272. <https://scielo.isciii.es/pdf/odonto/v33n6/0213-1285-odonto-33-6-263.pdf>
- Gasik, M. (Ed.). (2013). *Handbook of ferroalloys: Theory and technology*. Elsevier Science & Technology.
- Goodall, G.R. (2022). *Furnace Tapping Practices and Taphole Refractory Maintenance at Koniambo Nickel SAS*. *JOM* 74, 3937–3946. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05465-z>
- Götze, J., y Göbbels, M. (2023). *Refractory Materials. In: Introduction to Applied Mineralogy*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64867-4_7
- Gregurek, D., Peng, Z., Wenzl, C., y White, J. F. (2016). *Metal Smelting and Furnace Tapping*. *JOM*, 68(6), 1516-1517. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1925-y>
- Gregurek, D., Wenzl, C., Unterreiter, G., Ulrich, H., y Vukovic, G. (2022). et al. Improving Tapping Experience—and Why to Choose a Comprehensive Approach. *JOM* 74, 3999–4008. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05388-9>

- Gupta, A. D., Banerjee, K. P., Bharath, P. R., Kumar, S., y Arun, K. (2014). Properties and performance of a mud gun mass (tap hole clay) with respect to the stable application of the product in blast furnaces. *Interceram-International Ceramic Review*, 63, 307-311.
- Kitamura, M. (2014). Optimising taphole clay technology. *Shinagawa Technical Report*, 57, 1-6.
- Kumar, R. S., Mohammed, R., y Rao, K. S. (2018). Experimental Study on Environment Friendly Tap Hole Clay for Blast Furnace. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 330, 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/330/1/012056>
- Laputka, M., y Xie, W. (2021). A review of recent advances in pyrometallurgical process measurement and modeling, and their applications to process improvement. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(2), 1135-1165.
- Leyva Mormul, A., Leyva Rodríguez, C. A., Leyva Ramírez, E., y Almenares Reyes, R. S. (2010). Un acercamiento al conocimiento de las características del cuarzo cubano y sus posibles aplicaciones industriales. *Ciencias Holguín*, vol 16. pp. 1-11.
- Miranda, R. R., Ferri, M. M., Olímpio, J. S., y Da Silva, I. A. (2014). Desenvolvimento de massas de tamponamento a base de material refratário e alumina para vedação de furos de corrida de fornos de redução (7133-7145). *Congresso anual da ABM, Pan American Materials Conference, São Paulo, SP, Brasil*. <https://doi.org/10.5151/1516-392x-24580>
- Morales, D., Morales, C., y Nunez, S. (2018). Tap-hole opening: advances and improvements. In *furnace tapping conference, SAIMM, Kruger National Park, South Africa* (p. 14).
- Nelson, L. R., y Hundermark, R. J. (2016). The tap-hole-key to furnace performance. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(5), 465-490. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n5a12>

