

Universidad Autónoma del Estado de México

FACULTAD DE QUÍMICA



SELECCIÓN DE UN ALQUITRÁN COMO AGLUTINANTE PARA LA FABRICACIÓN DE UN TAPÓN REFRACTARIO



TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

C. DAVID GUSTAVO ORTEGA PEREA

ASESOR ACADEMICO:

M. EN C. Q. EDUARDO MARTÍN DEL CAMPO LOPÉZ

ASESOR EXTERNO:

ING. JOSÉ LUIS PERÉZ SÁNCHEZ

FECHA: 10 DE FEBRERO DE 2021

ÍNDICE

ÍNDICE	2
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE DIAGRAMAS	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE GRÁFICOS	6
RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	11
1.1 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INDUSTRIA DEL ACERO EN MÉXICO	12
1.2 EL TRATAMIENTO DE HIERRO PARA LA PRODUCCIÓN DE ACERO	13
1.2.1 Extracción	14
1.2.2 Trituración	14
1.2.3 Concentración	14
1.2.4 Peletización	15
1.2.5 Horno de arco eléctrico/Alto Horno	15
1.2.5.1 Horno de Arco eléctrico	15
1.2.5.2 Alto Horno	15
1.2.6 Aceración	16
1.2.7 Colada continua	16
1.2.8 Laminación	16
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE HIERRO A TRAVÉS DE ALTO HORNO	17
1.3.1 Principales reacciones químicas involucradas en el proceso de producción de hierro a través de Alto Horno.	18
1.3.2 El piso de colada y el Tapón Refractario	19
1.4 EL TAPÓN REFRACTARIO	23
1.4.1 Principales funciones y características del Tapón Refractario	23
1.4.1.1 Mantenimiento de las condiciones operativas del Alto Horno.	23
1.4.1.2 Gestión del área de piqueta	24
1.4.1.3 Aspectos ambientales	24
1.4.1.4 Aspectos económicos	24
1.4.1.5 Tiempo de vida del Alto Horno	24

1.4.2	Diseño del tapón refractario	25
1.4.2.1	Presión de extrusión	26
1.4.2.2	Tapado	26
1.4.2.3	Protección a las paredes internas de la piquera y del Alto Horno	26
1.4.2.2	Granos y aditivos	27
1.4.3	Materiales aglutinantes del Tapón Refractario	28
1.4.3.1	Alquitrán de Hulla	29
1.4.3.2	Resinas Fenólicas	29
1.5	PRODUCCIÓN DEL TAPÓN REFRACTARIO DE LA EMPRESA CINASA	31
1.5.1	Carga de materias primas	32
1.5.2	Mezclados (seco y húmedo)	32
1.5.3	Extrusión	32
1.6	LIBERACIÓN DEL TAPÓN EN LA EMPRESA CINASA	34
1.6.1.	Valor Marshall	34
1.6.2.	Datos obtenidos de Barras	35
1.7	PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN DEL TAPÓN REFRACTARIO EN EL ALTO HORNO DE LA EMPRESA “A”	36
1.7.1	Longitud de piquera	36
1.7.2	Tiempo de colada	36
1.7.3	Número de coladas por día	37
1.7.4	Rendimiento/Consumo de tapón	38
2.0	JUSTIFICACIÓN	39
2.1	OBJETIVOS	42
2.1.1	OBJETIVO GENERAL	42
2.1.2	OBJETIVOS PARTICULARES	42
3.0	METODOLOGÍA	43
3.1	ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DEL ALQUITRÁN	44
3.2	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MEZCLA SECA	44
3.3	ANÁLISIS DEL MEZCLADO Y CONSISTENCIA FINAL	46
3.4	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS BARRAS SEGÚN LAS ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA CINASA	46
3.4.1	Cambio Lineal Permanente en Barras	46
3.4.2	Densidad Aparente y Porosidad Aparente en Barras	47
3.4.3	Volátiles (P.P.I.) y Carbón Fijo (C.F.)	48

3.4.4 Módulo de Ruptura (M.O.R.) en Barras	49
3.4.4 Cálculo del Valor Marshall	50
3.5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PASTILLAS SEGÚN LAS ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA AMERICANA, “B”	51
3.5.1 Cambio Diámetro Permanente en Pastillas	51
3.5.2 Densidad Aparente y Porosidad en Pastillas	51
3.5.3 Cambio Volumétrico en Pastillas	51
3.5.4 Volátiles (P.P.I.) en Pastillas	52
3.5.5 Resistencia a la Compresión (C.C.S.) en Pastillas	52
4.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1 ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DEL ALQUITRÁN	55
4.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MEZCLA SECA	58
4.3 ANÁLISIS DEL MEZCLADO Y CONSISTENCIA FINAL	60
4.4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS BARRAS CONTRA ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA CINASA.	61
4.4.1 Densidad Aparente y Porosidad Aparente en Barras	63
4.4.2 Cambio Lineal Permanente en Barras	65
4.4.3 Volátiles (P.P.I.) y Porcentaje de Carbón Fijo (C.F.)	65
4.4.4 Módulo de Ruptura (M.O.R.) en Barras	67
4.4.5 Valor Marshall	68
4.5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PASTILLAS CONTRA ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA “B”.	69
4.6.1 Densidad Aparente y Porosidad Aparente en Pastillas	71
4.6.2 Cambio Diámetro Permanente en Pastillas	72
4.6.2 Cambio Volumétrico en Pastillas	73
4.5.3 Volátiles (P.P.I.) en Pastillas	74
4.5.4 Resistencia a la Compresión (C.C.S.) en Pastillas	74
5 CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS	79

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Planta típica de un Alto Horno (Tecnoalex, sin fecha).
- Figura 2. Taladro neumático perforando Tapón Refractario en una piqueta (Tapping Measuring Technology, 2018).
- Figura 3. Inyección de tapón y formación de hongo (Geyer, P., y Halifa, Z., 2013).
- Figura 4. Canal para conducción de Arrabio y Escoria (Saint – Gobain, sin fecha).
- Figura 5. Desnatador de Escoria (Comsol, 2021).
- Figura 6. Carro termo (INFOACERO, sin fecha).
- Figura 7. Desempeño del tapón dentro del Alto Horno (Sako E., Galesi, D., Leao, C., Rodrigues, F., Souza, A., Roy, J., Kitamura, M., y Horiushi, T., 2018).
- Figura 8. Proceso de extrusión del tapón refractario de la empresa CINASA (Elaboración propia).
- Figura 9. Cilindro para determinación del Valor Marshall (Elaboración Propia).
- Figura 10. Prensa Tinius Olsen (Frank Bacon Machinery Sales, 2015).
- Figura 11. Longitud de piqueta en un Alto Horno (Calderys, 2021).
- Figura 12. Colada del Alto Horno de la empresa “A” (Elaboración propia).
- Figura 13. Tamizador Ro-Tap (CROMTEX, sin fecha).
- Figura 14. Toma de Peso Suspendido. (Elaboración propia).
- Figura 15. Prueba de M.O.R. (Elaboración propia).
- Figura 16 Prueba de C.C.S. (Elaboración propia).
- Figura 17. Fluidez y consistencia de los Alquitrans al día de prueba (Elaboración propia).
- Figura 18. Consistencia de Alquitrans tras una semana del día de prueba (Elaboración propia).
- Figura 19. Consistencia de las mezclas tapón (Elaboración Propia).

LISTA DE DIAGRAMAS

- Diagrama 1. Flujo de proceso de producción del tapón refractario de la empresa CINASA (Elaboración Propia).

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Características físicas del Alquitrán Nacional.
- Tabla 2. Características físicas del Alquitrán Americano.
- Tabla 3. Compuestos típicos del tapón MU-410.
- Tabla 4. Pruebas granulométricas del tapón seco para la prueba con Alquitrán Nacional.
- Tabla 5. Pruebas granulométricas del tapón seco para la prueba con Alquitrán Americano.
- Tabla 6. Pruebas granulométricas promedio del tapón seco para pruebas con alquitranes Americano y Nacional.
- Tabla 7. Datos de Barras del Alquitrán Nacional.
- Tabla 8. Datos de Barras del Alquitrán Americano.
- Tabla 9. Valores Marshall de Tapón con Alquitranes Americano y Nacional.
- Tabla 10. Datos de Pastillas del Alquitrán Nacional.
- Tabla 11. Datos de Pastillas del Alquitrán Americano.

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1. Comparación de las granulometrías retenidas sobre malla y acumuladas.
- Gráfico 2. Densidad Aparente en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 3. Porosidad Aparente en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 4. Cambio Lineal Permanente en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 5. Volátiles (P.P.I.) en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 6. Carbón Fijo en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 7. Módulo de Ruptura en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 8. Densidad Aparente en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 9. Porosidad Aparente en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 10. Cambio Diámetro Permanente en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 11. Cambio Volumétrico en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

- Gráfico 12. Volátiles (P.P.I.) en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.
- Gráfico 13. Resistencia a la Compresión en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

RESUMEN

Compañía Nacional de Abrasivos S.A. de C.V (CINASA), empresa mexicana dedicada a la venta de productos abrasivos y refractarios para la industria, dentro de la división de refractarios fabrica el Tapón MU-410. Este producto es usado para las coladas de acero fundido en el proceso de Alto Horno, representando un alto nivel de ingresos económicos para CINASA. Las empresas acereras exigen altos estándares de calidad para el uso del tapón en su proceso. Una de las más grandes empresas productoras de acero de primera fusión en México, a la cual se denominará de ahora en adelante empresa “A”, es la consumidora del Tapón MU-410. CINASA asegura un buen funcionamiento de su material a partir de valores físicos obtenidos de barras del material en cuestión, relacionados con los parámetros de desempeño requeridos por la empresa “A”.

El presente trabajo contiene en el capítulo 1, en primer plano, un concepto general donde se abordan los temas de: La importancia del acero y de la industria acerera en México y su sociedad; los diferentes procesos de obtención de hierro, haciendo énfasis en el proceso de Alto Horno y las principales reacciones químicas implicadas; el método de colada en el Alto Horno y los procesos posteriores de purificación y conformación de productos terminados de acero. Y, como segundo plano, se aborda un enfoque particular al Tapón Refractario, donde se observa: Su función en el piso de colada; las propiedades físicas requeridas para un buen desempeño; las materias primas típicas utilizadas, enfatizando en los aglutinantes químicos, especialmente el Alquitrán de Hulla; se repasará de manera general el método de producción del Tapón MU-410 de CINASA y los métodos de evaluación de desempeño del Alto Horno de la empresa “A”.

En el capítulo 2 se muestra la justificación del trabajo, y el planteamiento de los objetivos, los cuales consisten en seleccionar de entre dos tipos de alquitranes (de origen Americano y Nacional), el adecuado para la fabricación del Tapón MU-410, a partir de los parámetros físicos de aceptación de CINASA. Además, con el objetivo de realizar exportaciones de este material, se revisa la posibilidad de fabricar un tapón, con alguno de estos alquitranes, que cumpla con los parámetros físicos de aceptación de una empresa americana, a la cual se denominará empresa “B”.

En el capítulo 3 se muestra la metodología utilizada para la evaluación de los dos tipos de alquitrán, y su forma de aplicación de acuerdo con las normas ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). En estos apartados se presentan las fórmulas típicas utilizadas para los cálculos de las propiedades físicas en barras, para el caso de los parámetros CINASA, y en pastillas para el caso de la empresa “B”. También se explican los métodos cualitativos por medio de los cuales se analiza el alquitrán en CINASA.

En el capítulo 4 se presentan primero los resultados cualitativos de las mezclas de tapón de acuerdo con parámetros visuales y táctiles; también se analizan los resultados comparativos, a través de histogramas, de tres barras o pastillas testigos elaboradas con cada tipo de alquitrán, su promedio y su condición con respecto a los parámetros solicitados. En cada parte de la discusión de resultados, se relacionan los resultados con el impacto en los parámetros del Alto Horno en los que están implicados.

Finalmente, el capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo, donde se determinan: el tipo de alquitrán seleccionado para la elaboración del Tapón MU-410 de la empresa CINASA, y la aptitud de estos para fabricar un tipo de tapón para exportación.

INTRODUCCIÓN

Un tapón (también llamado arcilla o barro) refractario sirve como desagüe para el metal caliente producido en el Alto Horno. Estos materiales son usados para el taponamiento de las piqueras del Alto Horno. Su objetivo principal no solo es el taponamiento, sino también el poder ser perforado para la colada del arrabio. Un cañón de lodos empuja el tapón dentro de la piqueta, donde este se endurece y previene la salida del metal caliente y la escoria **(Smruti, D., 2009)**.

Cada empresa acerera tiene sus propios criterios de aceptación para el uso de determinado tipo de tapón en su Alto Horno. Normalmente estos criterios se basan en tiempos de colada, longitudes de piqueta, números de colada y consumo de tapón por día (rendimiento). A su vez, estos parámetros son relacionados con pruebas físicas realizadas por el proveedor de tapón, las cuales garantizan el cumplimiento de estos.

La calidad y funcionamiento del tapón dependen de las materias primas utilizadas para su producción, especialmente del aglutinante utilizado, el cual, en el caso de CINASA, es el Alquitrán de Hulla. La importancia de esta materia prima está dada en dos características que aporta a la mezcla final del tapón: La primera es la plasticidad del material, y la segunda y primordial, la formación de la liga carbonífera. Esta última característica es la que proveerá la resistencia a la abrasión y erosión del metal fundido y la escoria provenientes del Alto Horno, lo que garantizará tiempos de colada y longitudes de piqueta altos, así como bajos consumos de tapón (mayor rendimiento), asegurando la seguridad en los pisos de colada, producción regular del metal fundido y la elongación del tiempo de vida del Alto Horno.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INDUSTRIA DEL ACERO EN MÉXICO

Durante el año 2018, México ocupó el puesto número 14 a nivel mundial en la producción de acero, con un volumen alrededor de las 20.2 millones de toneladas, siendo China el principal productor a nivel mundial con un volumen de 924.3 millones de toneladas, un margen muy grande con respecto al segundo lugar, India, quien produjo alrededor de 109.3 millones de toneladas. En el panorama continental, la producción conjunta de los países latinoamericanos en 2019 fue de 61.6 millones de toneladas, 5.4% mayor a lo producido en el 2018, dejando a México como el segundo lugar de la región, con una participación del 32% de dicha producción (**Asociación Latinoamericana del Acero, 2019**). La importancia del acero en México se da debido a su impacto en los sectores económico y social, ya que 2.1% del PIB nacional, 7.1% del PIB industrial y 13.1% del PIB manufacturero provienen de su actividad productiva. Aunado a esto, la elaboración de acero es la primera gran consumidora de gas natural y la tercera en el consumo de electricidad para el sector industrial, dando empleo de forma directa e indirecta a 672 mil personas (**Cámara Nacional del Acero, 2019**). El acero mexicano, en materia ecológica es de los procesos más responsables a nivel mundial, ya que 95% de los residuos, clasificados como minero-metalúrgicos, tienen una eficiencia de materiales convertidos en productos y subproductos del 90%. La generación de residuos peligrosos es mínima, y representa el 0.2%. El consumo principal de agua en el proceso es para enfriamiento, lo cual facilita su reciclaje, 27% del agua utilizada proviene de aguas residuales tratadas, además, el consumo de agua en la producción de acero mexicano, 5.2 m³/Ton, es mucho menor al promedio mundial, 28.4 m³/Ton. Es importante mencionar también que las emisiones de CO₂ en el acero mexicano, 1.34 Ton CO₂/Ton acero crudo, están 29.5% por debajo del nivel mundial, 1.9 Ton CO₂/Ton acero crudo (**Cámara Nacional del Acero, 2019**).

El acero es una aleación de hierro y carbón, conteniendo este último en cantidades menores al 2%, además de valores típicos en 1% de manganeso y pequeñas porciones de silicio, fósforo, azufre y oxígeno. Es el material más importante en cuanto a ingeniería y construcción se refiere. Es utilizado en cada aspecto de nuestras vidas; en carros y productos para la construcción, refrigeradores y lavadoras, barcos de carga y escalpelos para cirugía. El

acero se produce a través de dos rutas principales: El Alto Horno (AH) - Acería de Oxígeno Básico (BOF) y el Horno de Arco Eléctrico (HAE), existiendo variaciones y combinaciones de las rutas de producción. La diferencia entre estas rutas se da en el tipo de materias primas que cada una consume. Para la ruta de AH - BOF estas materias son principalmente mineral de hierro, coque, y hierro reciclado, mientras que en el HAE lo principalmente usado es acero reciclado y electricidad. Dependiendo de la configuración de la planta y la viabilidad del acero reciclado, otras fuentes de hierro metálico como la Reducción Directa (RD) o el metal caliente pueden ser utilizados en el HAE. Otro proceso de obtención de acero es el Horno a Corazón Abierto (HCA) **(World Steel Association, 2020)**.

Un total del 70.7% del acero es producido por el método AH-BOF. Primero el mineral de hierro es reducido a hierro, que es mejor conocido como hierro sucio (arrabio). Este hierro sucio es convertido en acero en el BOF. Después de ser colado y laminado, el hierro se provee en forma de bobinas, placas, secciones o barras. El acero elaborado en el HAC utiliza electricidad para fundir el metal reciclado. Aditivos, así como algunas aleaciones, son utilizados para ajustar la composición química requerida. La energía eléctrica puede ser complementada con oxígeno inyectado en el HAC. Las etapas posteriores del proceso, como la fundición, el recalentamiento y laminación son similares a las que se encuentran en la ruta AH-BOF. Aproximadamente 28.9% del acero es producido por esta vía. El HCA tiene un valor típico del 0.4% de la producción global. Este proceso utiliza demasiada energía y está en declive debido a sus desventajas económicas y ambientales **(World Steel Association, 2020)**.

1.2 EL TRATAMIENTO DE HIERRO PARA LA PRODUCCIÓN DE ACERO

El hierro es el metal pesado más extenso y abundante en la superficie de la tierra. Debido a la facilidad con la cual reacciona, es raro encontrarlo en forma de hierro puro. Debido a su afinidad por el oxígeno, el hierro se encuentra en la naturaleza en forma de minerales, compuestos principalmente por óxidos. De estos minerales, los más usados por la industria para la extracción de este metal son: hematita, limonita, magnetita y siderita. La hematita es un óxido de hierro (Fe_2O_3) el cual, cuando es puro contiene un 70% de hierro, sin embargo,

varía generalmente entre el 40 y 60%. La limonita $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ es otro óxido, pero contiene cantidades variables de agua y se deriva de la alteración de otros minerales ferrosos; su contenido de metal varía a partir de un depósito a otro, pero no sobrepasa generalmente el 50%. Químicamente, la magnetita es un óxido (Fe_3O_4) es el mineral que contiene la mayor cantidad de hierro, en su forma pura contiene 72.4%. La siderita es un carbonato (FeCO_3) que en su estado puro contiene el 48.3% de hierro, pero es raramente usada en la producción de hierro y de acero. Para extraer el hierro metálico de estos minerales, es necesario separar el oxígeno que se encuentra combinado con el hierro, así como la parte principal de las impurezas que están presentes en el material (**Secretaría de Economía, 2018**).

El proceso de obtención de acero a través de hierro se describe a continuación (**Secretaría de Economía, 2018**):

1.2.1 Extracción

A través del minado a cielo abierto se barrenan puntos seleccionados para colocar los explosivos, y se realiza el tumbe por medio de voladuras. La carga se realiza después por medio de trascabos, y el llenado, a través de palas mecánicas.

1.2.2 Trituración

Se reduce el tamaño del mineral de hierro de trozos de un tamaño aproximado de 40 pulgadas (diámetro), a un tamaño máximo de 8 pulgadas, obteniendo un porcentaje de entre 25% a 55% de hierro. En la trituración secundaria el tamaño se reduce hasta un máximo de 2.5 pulgadas, obteniendo un porcentaje de entre el 35% al 45% de hierro. Finalmente, en la trituración terciaria el tamaño máximo de las partículas será de $\frac{3}{4}$ de pulgada, con un porcentaje del 36% al 40% de hierro.

1.2.3 Concentración

Se eliminan los estériles y se obtiene un mineral con 66% en contenido de hierro. El proceso es a través de vía húmeda, obteniéndose al final del proceso un concentrado en forma de lodos. Primero se realiza una molienda a malla -16 con un molino de barras, posteriormente hay una separación magnética primaria de los estériles; después se realiza una segunda molienda a malla -325 con un molino de bolas; en el siguiente paso ocurre una separación

secundaria para continuar con la eliminación de estériles; al final se realiza un lavado por medio de tanques agitadores para homogeneizar la pulpa de mineral de hierro y bombearla a través de un ferro-conducto a la planta peletizadora.

1.2.4 Peletización

El lodo ferroso formará junto con otros materiales tales como la escoria del Alto Horno y de aceración, escamas de los laminadores y caliza, los llamados pellets, que son esferas de 1cm de diámetro que después se constituyen en el compuesto que requiere el sistema de alimentación al Alto Horno. Los pellets se forman a través del concentrado húmedo por medio del efecto de rodamiento en grandes discos llamados “de boleó”. De ahí son enviados a un horno en donde se cuecen hasta obtener la dureza necesaria para su transporte hacia el Alto Horno o bien, hacia el horno de Arco Eléctrico.

1.2.5 Horno de arco eléctrico/Alto Horno

El proceso de extracción de arrabio (hierro sucio) se lleva a cabo de dos maneras:

1.2.5.1 Horno de Arco eléctrico

El horno se carga con chatarra de acero cuidadosamente seleccionada o con hierro proveniente del proceso de reducción directa. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos gigantes produce un calor intenso que funde a 1,650°C. Cuando la carga es derretida totalmente, se agregan al horno los elementos de aleación requeridos.

1.2.5.2 Alto Horno

La carga del horno está formada por pellets, combustible en forma de coque y caliza, cuya función es ayudar a que el hierro se funda en el interior del horno y como escorificante para eliminar impurezas mediante una nata llamada escoria, que flota en la superficie del metal líquido. El mineral de hierro, la caliza y el coque se introducen por la parte superior del Alto Horno, al cual se le inyecta aire caliente a 1,100°C utilizando ductos llamados toberas en la parte inferior del horno y al combinarse carbono y oxígeno se obtienen temperaturas de hasta 2,200°C. En las condiciones antes descritas, de los pellets emana arrabio y escoria que se depositan en el crisol (parte inferior del horno), los cuales se separan por medio de ductos llamados piqueras. Se extrae el arrabio a través de orificios en la parte inferior del horno y se

vacía a carros termo que lo transportan a la planta de aceración para eliminar impurezas y transformarlo en acero.

1.2.6 Aceración

El arrabio se convierte en acero mediante la eliminación por inyección de oxígeno a altas presiones de un gran número de impurezas que contiene, tales como silicio, fósforo y azufre. Durante el insuflado de oxígeno se agregan cal y fluorita por la boca del convertidor, que como en el caso del Alto Horno, actúan como escorificantes eliminando impurezas. Terminado el insuflado de oxígeno y comprobada la composición química deseada, el acero es vaciado del convertidor a las ollas de transferencia de acero, en donde se adicionan otros elementos que confieren la composición química final según el tipo de acero deseado.

1.2.7 Colada continua

El acero líquido es pasado por máquinas de colada continua donde se transforma en una barra sólida llamada palanquilla. Esto se logra mediante el vaciado de acero en un molde de cobre de sección cuadrada enfriada por agua, del que se extrae por un extremo opuesto la barra recientemente solidificada. La barra solidificada, aunque al rojo vivo, es cortada a la longitud que se desea. La palanquilla, finalmente, se transporta sobre mesas de almacenamiento, de donde se lleva por medio de electroimanes a los hornos de recalentamiento para el proceso de laminado, sucediendo de manera similar para el caso del planchón.

1.2.8 Laminación

El acero se deforma plásticamente, haciéndolo pasar a través de rodillos, que giran a velocidades cada vez mayores y reducen la sección transversal. De esta forma el producto semiacabado es reducido paulatinamente hasta la obtención de alambrón, barras, perfiles, varilla corrugada y planchón.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE HIERRO A TRAVÉS DE ALTO HORNO

En la actualidad, los altos hornos modernos varían en tamaño de 20 a 35 m de altura y de 6 a 14 m de diámetro y pueden producir de 1,000 a casi 10,000 toneladas de arrabio diariamente (**Encyclopaedia Britannica, 2019**).

Como se mencionó anteriormente, existen tres tipos de materiales, los cuales son cargados a un Alto Horno: Materiales con contenido de hierro, coque y fundentes (piedra caliza y/o dolomita). Una vez que los materiales han sido cargados, una ráfaga de aire caliente, y en algunas instancias, combustible (gas, aceite o carbón en polvo) son introducidos en la parte inferior. La corriente de aire caliente quema parte del combustible para producir calor, el cual favorecerá a las reacciones químicas involucradas en el proceso, además de que ayudará a la fundición del hierro, todo esto mientras que el equilibrio del combustible y parte del gas de la combustión elimina el oxígeno del mineral de hierro (**United States Steel, 1971**).