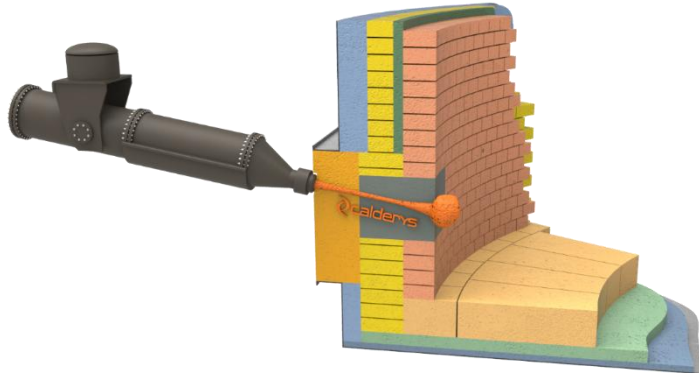
- Nelson, L.R. (2014). Evolution of the Mega-Scale in Ferro-Alloy Electric Furnace Smelting. In: Mackey, P.J., Grimsey, E.J., Jones, R.T., Brooks, G.A. (eds) Celebrating the Megascale. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48234-7_3
- Paul Wurth. (2000). INSTALLATION, OPERATING & MAINTENANCE MANUAL. TAPPING EQUIPMENT M-070, vol 1. pp. 122. Documento Interno Cerro Matoso S.A.
- Ribeiro, A. S. (2010). Análise sistêmica das massas de tamponamento para altos-fornos (tesis de maestría). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Samukawa, F., Ogura, K., Muroi, N., y Tanaka, S. (2000). Effect of SiO₂ Content of Mud on Its Bonding. *Taikabutsu Overseas*, 20(1), 36-39.
- Sako, E. Y., Galesi, D., Leão, C., Rodrigues, F., Souza, A., Roy, J., Kitamura, M., y Horiushi, T. (2018). High performance taphole clay: a key for blast furnace hearth protection and a tool for cost reduction. *Iron and Steel technology*, 82-87.
- Schneider, H., Schreuer, J., y Hildmann, B. (2008). Structure and properties of mullite—a review. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(2), 329-344.
- Sinha, S., Patranabish, T., Raisani, D., Bobde, B., Chakraborty, I., y Calderys India Refractories Ltd. (2020). Effect of slag parameters on tap hole clay performance.
- Steenkamp, J. D., y Reynolds, Q. G. (2022). Furnace tapping. *JOM*, 74(11), 3935-3936. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05467-x>
- World Steel Association. (2024). The steel story. World Steel Association. <https://worldsteel.org/about-steel/steel-story/>
- Zevgolis, E. N., y Daskalakis, K. A. (2022). The nickel production methods from laterites and the Greek ferronickel production among them. *Materials Proceedings*, 5(1), 104. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005104>

Apéndices

Apéndice A. Representación gráfica de la formación del hongo dentro del horno de fundición.

Figura 15

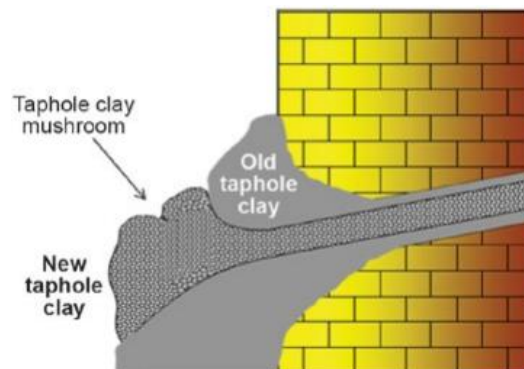
Representación gráfica de la inyección de masa dentro del horno



Nota. El gráfico representa la inyección de la masa dentro de la piqueta mediante la taponadora de metal. Adaptado de *Tap-Hole*, por *Calderys* (s.f.)

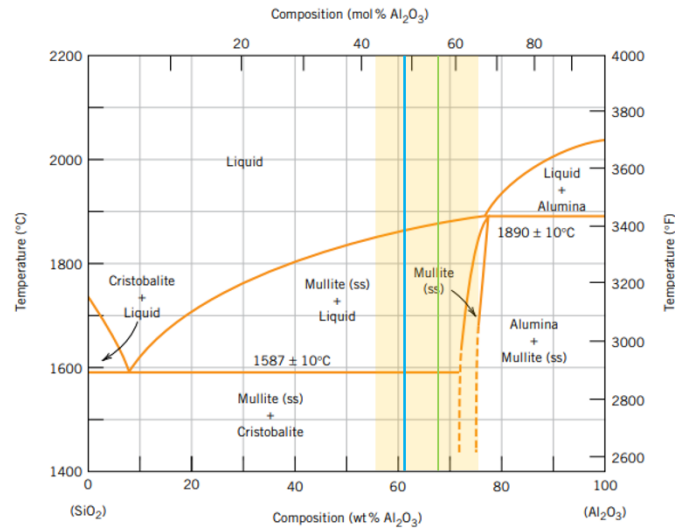
Figura 16

Representación gráfica de la formación del hongo dentro del horno de fundición



Nota. El gráfico representa la formación del hongo dentro del horno de fundición luego de la inyección de masa taponadora. Adaptado de *High-Performance Taphole Clay: A Key for Blast Furnace* (p.82), por *Sako et al., 2018, Iron and Steel Technology*.