La figura 1 representa una planta típica de Alto Horno. Las materias primas son elevadas a la parte superior del horno por medio de un carro elevador (skip car). Las principales partes del horno son el tragante de materias primas (hopper), el distribuidor (revolving distributor) y las campanas (bells), estas últimas se abren para permitir la entrada de los materiales al horno, y posteriormente se cierran para sellar, de tal forma que los gases provenientes del proceso no entran en contacto con el medio ambiente. La parte superior del horno donde la carga es precalentada y pre-reducida es llamada cuba (stack), la sección que conecta la cuba con los etalajes (bosh) es el vientre (belly), donde comienza la fundición del hierro, y la parte más baja donde el hierro fundido y la escoria son recolectados es el crisol (hearth). Los gases se desalojan por la parte superior del horno a través de las chimeneas (uptakes), y son conducidos a los colectores de polvos (dust catcher), y a los sistemas de limpieza (cleaning system). El gas limpio es quemado en las estufas (stoves) para precalentar las nuevas corrientes de aire de entrada, las cuales son conducidas por la línea de soplo caliente (hot-blast line) hacia una tubería que rodea el horno, conocida coloquialmente como “dona” (bustle pipe). El aire entra al horno a través de las toberas (tuyeres), que se encuentran conectadas a la dona (**United States Steel, 1971**).

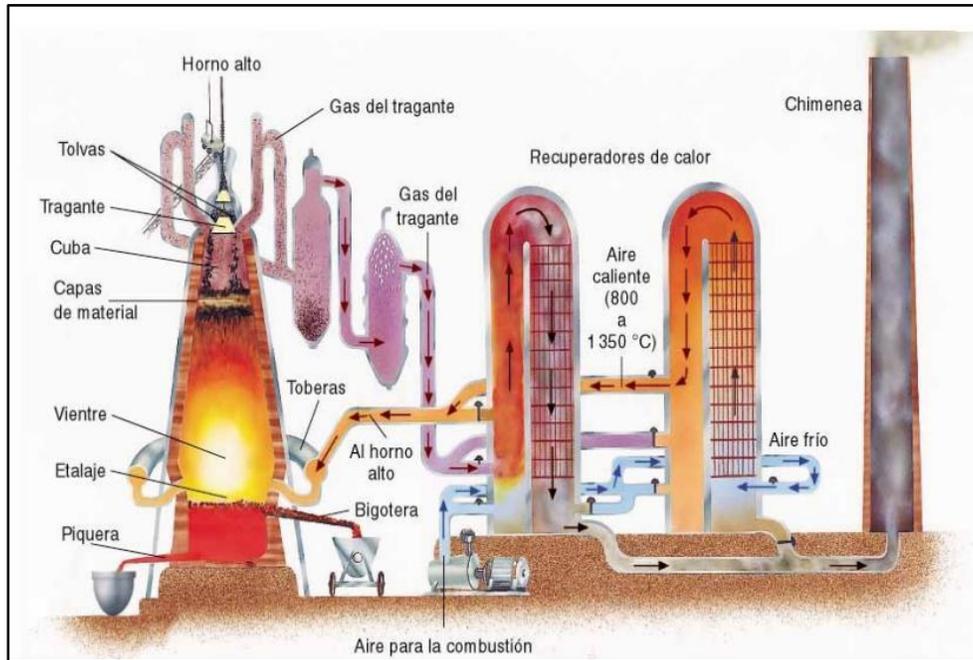
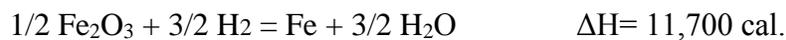
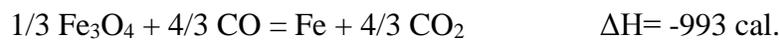
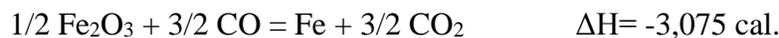


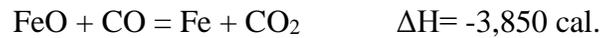
Figura 1. Planta típica de un Alto Horno (Tecnoalex, sin fecha).

1.3.1 Principales reacciones químicas involucradas en el proceso de producción de hierro a través de Alto Horno.

En la parte superior del horno, donde la temperatura es inferior a 1700°F (930°C), los gases que ascienden comienzan a reducir a los óxidos de hierro. A esas temperaturas, el equilibrio químico previene todo el CO y H₂ de ser usados. Consecuentemente, la cantidad de CO o de H₂ debe ser mayor (aproximadamente el triple) que la cantidad mostrada por las siguientes ecuaciones estequiométricas (**United States Steel, 1971**):



Consecuentemente, se puede representar la reacción de reducción de la manera siguiente, sin importar si el agente reductor es H₂ o CO:



1.3.2 El piso de colada y el Tapón Refractario

Dado que el arrabio es más pesado que la escoria, permanece en el fondo del crisol y es colado o removido de 4 a 10 veces al día a través una tubería conocida como piquera. Esta tubería es obstruida completamente por una arcilla (Tapón Refractario). El método usual para colar el arrabio es perforar el tapón con un taladro neumático, figura 2, el cual llega a una zona donde se ha formado un “hongo” (skull) del mismo material refractario, figura 3. El acero fluye hasta el canal principal, figura 4, el cual posee un desnatador (skimmer) Figura 5. El desnatador separa cualquier escoria que esté fluyendo con el arrabio, por diferencia de densidades, y la desvía hacia el canal de escoria o hacia el pozo de escoria seca (**United States Steel, 1971**). El arrabio continúa fluyendo por el canal principal desde el cual se desvía a intervalos hacia los distribuidores, estos transfieren el arrabio a carros termo, figura 6, los cuales transportan el material para los posteriores procesos de acería, donde es purificado.



Figura 2. Taladro neumático perforando Tapón Refractario en una piqueta (Tapping Measuring Technology, 2018).

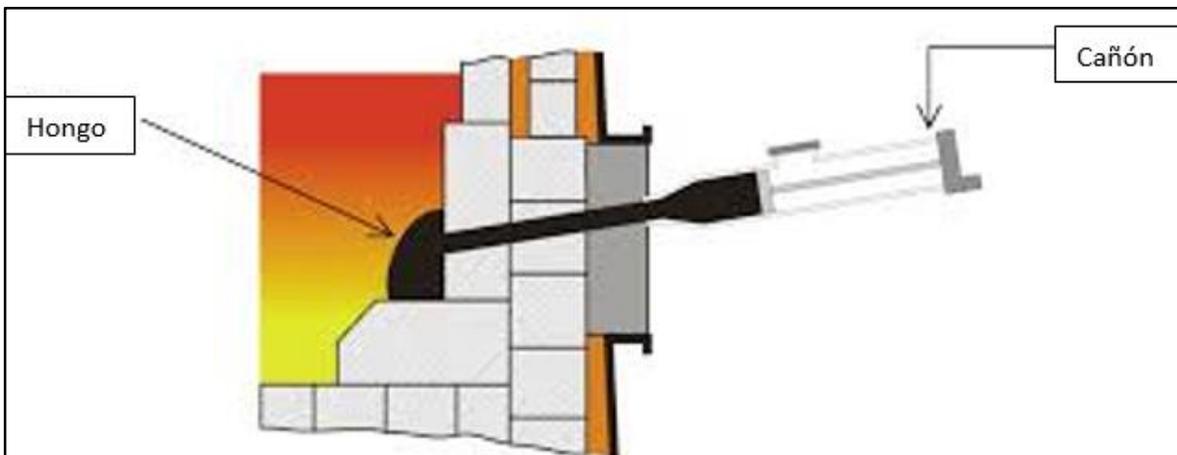


Figura 3. Inyección de tapón y formación de hongo (Geyer, P., y Halifa, Z., 2014).



Figura 4. Canal para conducción de Arrabio y Escoria (Saint-Gobain, sin fecha).

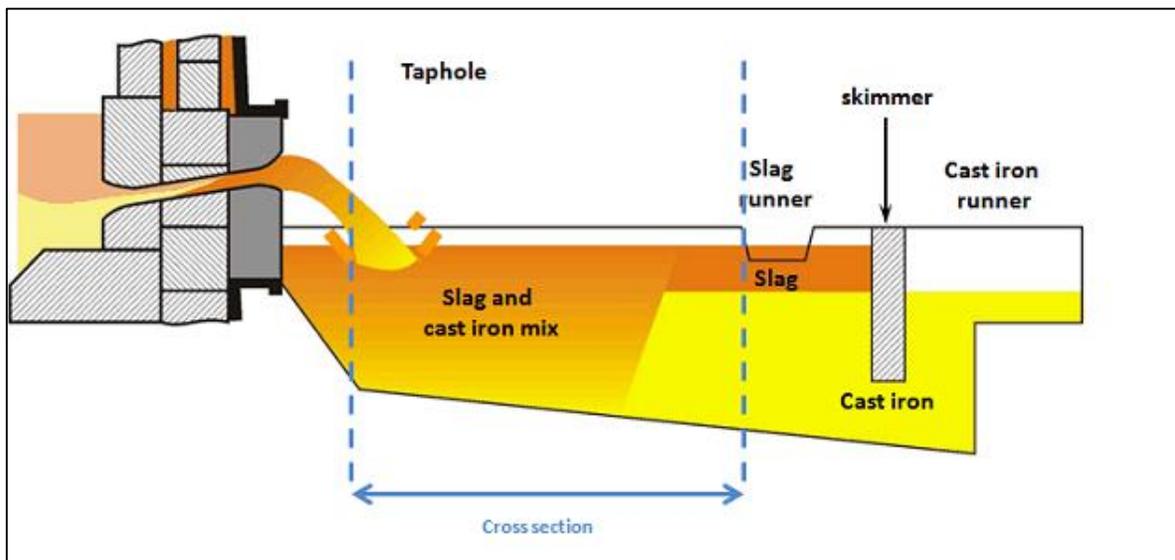


Figura 5. Desnatador de Escoria (Comsol, 2021).



Figura 6. Carro termo (INFOACERO, sin fecha).

El cierre de la piquera al final de la colada se realiza mediante el cañón de lodos (clay gun), figura 3. El cañón se balancea desde un brazo montado en un pedestal o en alguna columna en el piso de colada. Consiste en un cilindro estrechado a una boquilla en el extremo de salida. El brazo es normalmente paralelo al canal principal, pero cuando se pone en funcionamiento, el brazo gira 90° y la pistola se inclina para que la boquilla del cañón entre en la piquera. El tapón es empujado desde el cañón por un émbolo o tornillo; El émbolo usualmente es operado por vapor y el tornillo por un motor eléctrico (**United States Steel, 1971**).

Durante la colada del arrabio, se busca evitar las salpicaduras del metal, debido a que suponen un riesgo en los pisos de colada, además de que causan un mayor desgaste en el canal principal. A través de un experimento piloto se demostró que este fenómeno puede ser potenciado debido a un flujo bifásico tipo gas-líquido (slug flow), causado por el arrastre de los gases de combustión provenientes de las toberas (**Stevenson, P., y He, Q., 2004**).

1.4 EL TAPÓN REFRACTARIO

Los refractarios son materiales cerámicos que están diseñados para soportar una gran variedad de condiciones severas de servicio incluyendo el efecto de altas temperaturas, líquidos y gases corrosivos, abrasión, esfuerzos mecánicos y térmicos inducidos. Estos son empleados por una amplia gama de industrias siendo las más importantes: metalúrgica, cemento y vidrio. Cuando han concluido su tiempo de vida útil, son reemplazados con nuevos refractarios producidos a partir de materia prima virgen, en la mayoría de los casos, y los refractarios removidos, son dispuestos o confinados de acuerdo con ciertas normas cuando son aplicables (**Davila, F., 2009**).

Los altos hornos están compuestos de múltiples materiales refractarios. Un punto crucial en la obtención del hierro es la colada del arrabio y la escoria, situación que se lleva a cabo en las piqueras de los pisos de colada. Es tan importante esta etapa del proceso que tiene efecto en la calidad del producto, la productividad del horno, la seguridad y mantenimiento del proceso; todo lo anteriormente mencionado está en función del desempeño del tapón refractario. Hoy en día los refractarios tienen gran importancia en el soporte de las operaciones de obtención de hierro. El porcentaje de consumo de estos refractarios en la industria del acero es muy alto, y son un factor importante en los costos totales de los pisos de colada (**Sugita, K., y Shinohara, Y., 1983**).

1.4.1 Principales funciones y características del Tapón Refractario

El papel fundamental del Tapón Refractario está ligado a cinco factores importantes (**Smruti, D., 2009**):

1.4.1.1 Mantenimiento de las condiciones operativas del Alto Horno.

Depende primordialmente del tamaño y la explotación del horno. Los taponés utilizados para el proceso son clave para asegurar la rentabilidad y seguridad, con el objetivo de no alterar la productividad del Alto Horno.

1.4.1.2 Gestión del área de piquera

El tapón no solo debe conducir y resistir el paso de acero fundido, sino también tener un impacto positivo en la colada del crisol y en el flujo periférico del acero a través de la longitud del agujero dejado tras la perforación.

1.4.1.3 Aspectos ambientales

Se toman en cuenta dos: El mejoramiento de las condiciones del personal de trabajo en los pisos de colada; y la protección al medio ambiente en general de las áreas que rodean al proceso del Alto Horno.

1.4.1.4 Aspectos económicos

Con el objetivo de promover un óptimo costo unitario por tonelada de metal caliente producido, los costos del tapón permanecen como uno de los gastos más importantes en los pisos de colada, como ya se mencionó anteriormente.

1.4.1.5 Tiempo de vida del Alto Horno

El tiempo de campaña de un Alto Horno es de aproximadamente 20 años, sin que deba haber reparaciones en las paredes del crisol y la piquera.

Una adecuada protección de las paredes del crisol es dependiente del desempeño del tapón. Cuando este es empujado dentro del horno después de cada colada, con el objetivo de sellar la piquera, el tapón se acumula en las paredes internas del Alto Horno, generando una protección llamada “hongo”, como se puede observar en la figura 7. El uso de un tapón de baja calidad puede conducir a una deficiente protección de las paredes internas o a un incremento en el consumo del material inyectado para la reconstrucción del hongo erosionado (**Sako E., Galesi, D., Leao, C., Rodrigues, F., Souza, A., Roy, J., Kitamura, M., y Horiushi, T., 2018**).

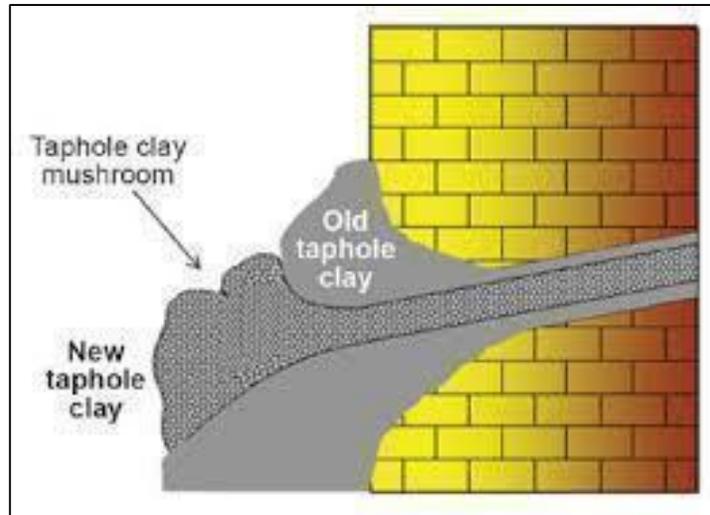


Figura 7. Desempeño del Tapón dentro del Alto Horno (Sako E., Galesi, D., Leao, C., Rodrigues, F., Souza, A., Roy, J., Kitamura, M., y Horiushi, T., 2018).

Para poder lograr lo anteriormente mencionado, el tapón debe cumplir con las siguientes características (Smruti, D., 2009):

1. Fluir al ser empujado a la piquera a través del cañón de lodos (Trabajabilidad).
2. Endurecerse dentro de la piquera durante su inyección para asegurar un sellado ajustado (Sinterizado).
3. Ser perforado en un tiempo adecuado.
4. Permitir un estable y controlado flujo de acero, sin que este “escupa” (chisporrotee).
5. Soportar la erosión y abrasión del hierro y escoria.
6. Formar un sustrato estable para la siguiente colada.
7. Proveer de una estable y controlada longitud de piquera.

1.4.2 Diseño del tapón refractario

Los altos hornos operan de manera diferente uno del otro, de acuerdo con las materias primas utilizadas (mineral de hierro y pellets, reactividad del coque, etc.), la composición del combustible (el balance entre el coque y carbón pulverizado), la producción diaria, su volumen interno, el equipo utilizado para la perforación y la inyección, y muchos otros factores (AIST, 2018). El diseño del tapón debe atender las necesidades particulares

dependiendo del Alto Horno donde sea empleado, ya que este material puede comportarse de manera diferente de un Alto Horno a otro, e inclusive de una piquera a otra en el caso de los altos hornos que posean dos o más.

Tres aspectos generales que involucran un buen diseño de Tapón Refractario son los siguientes (Smruti, D., 2009):

1.4.2.1 Presión de extrusión

Debe ser adecuada al momento de realizar la inyección, de esta manera el tapón tendrá una estructura compacta dentro de la piquera. Por lo tanto, es importante comprender el concepto de maduración del Tapón Refractario y controlar la presión de extrusión.

1.4.2.2 Tapado

Debe ser suave para una larga duración del tiempo de colada, sin que la piquera se dañe por demasiado “taladreo” o apertura por medio de lanzas de oxígeno, esto con el fin de prevenir fisuras y craqueos en el material. Es importante realizar un ajuste de la dureza del Tapón Refractario a través del control del sinterizado. Una larga duración en los tiempos de colada contribuye no solo a la reducción del consumo de tapón u otros productos consumibles, sino también a la reducción de la carga de trabajo en los pisos de colada al disminuir el taponamiento y taladrado (y así el uso del cañón y del taladro).

1.4.2.3 Protección a las paredes internas de la piquera y del Alto Horno

Esto se logra con la formación de un hongo, por lo que es importante tener una buena plasticidad y excelente adhesión con el tapón viejo dentro del horno, bajo condiciones calientes y de espacio reducido. Al lograr lo anteriormente mencionado, se vuelve posible no solo reducir el consumo de tapón refractario, sino también, tener una operación estable.

El uso de una lanza de oxígeno se refiere a la inyección de oxígeno a través de la piquera cuando el Tapón Refractario es muy difícil de taladrar, o bien, cuando la longitud de piquera es mayor al alcance de la “broca” del taladro. Lo anterior se hace con el fin de reducir la liga carbonífera que mantiene unido al tapón, para que este último sea destruido y permita la salida del arrabio. Esta práctica, sin embargo, puede causar un gran daño a la protección que

ofrece el tapón a través del hongo y la capa formada en la periferia de la piquera, por lo cual se busca también en las industrias siderúrgicas reducir su uso e incluso evitarlo.

1.4.2.2 Granos y aditivos

Las propiedades mencionadas en el punto anterior provienen de las materias primas utilizadas en la fabricación del tapón. Algunas de estas materias y sus funciones son: Bauxitas, Alúminas y Arcillas Refractarias, funcionan como materiales de soporte; Arcillas Minerales, ayudan a mejorar la plasticidad e inyección; Silica y Arena Fina, dan expansión ($>1,200^{\circ}\text{C}$); Kianitas, también dan expansión; Alúmina Calcinada y Humo de Sílice, ayudan al sinterizado, la formación de mulita y dan expansión; Carburo de Silicio y Carbón, proporcionan resistencia a la corrosión; Nitruro de Silicio, resistencia a la erosión; Polvos Metálicos, resistencia a la erosión y sinterizado; Coque y Carbón Ultra fino, ayuda a la perforación; y el Alquitrán, Resina o Aceites Especiales, son aglutinantes. (**Smruti, D., 2009**).

El Ferro Nitruro de Silicio, Carburo de Silicio, Alúmina y Fuentes de Carbón son las materias primas más importantes. La alúmina (Al_2O_3) provee una buena estabilidad térmica al estar en contacto con el arrabio. El carburo de silicio (SiC) presenta una baja reactividad a la escoria. El balance entre estos dos elementos es importante cuando se diseña una formulación resistente a la corrosión. Sin embargo, las actuales condiciones de los altos hornos hacen que lo anterior no sea suficiente para la resistencia al ataque por arrabio y escoria, por lo que otro factor en el mejoramiento de un Tapón Refractario es la optimización de la distribución granulométrica. Un alto porcentaje de porosidad podría permitir filtraciones del acero en el tapón, aumentando el área de desgaste, y propiciando la formación de grietas. Con una buena distribución granulométrica, se puede conseguir una mayor densificación y por ende una mayor resistencia del material (**AIST, 2018**).

La premisa anterior se comprobó en un experimento, donde a partir de la adición de diferentes porcentajes de Si-SiC, en un tapón común, buscando reducir los costos ocasionados por el uso de Ferro Nitruro de Silicio. El resultado fue que debido a la adición de Si-SiC, la Porosidad se incrementó, ocasionando pérdidas en la resistencia mecánica (**Han, F., Xue, W., y Huang, X., 2012**). Esto comprueba que, pese a una buena selección de materias primas,

una mala distribución granulométrica puede causar problemas tales como la falta de resistencia mecánica y filtraciones por acero y/o escoria.

Algo que también es muy común entre los desarrolladores de tapón es la búsqueda de materias primas más baratas y funcionales. A ejemplo de esto, un estudio utilizó Sillimanita, Cuarzo, Escoria de Aluminio y Coque para la síntesis de Fe-Sialon-Ti(C,N), como un sustituto de corindón y Fe-Si₃N₄, con lo que se demostró que con una adición del Fe-Sialon-Ti(C,N) al 15% se mantuvo la resistencia al ataque por escoria, así como el mejoramiento de la resistencia mecánica, y el aumento de la densidad, **(Liu, X., Fang, M., Liu, Y., Qian, Z., Ding, H. y Huang, Z., 2014).**

1.4.3 Materiales aglutinantes del Tapón Refractario

Una de las materias primas más importantes a considerar en el diseño del Tapón Refractario es el Aglutinante o Ligante Químico, ya que la reología del tapón depende primordialmente de este. También depende de la relación entre el ligante y la distribución granulométrica, la morfología de los granos y su tamaño **(Smruti, D., 2009).**

A lo largo del tiempo se han utilizado múltiples tipos de ligantes, principalmente debido a la evolución del tamaño, tecnología y las condiciones del Alto Horno. Por ejemplo, una de las razones por las cuales la mezcla de Tapón Refractario con agua templada fue reemplazada por una mezcla con alquitrán (mezcla anhidra), fue el mejoramiento de la duración del Tapón Refractario, como requerimiento para el incremento de la taza de taponamiento **(Sugita, K. y Shinohara, Y., 1983).** Otra razón fue para proteger los ladrillos de coque que iban a ser utilizados en el crisol del Alto Horno y que podían ser dañados a través de la oxidación propiciada por el vapor de agua

Actualmente, la mayoría de las mezclas de tapón utilizadas en las piqueras son mezcladas con Alquitrán de Hulla o Resinas Fenólicas. Estos ligantes ajustan la plasticidad de la mezcla y logran una buena propiedad de unión.

1.4.3.1 Alquitrán de Hulla

El alquitrán se obtiene del proceso de coquización (destilación del coque), es un líquido negro viscoso, más denso que el agua, compuesto principalmente de una mezcla compleja de hidrocarburos aromáticos con anillos condensados. Puede contener compuestos fenólicos, bases nitrogenadas aromáticas y alquil derivados e hidrocarburos parafínicos y olefínicos. Es tratado mediante un proceso de destilación que rinde una serie de fracciones líquidas y brea. El historial térmico de la destilación afecta los parámetros característicos de la brea y en consecuencia su desempeño como precursor de materiales avanzados de carbón. La transformación de la mesofase en materiales de carbón es propiciada por ciclos térmicos en los cuales ocurre una polimerización deshidronegativa de las estructuras aromáticas condensadas de alto peso molecular de que consta la mesofase, generando carbono en estructura gráfica. La microestructura cristalina de un material de carbono es un parámetro determinante, ya que de él dependen propiedades importantes tales como la dureza, resistencia eléctrica y mecánica, conductividad térmica, estabilidad frente a la oxidación, etc. **(Camporredondo, J., Martínez, R., García, A., Garza, M., y Sifuentes, C., 2012).**

1.4.3.2 Resinas Fenólicas

Existen dos tipos de resina fenólica, el tipo Novolac y el tipo Resol. Mientras que el primero es de naturaleza termoplástica, el segundo es termoestable. Cuando el tipo Novolac es utilizado, cerca del 10% de la hexametilentetramina es utilizada como un endurecedor. Ambas resinas dan un alto grado de carbonización a altas temperaturas y dan un gran endurecimiento. Sin embargo, la resina de tipo Resol tiene una vida útil corta debido a la polimerización y al aumento de la viscosidad durante el almacenamiento por lo que el amasado de la mezcla se vuelve difícil y, por lo tanto, se requiere una gran cantidad de resina para garantizar una plasticidad adecuada. La resina Novolac también tiene una estabilidad térmica baja y su temperatura de descomposición se reduce aún más por la adsorción de humedad. Por lo tanto, las resinas de fenol no se pueden usar satisfactoriamente en la forma convencional para preparar el tapón. Por otro lado, el uso de resinas fenólicas causa que la mezcla solidifique prematuramente dentro del cañón, lo que hace más difícil empujar el tapón a través de la piquera **(Smruti, D., 2009).**

Las propiedades de las resinas fenólicas son las siguientes **(Coarrubias, H., Sáenz, A. y Castañeda, A., 2016)**:

- Excelentes características eléctricas.
- Buena resistencia a temperaturas elevadas.
- Muy buena resistencia al fuego.
- Resistencia al choque.
- Resistencia a la abrasión.
- Buena resistencia al ataque químico, de forma general, a los disolventes orgánicos.
- Excelente adhesión a otras resinas.
- Estabilidad dimensional.