Apéndice B. Diagrama de fases SiO₂-Al₂O₃



Nota. El gráfico representa el diagrama de fases del sistema SiO₂-Al₂O₃. Porcentaje correspondiente al rango de 25-45% en peso de Al₂O₃ (zona anaranjada), composición de Al₂O₃ masa tipo A (línea verde), composición de Al₂O₃ masa tipo B (línea azul). Adaptado de *Materials Science and Engineering: An Introduction* (p.490), por Callister y Rethwisch 2013, Wiley.

Apéndice C. Masa remanente con una carga habitual de arcilla.

Figura 17

Masa remanente de la taponadora con una carga habitual de arcilla de los operadores



Figura 18

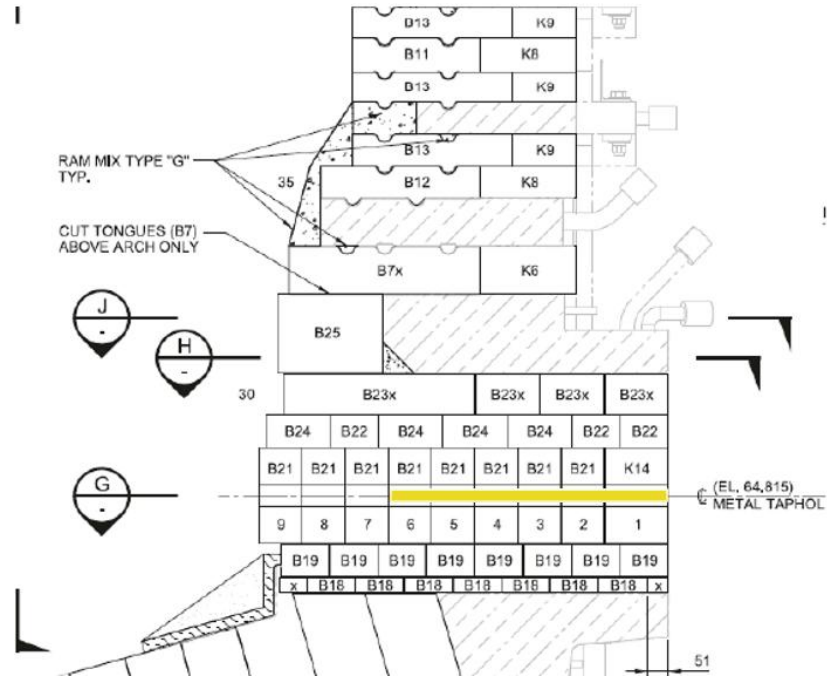
Fuga de masa entre la piquera y la cara de la boquilla de la taponadora



Apéndice D. Plano de la estructura de la pared del horno en la zona de la piquera de metal

Figura 19

Zona longitudinal de la pared del horno en el área de la piquera de metal



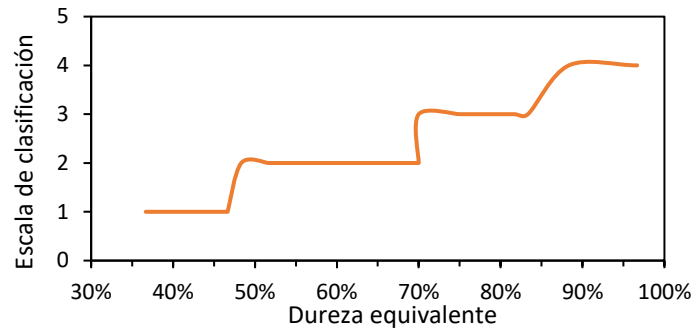
Nota. La figura representa la zona longitudinal del horno donde se puede visualizar los bloques que componen la piquera de metal. La zona en amarillo representa el área de entrada donde la masa taponadora debe sellar el orificio. Adaptado de *General Arrangement: Electric Furnace. Sections*, por CMSA, 2010.