Hoy en día es común la realización de mejoras en los aglutinantes a través de la mezcla de ambos, alquitrán (o sus derivados) y resina. Sin embargo, el alquitrán no será fácilmente mezclado con la resina, si no con el uso de un solvente mutuo **(Smruti, D., 2009)**.

En los mecanismos de endurecimiento y formación de la estructura del tapón refractario después de la inyección, el factor más influyente es el del aglutinante (alquitrán de hulla o resina). El tapón refractario, siendo sujeto al efecto de calentamiento después de la inyección es endurecido o carburizado, formando una estructura soportada por una liga carbonífera. También, el sinterizado toma lugar parcialmente en los granos refractarios. Se debe prestar especial atención al comportamiento de los gases emitidos de la mezcla de tapón refractario en el proceso de formación de dicha estructura, ya que una excesiva emisión de gases puede volver a esta frágil **(Sugita, K. y Shinohara, Y., 1983)**.

Los aglutinantes, alquitrán de hulla, la brea y el asfalto pueden proveer de buena plasticidad. Sin embargo, tienen altos contenidos de hidrocarburos aromáticos policíclicos, uno de los más comunes es el benzopireno, el cual es carcinógeno. Estudios recientes han mostrado que el cambio de este tipo de aglutinantes por una resina amigable con el medio ambiente y la adición de brea puede disminuir el contenido de estos agentes carcinógenos, además con valor agregado de disminución en la presión de inyección, mayor resistencia a la oxidación, resistencia a la corrosión por escoria, etc. **(Wang, L., Yin, Y., Qiu, W., Liang, Y., Ruan, G., y Zhao, L., 2017)**.

Es importante mencionar que el tapón refractario es un material evolutivo que únicamente obtiene todas sus propiedades después del tiempo de maduración. Esta maduración se traduce en un incremento de la resistencia a la extrusión o bien, del índice de plasticidad. La curva que muestra la evolución de este parámetro está en función del tiempo, aunque también depende fuertemente de la cantidad del aglutinante utilizado, y varía de acuerdo con la naturaleza del aglutinante (con o sin alquitrán) y el agregado. Estudios recientes han mostrado que la evolución de la resistencia a la extrusión es fuertemente dependiente del clima de almacenamiento (temperatura - radiación solar). El mecanismo de la maduración es aún subentendido, sin embargo, por analogía puede ser supuesto que los siguientes fenómenos físicoquímicos son formados. **(Delabre, Ph., Doufour, A., Guenard, C., Hitier, B., Hubert, P., Le, I., y Venturini, M., 1991):**

- Absorción y adsorción del aglutinante en los granos, particularmente en la superficie, lo que conduce a un refuerzo de la adhesión y cohesión.
- Transformación de la naturaleza del aglutinante debido a la evaporación de material volátil, envejecimiento del alquitrán o aceites por causas de oxidación o polimerización.

1.5 PRODUCCIÓN DEL TAPÓN REFRACTARIO DE LA EMPRESA CINASA

La manufactura del Tapón Refractario, MU-410, de CINASA se realiza según lo descrito en el diagrama 1:

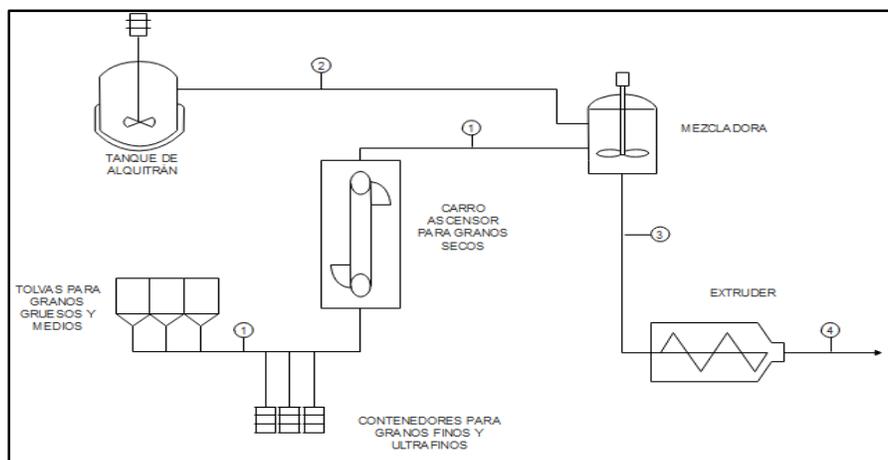


Diagrama 1. Flujo del proceso de producción del tapón refractario de la empresa CINASA
(Elaboración Propia).

Este proceso se divide en tres pasos:

1.5.1 Carga de materias primas

Las materias secas, en su totalidad, son granos en diferentes tamaños de partícula. Los granos gruesos y medios son colocados previamente en tolvas con capacidad para 1 tonelada. Dichas tolvas tienen un sistema interno de mezclado que permite una buena homogeneización de los diferentes tamaños de grano, estos granos se extraen por la parte inferior a través de una compuerta para ser pesados. Los granos gruesos se calientan dentro de las tolvas, debido a que esto mejorará la penetración del alquitrán en los granos, manteniendo cierta temperatura en el mezclado, lo que hace que el alquitrán permanezca líquido. Estos granos son cargados junto con los granos finos y ultrafinos en un carro ascensor que introduce los materiales en la mezcladora. La carga se realiza de acuerdo con una tarjeta de mezcla con los porcentajes adecuados de cada grano con el fin de que se mantenga una cantidad de alquitrán estable para su cobertura. Esto ocurre sobre la línea número 1.

1.5.2 Mezclados (seco y húmedo)

Posterior a la carga de materias primas, en una mezcladora de alta intensidad, se dan el tiempo de mezclado en seco, la adición de alquitrán a través de un sistema de regadera y el mezclado en húmedo. La adición de alquitrán se lleva a cabo por la línea número 2.

1.5.3 Extrusión

Finalmente, después del mezclado en húmedo, se obtiene un cuerpo plástico que se vacía por la parte inferior de la mezcladora hacia una banda transportadora, la cual canaliza la mezcla en banda hacia un extruder de tipo tornillo.

El extruder consta de tres partes:

Caja: En este lugar se recibe el material proveniente de bandas. Dentro de esta caja existe un sistema de aspadas, las cuales dan un primer amasado a la mezcla, al mismo tiempo que la empujan hacia la siguiente etapa.

Cilindro: Consta de una extensión cilíndrica del cuerpo del extruder, donde el producto se amasa debido al movimiento y contacto de las aspadas contra el mismo cilindro. Estas aspadas empujan continuamente el material hacia la última etapa.

Boquilla: Es en esta etapa donde se da la extrusión del material amasado, la cual a través de presión (que se da al reducir la sección de salida por medio de la boquilla) y temperatura, da un producto terminado en forma de un cilindro rectangular y continuo.

Para entender mejor el sistema de extrusión, se tiene la figura 8.

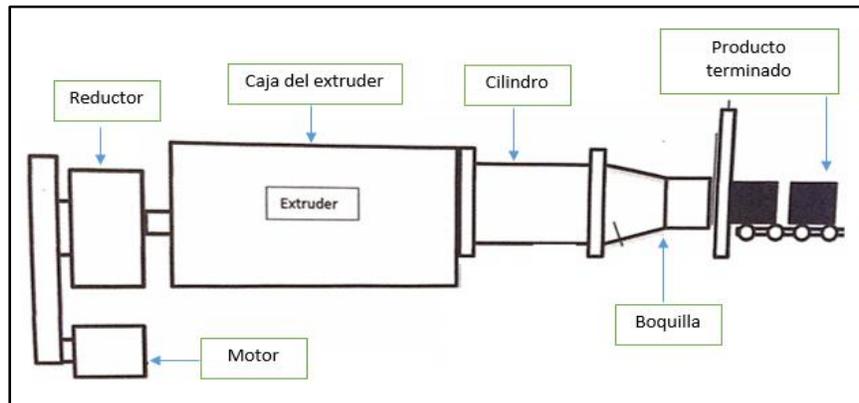


Figura 8. Proceso de extrusión del tapón refractario de la empresa CINASA (Elaboración Propia).

El proceso de producción del tapón es un proceso por lotes. Al cortar el cilindro rectangular, se obtienen cubos rectangulares con un peso aproximado de 7 kg, al final estos son envueltos en bolsas de plástico para evitar la adhesión de unos con otros al momento de cargarse. La carga se realiza por medio de tarimas sobre las cuales se colocan cajas con capacidad para albergar 280 cuadros, lo que significa que cada caja tiene un peso aproximado de 1,960 kg en peso de producto.

Un lote de tapón consiste en 15 tarimas (29,400 kg de producto aproximadamente). La producción se concluye con el empaquetado y etiquetado. Estas cajas son almacenadas por un determinado tiempo, según las necesidades del Alto Horno (el tiempo de embarque depende del consumo de tapón refractario y las necesidades de este material en los pisos de colada). Esto último ayuda al tiempo de maduración del material.

1.6 LIBERACIÓN DEL TAPÓN EN LA EMPRESA CINASA

CINASA determina la liberación del tapón, y su posterior certificación, con base en dos tipos de propiedades físicas, el Valor Marshall y los datos provenientes de barras del material, estos últimos son tomados con base en las normas ASTM (American Society of Testing Materials, por sus siglas en inglés), que analizaremos adelante.

1.6.1. Valor Marshall

La fabricación de un lote de tapón consiste en 15 tarimas. El muestreo para Valor Marshall son 3 muestras por cada tarima, un total de 45 muestras por lote. De cada muestra se pesan 800 g y se colocan dentro de un cilindro con terminación cónica, figura 9. El cilindro se coloca en la prensa Tinius Olsen, figura 10, donde a presión se empuja el tapón a través del orificio de la parte inferior. El Valor Marshall se expresa como el valor de tensión con el que se extrajo el tapón del cilindro, y es una medida de la plasticidad del producto. Este valor se toma como referencia del Q/LIRR 56 standard (Wang, L., Yin, Y., Qiu, W., Liang, Y., Ruan, G., y Zhao, L., 2017). Este valor servirá como patrón para evaluar la presión necesaria en el cañón del Alto Horno para empujar el material a través de la piqueta.

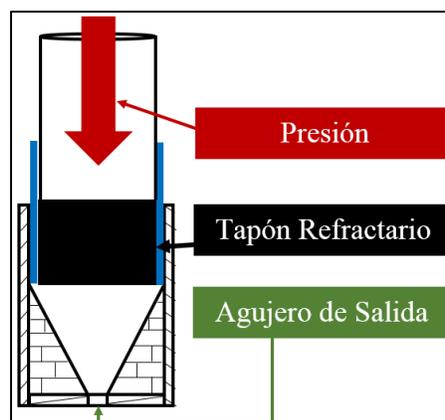


Figura 9. Cilindro para determinación del Valor Marshall (Elaboración Propia).



Figura 10. Prensa Tinius Olsen (Frank Bacon Machinery Sales, 2015).

El parámetro de aceptación del Valor Marshall en la empresa CINASA es de 600 – 1,000 kgf/cm^2 .

1.6.2. Datos obtenidos de Barras

De las 15 tarimas se elaboran 6 barras, aproximadamente 1 barra por cada 2.5 tarimas. Cada barra se hace a partir de 410 g de material y es compactada en un molde, de dimensiones fijadas por CINASA, a una presión de 100 kgf/cm^2 . Posterior al moldeo las barras son medidas, pesadas y colocadas en un recipiente rectangular, hecho de material refractario, y relleno con coque, para propiciar una quema en atmósfera reductora y evitar su oxidación. El siguiente paso es el quemado, por medio del cual, a través de una curva de temperaturas, diseñada por CINASA, son llevadas a 1350 °C, simulando la temperatura dentro del Alto Horno. Finalmente, las piezas se extraen para volver a medirse, pesarse y ser evaluadas en los siguientes parámetros físicos:

- Densidad Aparente (g/cm^3).
- Porosidad Aparente (%).
- Cambio Lineal Permanente (%).
- Carbón Fijo (%).
- Volátiles o P.P.I (%).

- Módulo de Ruptura (kgf/cm^2).

1.7 PARÁMETROS DE ACEPTACIÓN DEL TAPÓN REFRACTARIO EN EL ALTO HORNO DE LA EMPRESA “A”

1.7.1 Longitud de piqueta

Este parámetro mide la longitud alcanzada por el tapón desde el punto de inyección hasta la formación y alcance del hongo. Este parámetro es de suma importancia para la protección y extensión del tiempo de vida del horno y para dar una mejor extracción del arrabio, y depende de una buena plasticidad (Valor Marshall) del tapón utilizado.

Debido a que el grosor de la pared en el crisol del Alto Horno de la empresa “A” es de 2 m, se considera que una longitud adecuada con formación de hongo debe estar dentro de los límites de 2.8-3 m.

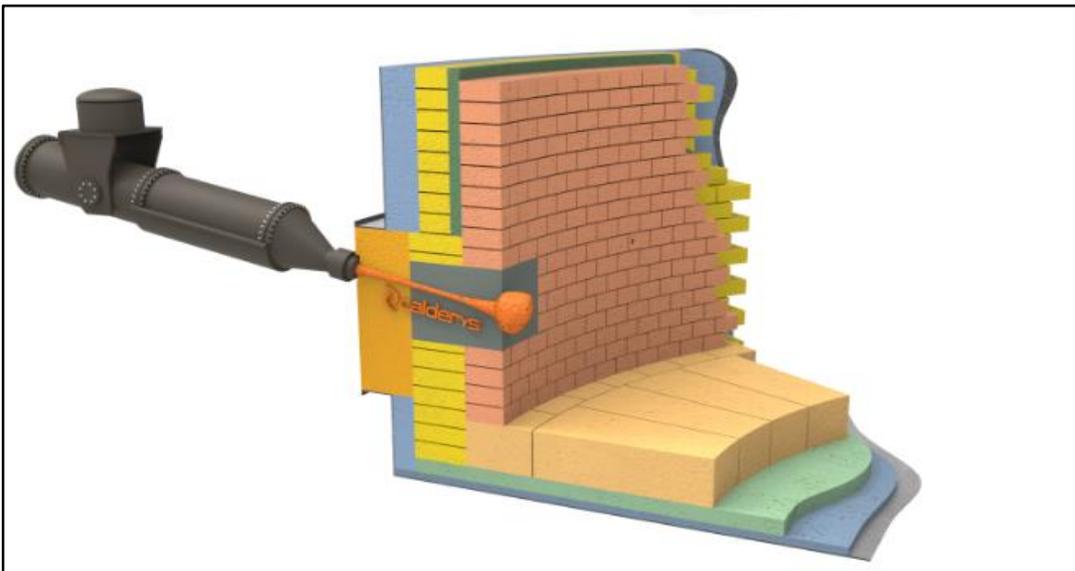


Figura 11. Longitud de piqueta en un Alto Horno (Calderys, 2021).

1.7.2 Tiempo de colada

Una vez alcanzado un nivel óptimo de arrabio en el crisol del Alto Horno, el tapón es perforado para permitir la salida del metal fundido. El metal fluye a través del tapón que recubre a la piqueta y la previene del desgaste, ya que este se da en el tapón. Un buen tapón

tendrá una baja tasa de desgaste, por lo que la sección transversal de salida no aumentará, y por lo tanto dará tiempos adecuados de colada que contribuirán a mantener una producción estable. Por el contrario, un tapón con mal desempeño tendrá una alta tasa de desgaste, que causará un aumento en el área transversal en la salida, de manera que el crisol se vaciará más rápido, dando tiempos cortos de colada.

El parámetro establecido por la empresa “A” para calificar un tapón con buenos tiempos de colada es de 90 a 120 minutos. Este factor está directamente ligado con el sinterizado (endurecimiento) del material dentro de la piquera, el cual depende de la formación de la liga carbonífera. Además, es importante que el tapón al ser perforado deje un camino liso para que el flujo de metal sea laminar, ya que un flujo turbulento contribuirá a aumentar la tasa de desgaste, y causara chisporroteo del metal a su salida. Dicho tiempo de colada está relacionado también con los parámetros de Densidad Aparente, Porosidad Aparente, Carbón Fijo, Volátiles y M.O.R.



Figura 12. Colada del Alto Horno de la empresa “A” (Elaboración propia).

1.7.3 Número de coladas por día

Este parámetro es consecuencia de los tiempos de coladas y las longitudes de piquera. El número de coladas se relaciona con la cantidad de tapón consumido. Un tapón con buenas características de resistencia a la abrasión, erosión por metal y/o escoria y resistencia mecánica, debido al desarrollo de la liga y el sinterizado podrá mantener una longitud de

piquera y tiempos de colada dentro de los parámetros establecidos. Por el contrario, un tapón con baja resistencia mecánica será erosionado rápidamente por el metal, lo que repercutirá en un abocinamiento en la salida del metal y la escoria, lo que hará que el crisol se vacíe más rápido y la frecuencia de los taponamientos y coladas aumente.

El número de coladas requerido por la empresa “A” es preferentemente de 10 coladas/día, pudiendo permitir 12 coladas/día como parámetro máximo de aceptación. Coladas superiores a ese número afectarán los costos en los pisos de colada.

1.7.4 Rendimiento/Consumo de tapón

El consumo de tapón afecta, como ya se ha explorado, a los gastos en los pisos de colada. Este es un factor que se mide con una razón de la cantidad de tapón consumido, en kilogramos, dividido por las Toneladas de arrabio producidas. Entre más tapón se consuma el factor será más grande, lo que significa que los gastos aumentarán y viceversa.

$$\text{Rendimiento de tapón} = \frac{\text{Kg de tapón consumido}}{\text{Ton.De arrabio producido}} \dots (1)$$

Para mantener en control los costos en el piso de colada de la empresa “A”, el factor debe mantenerse en un nivel ideal de 0.5 kg de tapón consumido por cada tonelada de arrabio producida.

2.0 JUSTIFICACIÓN

El propósito de este trabajo es evaluar el desempeño del Tapón MU-410, el cual será fabricado con dos tipos de alquitranes, de origen Americano y Nacional. El alquitrán es quizá la materia prima más importante en la fabricación del Tapón Refractario, ya que la reología de este determinará la consistencia del tapón, además, la liga carbonífera formada de la brea contenida en el alquitrán, y de otras fuentes de carbón en la formulación del tapón, proveerán las características físicas necesarias para un buen desempeño en el Alto Horno.

Un tapón con consistencia dura puede traer los siguientes efectos negativos en el proceso productivo:

- Dificultad para ser mezclado, causando una mala homogeneización de los materiales secos y el aglutinante.
- Desgaste del equipo de mezclado.
- Formación de grandes masas aglomeradas (El tapón debe formar gránulos pequeños al ser mezclado).
- Dificultad para ser extruido.
- Desgaste en el equipo de extrusión.
- Calentamiento del material y pérdida de volátiles en la boquilla del extruder.

Para poder discriminar el desempeño de los alquitranes anteriores, se elaborará tapón con las mismas cantidades de alquitrán que marca la tarjeta de mezcla de proceso y se evaluará en dos tipos de parámetros:

- Cuantitativos: De acuerdo con las especificaciones de CINASA.
 - Densidad Aparente: 1.96 – 2.20 g/cm³.
 - Porosidad Aparente: 17 – 25 %.
 - Cambio Lineal Permanente: -0.90 – -0.10%.
 - Carbón Fijo: 8.3 – 14.3 %.
 - Volátiles (P.P.I.): 9 – 15%.
 - Módulo de Ruptura (M.O.R.): 30 – 60 kg_f/cm².
 - Valor Marshall: 600 – 1,000 kg_f/cm².
- Cualitativos:

- Consistencia de los alquitranes (características físicas).
- Comportamiento del mezclado.
- Comportamiento durante moldeo manual.

También se evaluarán las propiedades físicas contra las especificaciones de una empresa americana, “B”, en pastillas, las cuales son:

- Densidad Aparente (lb/ft^3): No hay especificación, es solo informativa.
- Porosidad Aparente: $<30\%$.
- Cambio Lineal Permanente: $<4.0\%$.
- Cambio Volumétrico: $8.4\% - 10\%$.
- Volátiles (P.P.I.): $<10\%$.
- Resistencia a la compresión: $1,200 - 1,700 \text{ lb}_f/\text{in}^2$.

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño del Tapón MU-410 con el uso de dos tipos de material aglutinante, Nacional y Americano, de acuerdo con las especificaciones físicas de la empresa CINASA para su uso en el Alto Horno de la empresa “A”, y las especificaciones físicas de la empresa americana, “B”, para determinar si el material con el uso de alguno de los dos tipos de aglutinante es apto para ser exportado.

2.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar cualitativamente las mezclas tapón con el uso de cada tipo de alquitrán
 - Comparar las características físicas de ambos alquitranes: Color, olor, consistencia y fluidez.
 - Evaluar el comportamiento de fabricación del tapón con los dos tipos de alquitrán: Dificultad en el mezclado, integración y plasticidad manual de la mezcla.
- Comparar las propiedades físicas de barras, elaboradas con cada tipo de alquitrán, contra los parámetros de la empresa CINASA: Densidad Aparente, Porosidad Aparente, Cambio Lineal Permanente, Volátiles (P.P.I.), Carbón Fijo, Módulo de Ruptura y Valor Marshall.
- Comparar las propiedades físicas de pastillas, elaboradas con cada tipo de alquitrán, contra los parámetros de la empresa “B”: Densidad Aparente, Porosidad Aparente, Cambio Diámetro Permanente, Cambio Volumétrico, Volátiles (P.P.I.) y Resistencia a la Compresión.

3.0 METODOLOGÍA

3.1 ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DEL ALQUITRÁN

Se realizó un análisis cualitativo del comportamiento del alquitrán en los siguientes parámetros:

- **Color:** Negro.
- **Olor.**
- **Consistencia:** Homogénea, sin formación de grumos.
- **Fluidez:** Fluido a temperaturas superiores a los 60°C.
- **Plasticidad Manual e integración de la mezcla.**

Este tipo de prácticas son comunes debido a que los diferentes tipos de alquitrán pueden cambiar de acuerdo con las condiciones de su producción. Al ser un subproducto de la producción de coque, muchas veces no se da un seguimiento a su calidad, esto último puede repercutir en su comportamiento físico, y la dificultad de su uso durante la elaboración del tapón y en el desempeño de este en el Alto Horno, sobre todo, en la plasticidad de la mezcla.

3.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MEZCLA SECA

El análisis granulométrico consistió en la toma de tres muestras de cada mezcla, destinadas para la fabricación de tapón con cada tipo de aglutinante, y se reportó el porcentaje retenido sobre malla. Los pasos fueron:

- **Realización de la mezcla:** De acuerdo con los porcentajes indicados en las tarjetas de mezcla, se elaboraron 5 kg de mezcla seca de tapón. El material se mezcló durante un tiempo, similar al tiempo de mezclado en proceso, para asegurar su homogeneización.
- **Toma de muestra:** La toma de muestra se hizo inmediatamente después del mezclado. Para pruebas típicamente se analizan tres muestras.
- **Elección de Mallas:** Dentro de las hojas técnicas se especifican las mallas a utilizar para cada tipo de material. En el caso del tapón MU-410, son las mallas que denominaremos “1, 2, 3 y 4” de la especificación U.S. (esta especificación es una medida de la apertura de la malla).

- **Tamizado:** Las mallas se colocaron sobre una base, donde se habrían de recibir los finos (“-4”), después se colocó la muestra en la malla superior y se montó la tapa, posteriormente se colocaron las mallas en el equipo Ro-Tap, figura 13, para finalmente programar un tiempo de tamizado de 5 minutos.
- **Cálculo del porcentaje retenido sobre malla:** Terminado el tamizado, se extrajeron las mallas del equipo y se separaron. Con la ayuda de una balanza con sensibilidad de 0.1 g, se determinó la masa contenida en cada malla, dando como resultado el porcentaje retenido sobre malla. El resultado directo del porcentaje fue posible debido a que cada muestra tenía un peso de 100 g.