Apéndice E. Análisis What If

ANEXO 11 - FORMATO WHAT IF / CHECKLIST (QUE PASA SI / LISTA DE CHEQUEO)			
¿Que Pasa Si? (Descripción del Riesgo/Evento)	Consecuencias	Controles Existentes	Acciones Correctivas o de mejoramiento requeridas
1. El flujo de metal es muy fuerte y la carga no es suficiente para tapar	<ul style="list-style-type: none"> - Run Out de metal - Exposición del personal. - Daño de equipos. - Parada de planta no programada por reparación de equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza la segunda taponadora disponible cargada con 14 panelas. - Uso de taponadora manual pinocho en caso tal que las dos taponadoras fallen. - Asegurar carga de pasta taponadora en la carretilla o mesa móvil, y suficientes bloques de arcilla cerca de las canales de metal, para utilizarlas en caso de emergencia. - Se activa el PON. - Entrenamiento de operadores mediante simulacros ante este tipo de emergencia. - El Supervisor del Homo y/u Operador de Cuarto de Control Central (C.C.C.) del horno, comunica por radio o por teléfono a los operadores de la otra línea, la alerta de falla de la primera tapada, para anticipar labores de apoyo en caso de que se presente la emergencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicar a la brigada la ejecución de la actividad para que estén preparados - Presencia de supervisor de turno para vigilar la operación y activar respuesta ante emergencia.
2. Filtración de metal por el agujero de colada luego de la tapada	<ul style="list-style-type: none"> - Run Out de metal - Exposición del personal. - Daño de equipos. - Parada de planta no programada por reparación de equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar carga en ambas taponadoras, una con 12 panelas y otra con 14 panelas. - Se utiliza la primera taponadora disponible. - Uso de taponadora manual pinocho en caso tal que las dos taponadoras fallen. - Asegurar carga de pasta taponadora en la carretilla o mesa móvil, y suficientes bloques de arcilla cerca de las canales de metal, para utilizarlas en caso de emergencia. - Se activa el PON. - Entrenamiento de operadores con simulacros ante este tipo de emergencia. - Entrenamiento de operadores mediante simulacros ante este tipo de emergencia. - El Supervisor del Homo y/u Operador de Cuarto de Control Central (C.C.C.) del horno, comunica por radio o por teléfono a los operadores de la otra línea, la alerta de falla de la primera tapada, para anticipar labores de apoyo en caso de que se presente la emergencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicar a la brigada la ejecución de la actividad para que estén preparados - Presencia de supervisor de turno para vigilar la operación y activar respuesta ante emergencia.
3. El taladro de la siguiente colada es corto (<20 cm)	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de Run Out de metal - Exposición del personal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Suspensión de prueba con procedimiento de carga de pasta taponadora de 12 panelas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se establece prueba con carga de pasta taponadora con 13 panelas. - Se establece procedimiento con carga de pasta taponadora con 14 panelas.

Apéndice F. Límites establecidos de dureza**Figura 20**

Escala de clasificación con relación a la dureza equivalente



Nota. El gráfico muestra la dureza equivalente de cada masa y la escala de clasificación respecto a la facilidad de extrusión.

Para definir los límites de trabajabilidad que garanticen una extrusión eficiente, se realizó un acompañamiento en el cual los operadores responsables de cargar la masa en la taponadora evaluaron su percepción frente a la dureza de cada masa y la facilidad que sentían al compactarla dentro de la taponadora.

Los resultados representados en la Figura 20, se clasificaron en una escala de 1 a 4, en la que 1 corresponde a una masa muy blanda, 2 a blanda, 3 a trabajable y 4 a dura. De esta clasificación se determinó que, si la dureza supera la clasificación 4, se debe descartar para evitar alguna complicación durante el sellado. Si la dureza es inferior a 1, la masa se debe retirar de su empaque para que logre alcanzar un nivel de dureza que este dentro del rango óptimo. Esto permite mejorar la inyección de la masa y evita que una textura muy blanda dificulte la extrusión o cause una fuga más fácilmente entre la boquilla y la cara de la piquera.