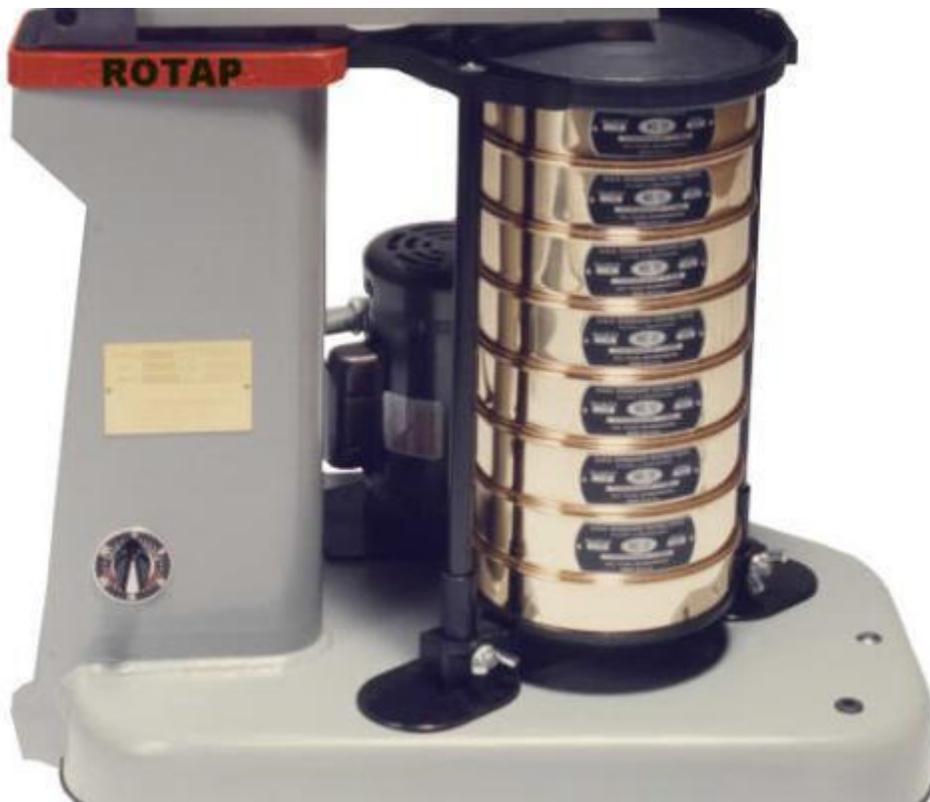


Figura 13. Tamizador Ro-Tap (CROMTEX, sin fecha).

Esta prueba fue crucial para asegurar un consumo similar de alquitrán entre las pruebas, ya que, por experiencia práctica, si el material se inclinara a un mayor contenido de granos finos, debido a las microporosidades de estos, habría una mayor área a cubrir, lo que involucraría un incremento en la cantidad de alquitrán. Caso contrario, con una mayor cantidad de

material grueso, se daría un mayor consumo de alquitrán para asegurar una buena cohesión, debido a la falta de granos de soporte, ya sean finos o medios.

3.3 ANÁLISIS DEL MEZCLADO Y CONSISTENCIA FINAL

El análisis durante el mezclado involucra parámetros visuales y manuales, que ayudan a predecir comportamientos futuros en su fabricación:

- **Revisar si hubo esfuerzo por parte de la mezcladora para homogeneizar el material:** Con este parámetro se observa la posible dificultad que puede tener la mezcla y la extrusión del material en proceso, los cuales pueden repercutir en un mayor o menor desgaste en los equipos.
- **Consistencia de la mezcla después de mezclado:** La mezcla debe ser completamente homogénea, con consistencia similar a la plastilina al ser calentada a 60°C. Cada vez que el material se separa y se reintegra, no debe dejar fisuras o huecos.

3.4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS BARRAS SEGÚN LAS ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA CINASA

En la empresa CINASA, las propiedades físicas del tapón se miden a partir de las normas ASTM, con la fabricación de barras de 410 g. El comportamiento físico de las barras se relaciona directamente con su desempeño en el Alto Horno. Las propiedades analizadas son:

3.4.1 Cambio Lineal Permanente en Barras

Este análisis se hace de acuerdo con la norma ASTM C179-14, 2017. Las variables de entrada son:

1. Longitud de la Barra Antes de Quema (L_0 , en cm).
2. Longitud de la Barra Después de Quema (L_F , en cm).

$$C.L.P. (\%) = \left[\frac{L_F - L_0}{L_0} \right] \times 100 \dots (2)$$

Se mide el porcentaje de expansión lineal que sufren las barras durante el proceso de calentamiento (1350°C/curva). Un valor negativo indica encogimiento, mientras que un valor positivo, una expansión. Se espera que el tapón se expanda, sin embargo, el valor permisible de encogimiento va desde -0.1 a -0.9 % con un valor típico de -0.5%. La expansión en un tapón es importante para asegurar un buen sellado dentro de la piqueta.

3.4.2 Densidad Aparente y Porosidad Aparente en Barras

Se hace de acuerdo con la norma ASTM C20-00 (2015). Las variables de entrada son:

3. Peso de la Barra Después de Quema (PS, en g).
4. Peso Suspendido (PSUS, en g).
5. Peso Húmedo (PH, en g).

$$Volumen (cm^3) = PH - PSUS \dots (3)$$

$$Densidad Aparente \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{PS}{Volumen} \dots (4)$$

$$Porosidad Aparente (\%) = \left[\frac{(PH-PS)}{Volumen} \right] x 100 \dots (5)$$

El peso de la barra Después de Quema se toma al extraer las piezas de la caja, terminada la quema a 1350°C/curva. Después de dejar las barras sumergidas en agua durante un determinado tiempo, el Peso Suspendido, figura 14, se obtiene a través del uso de un aditamento colocado sobre una balanza, del cual cuelga un soporte, que se sumergirá a una profundidad determinada. La balanza se tara junto con el aditamento, después se coloca la pieza sobre el soporte sumergido para tomar el Peso Suspendido. Finalmente, el Peso Húmedo se toma después de extraer las piezas de la tina, retirando el agua superficial. El Volumen del espécimen se obtiene restando el Peso Suspendido del Peso Húmedo, la unidad es dada en cm³. La Densidad Aparente del espécimen se obtiene dividiendo el Peso Después de Quema entre el Volumen, la unidad es dada en g/cm³. La Porosidad Aparente se calcula con la resta del Peso Húmedo menos el Peso después de Quema entre el Volumen, multiplicado por cien.

Los parámetros de Densidad Aparente aceptables para CINASA son 1.96-2.20 g/cm³, con un valor típico de 2.08 g/cm³. En cuanto a la Porosidad Aparente, los parámetros aceptables son 17-25 %, con un valor típico de 21%. Con la Densidad y Porosidad Aparentes dentro de parámetros, se da el empaquetamiento del material, que ayudará a obtener un tapón permeable para la salida de los gases provenientes del alquitrán, evitando la formación de grietas por las presiones de dichos gases; sin embargo, la permeabilidad no deberá ser tan elevada como para permitir filtraciones del metal o escoria, lo que podría conducir a despostilladuras y fracturas en el tapón.

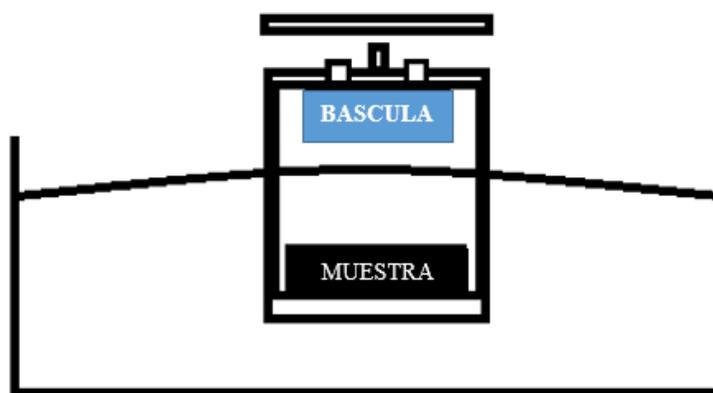


Figura 14. Toma de Peso Suspendido (Elaboración propia).

3.4.3 Volátiles (P.P.I.) y Carbón Fijo (C.F.)

En este caso se toman valores de barras, después de quema a 1350°C/curva, y valores de una muestra extra de tapón proveniente del proceso, calcinada a 850°C. Las variables de entrada son:

6. Peso de la barra Antes de Quema (P_1 , en g).
7. Peso de la barra Después de Quema (P_2 , en g).
8. Peso de la muestra Antes de Calcinación a 850°C (P_A).
9. Peso de la muestra Después de Calcinación a 850°C (P_B).

Las Pérdidas por Ignición (P.P.I.) también se conocen como el Porcentaje de Volátiles del tapón. Se calculan con la siguiente ecuación.

$$P.P.I. (\%) = \left[1 - \frac{P_1}{P_2} \right] \times 100 \dots (6)$$

Para el cálculo del Carbón Fijo, se toma una muestra de 100 g de tapón (P_A), se muele y se coloca distribuido uniformemente sobre una placa refractaria.

Posteriormente se calcina a 850°C en atmósfera oxidante por 3h, o bien, hasta que se haya perdido todo el contenido de carbón. Después se lleva la muestra a temperatura ambiente y se pesa (P_B). Finalmente se realiza el siguiente cálculo:

$$C.F. (\%) = (P_A - P_B) - P.P.I. \dots (7)$$

El parámetro para Volátiles (P.P.I.), es de 9 – 15 %, con un valor típico de 12%. Para el C.F., el parámetro es de 8.3 – 14.3%, con un valor típico de 11.3%. Estos valores son una referencia del contenido de carbón y de líquidos (Volátiles) presentes en el tapón y que afectan su desempeño dependiendo de la cantidad.

Es importante diferenciar los conceptos de C.F. y liga carbonífera. El primero es una referencia al contenido de carbón total presente en el tapón (proveniente de elementos como el coque, el grafito y la brea del alquitrán), el cual es un precursor de la liga carbonífera, ya que, a través del tratamiento térmico, el C.F. se convertirá en liga, sin embargo, el rendimiento de conversión difícilmente será del 100%. Por ello, el contenido de liga, y de las características de resistencia mecánica que de ella provienen puede cambiar de un tipo de alquitrán a otro, dependiendo de su calidad. El desarrollo de liga se analiza a través de los valores de M.O.R. y C.C.S., los cuales son conceptos que se verán a continuación.

3.4.4 Módulo de Ruptura (M.O.R.) en Barras

Se realiza con base el ASTM C133-97 (Re aprobado 2015). Las variables de entrada son:

- Ancho de la Barra Después de Quema (A, en cm).
- Espesor de la Barra Después de Quema (E, en cm).
- Fuerza necesaria para romper la barra, dada por la Tinus Olsen (F, en kg_f).

Posterior al cálculo de la Densidad Aparente, Porosidad Aparente y Cambio Lineal Permanente, las barras se secan y son colocadas en la prensa Tinius Olsen, sobre dos soportes esféricos, como se aprecia en la figura 15, al mismo tiempo al pistón superior de la prensa se

le coloca un aditamento con un soporte esférico, el cual a través de presión partirá la pieza por la parte media.

A través de los datos dimensionales de las barras, ancho (A), espesor (E), la fuerza necesaria para romper la barra (F), y la distancia entre los soportes mostrados en la figura 15 (10 cm), se realiza el siguiente cálculo:

$$M. O. R. \left(\frac{kg_f}{cm^2} \right) = \frac{3 \times F \times 10}{2 \times A \times E^2} \dots (8)$$

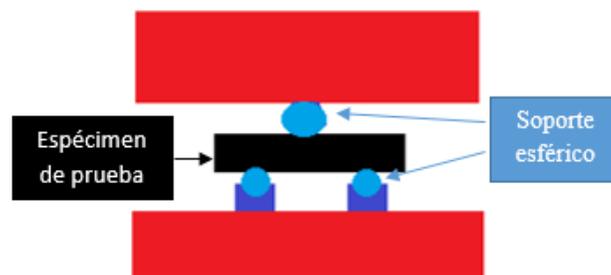


Figura 15. Prueba de M.O.R. (Elaboración propia).

El M.O.R. se utiliza para evaluar la formación de la liga carbonífera, la cual da la resistencia mecánica al tapón. Entre más alto sea el M.O.R., la resistencia y formación de la liga será mayor, y viceversa. El parámetro de aceptación es de 30 – 60 kg_f/cm², con un valor típico de 45 kg_f/cm².

3.4.4 Cálculo del Valor Marshall

Como se observó en el punto 1.6.1, la determinación de la plasticidad consiste en colocar 800 g del material dentro de un cilindro con terminación cónica, figura 9, donde a través de la aplicación de presión, por medio de un pistón, se extrae el material a través del orificio situado en la parte inferior del molde. El Valor Marshall representa la fuerza necesaria para extraer el tapón por la parte final del orificio, y se expresa en kg_f/cm². El parámetro requerido por CINASA es de 600 – 1,000 kg_f/cm². Este factor es análogo a la fuerza que deberá ser utilizada en el Cañón de Lodos para inyectar el tapón dentro de la piqueta.

3.5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PASTILLAS SEGÚN LAS ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA AMERICANA, “B”

El proceso de quema de pastillas es similar al realizado en las barras, la diferencia es que en este caso la quema se realiza a una curva especificada por la empresa “B”, la cual llega a una temperatura máxima de 2000° F (1,093 °C aprox.).

3.5.1 Cambio Diámetro Permanente en Pastillas

Este apartado sigue el procedimiento y cálculo visto en el punto 3.4.1 y la ecuación (2), sin embargo, en este caso el porcentaje se realiza a través del cambio en el diámetro de la pastilla en cuestión. Las variables de entrada son entonces:

- Diámetro de la Pastilla Antes de Quema (D_0 en cm).
- Diámetro de la Pastilla Después de Quema (D_F en cm).

El parámetro buscado por la empresa “B” es un crecimiento menor al 4%.

3.5.2 Densidad Aparente y Porosidad en Pastillas

El procedimiento y cálculo de estos parámetros en el caso de las pastillas, sigue lo visto en el punto 3.4.2 y las ecuaciones (3), (4) y (5). Donde las variables de entrada son:

- Peso de la Pastilla Después de Quema (PPD, en g).
- Peso Húmedo de la Pastilla (PPH, en cm).
- Peso Suspendido de la Pastilla (PPSUS, en cm).

La empresa “B” no tiene una especificación de Densidad Aparente. La Porosidad del espécimen debe ser menor al 30%.

3.5.3 Cambio Volumétrico en Pastillas

Para este cálculo las variables de entrada son:

- Área Transversal promedio de la Pastilla Antes de Quema (AA).

- Área Transversal promedio de la Pastilla Después de Quema (AD).
- Altura promedio de la Pastilla Antes de Quema (HA).
- Altura promedio de la Pastilla Después de Quema (HD).

Se realiza la ecuación 9, donde a partir del volumen teórico antes y después de quema, se obtiene el porcentaje de cambio volumétrico en las pastillas.

$$\text{Cambio Volumétrico (\%)} = \left(\frac{(HD \times AD) - (HA \times AA)}{(HA \times AA)} \right) \times 100. \dots (9)$$

No existe un parámetro de cambio volumétrico por parte de la empresa “B”, por lo que este factor es meramente informativo.

3.5.4 Volátiles (P.P.I.) en Pastillas

El procedimiento y el cálculo siguen lo visto en el punto 3.4.3 y la ecuación (6), donde las variables de entrada serán:

- Peso de la Pastilla Antes de Quema (PP₁, en g).
- Peso de la Pastilla Después de Quema (PP₂, en g).

El parámetro solicitado por la empresa “B” es una pérdida en peso mayor al 8.4%, y menor a 10%.

3.5.5 Resistencia a la Compresión (C.C.S.) en Pastillas

Al igual que el Módulo de Ruptura, la Resistencia a la compresión es una forma de conocer el desarrollo de la liga carbonífera en el tapón. En el caso de este último se coloca un cilindro con sección transversal, ya sea cuadrada o circular, en el equipo Tinius Olsen, por medio del cual se compacta hasta romper la pieza completamente. La fuerza necesaria para romper la pieza se divide entre el área transversal para obtener la presión máxima de resistencia a la compresión, como se observa en la ecuación (10). Las variables de entrada son:

- Fuerza Máxima de Ruptura (F_M, en lb_f).
- Área transversal del espécimen en cuestión (A_T, en in²).

$$C.C.S. \left(\frac{lb_f}{in^2} \right) = \frac{F_M}{A_T} \dots (10)$$

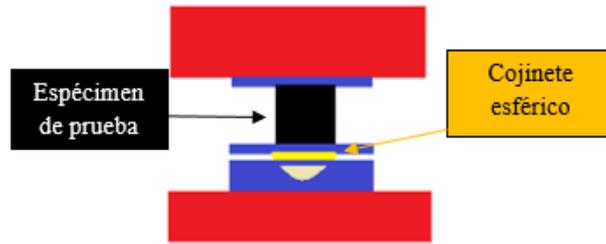


Figura 16. Prueba de C.C.S. (Elaboración propia).

El parámetro de resistencia solicitado por la empresa "B" es de 1,200 a 1,700 lb_f/in^2 .

4.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DEL ALQUITRÁN

Las características físicas de los alquitranes a analizar se presentan en las tablas 1 y 2. Se pueden apreciar diferencias en el contenido de Cenizas, Insolubles en Tolueno, Valor de Coquización y los destilados en sus diferentes rangos. Las cenizas son un subproducto de la prueba de calcinación del alquitrán para poder determinar el contenido de carbón (Valor de Coquización) que el alquitrán aporta a la mezcla tapón, este dependerá de la calidad del tipo de alquitrán utilizado. Los destilados son un valor informativo que muestran la cantidad de compuestos Volátiles presentes en el alquitrán; la especificación normal de CINASA requiere un total de destilados menores al 25% para asegurar una buena permeabilidad del tapón, sin causar una alta Porosidad Aparente; los rangos (0-230 y 230-300) son un valor informativo de la cantidad Volátiles presentes a esas temperaturas. El efecto en el contenido de Insolubles en Tolueno hasta este momento para CINASA es desconocido, por lo cual no se tiene un parámetro específico de control.

ALQUITRÁN NACIONAL			
CARACTERÍSTICA	CONDICIÓN	UNIDAD	VALOR
AGUA	-	%	0.00
VISCOSIDAD BROOKFIELD	60°C, Spin 2 a 2.5 rpm	cp	300
CENIZAS	-	%	0.1
INSOLUBLES EN TOLUENO	-	%	20.1
VALOR DE COQUIZACIÓN	-	%	24.46
PUNTO DE INFLAMACIÓN		°C	95
DESTILACIÓN			
0 - 230 °C	-	%	1.4
230 - 300 °C	-	%	20.2
TOTAL	-	%	21.6

Tabla 1. Características físicas del Alquitrán Nacional.

ALQUITRÁN AMERICANO			
CARACTERÍSTICA	CONDICIÓN	UNIDAD	VALOR
AGUA	-	%	0.30

VISCOSIDAD BROOKFIELD	60°C, Spin 2 a 2.5 rpm	cp	300
CENIZAS	-	%	0.19
INSOLUBLES EN TOLUENO	-	%	9.99
VALOR DE COQUIZACIÓN	-	%	28.1
PUNTO DE INFLAMACIÓN		°C	93
DESTILACIÓN			
0 - 230 °C	-	%	12.24
230 - 300 °C	-	%	11.54
TOTAL	-	%	23.78

Tabla 2. Características físicas del Alquitrán Americano.

Se procedió a la apertura de los botes contenedores, donde lo primero que se distinguió en ambos fue el aroma. El Alquitrán Americano tiene un olor más profundo a aceite de creosota que el alquitrán Nacional. El color en ambas muestras fue negro. Posteriormente se colocaron 3 gramos de cada alquitrán sobre una superficie inclinada a 45 ° por un tiempo de 30s, notando dos cosas importantes, figura 17:

1. Pese a tener la misma viscosidad, el Alquitrán Americano presenta una mejor fluidez que el Nacional.
2. El Alquitrán Americano tiene una consistencia más homogénea que el Nacional, este último presenta partículas suspendidas en su composición, lo cual significa una mala homogeneización del contenido de carbón (brea).

Una semana posterior a la prueba, se observaron cambios en el alquitrán reposado en los contenedores. Mientras que el Alquitrán Americano conservó su homogeneidad, como se ve en la figura 18, el Alquitrán Nacional se tornó a una consistencia pastosa, además, con la presencia de cristales blancos en las paredes y tapas del contenedor, lo que significa que existió una evaporación prematura de sus compuestos volátiles.

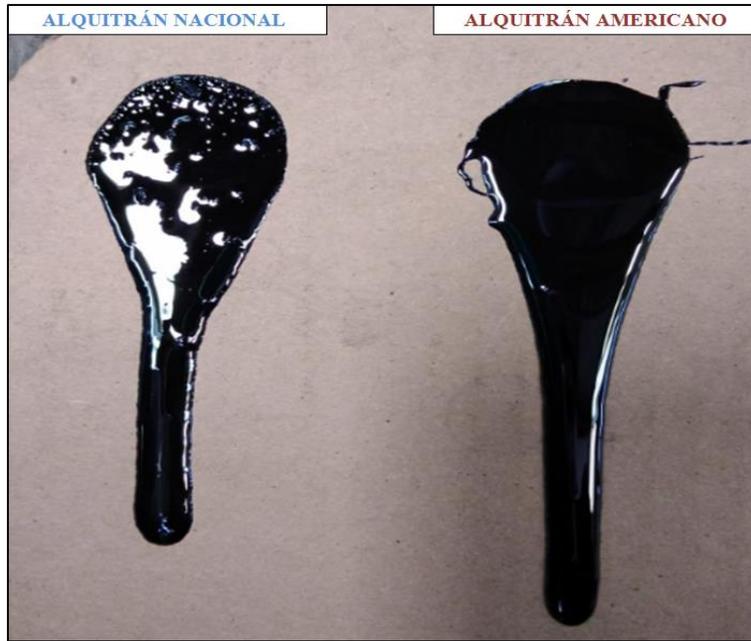


Figura 17. Fluidez y consistencia de los Alquitranes al día de prueba (Elaboración propia).

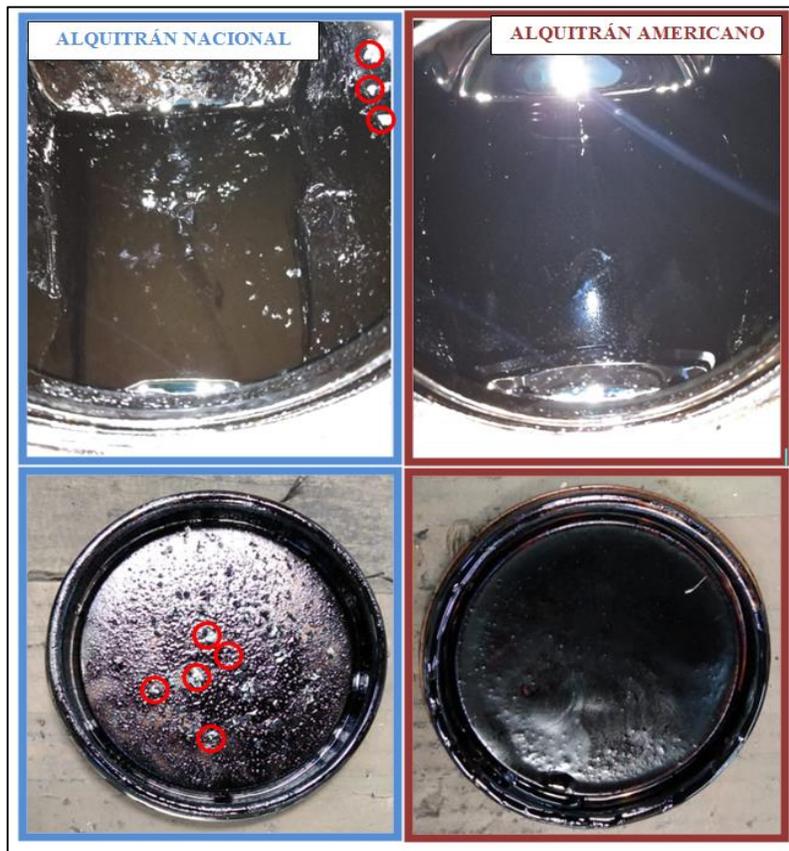


Figura 18. Consistencia de Alquitranes tras una semana del día de prueba (Elaboración propia).

Se encontró que pese a que las características físicas de ambos alquitranes son similares, existen dos dificultades en el uso del Alquitrán Nacional respecto al Alquitrán Americano: La primera es la mala homogeneidad del Alquitrán Nacional, ya que observando la figura 17, existen partículas de brea que no están totalmente integradas en la fase líquida, lo cual en el futuro puede provocar problemas por el contenido de liga carbonífera de un lote a otro, ya que estas partículas sedimentan sin el uso de un sistema de mezclado continuo; la segunda es la pérdida prematura de volátiles, que podemos observar en la figura 18, donde se notó la formación de cristales en la tapa y periferia del contenedor del Alquitrán Nacional. Estos cristales son producto de una evaporación prematura de la fase líquida (Volátiles) del alquitrán. La consecuencia de la pérdida de material volátil es una baja plasticidad, lo que se refleja en un Valor Marshall elevado y una corta longitud de piqueta, debido a que el material se reseca.

4.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MEZCLA SECA

Para la evaluación de las pruebas físicas se elaboraron 10 kg de tapón seco, 5 kg para cada tipo de alquitrán. La tabla número 3 muestra los compuestos típicos encontrados en el tapón MU-410 de la empresa CINASA. Los porcentajes químicos de dichos compuestos se determinaron teóricamente, a partir de las hojas técnicas de las materias primas empleadas para la fabricación del tapón, en sus respectivas fracciones, y el análisis químico de cada una por individual reportado por el proveedor.

ANÁLISIS QUÍMICO	
COMPUESTO	% TÍPICO
SiO ₂	10.60
SiC+Si ₃ N ₄	22.00
Al ₂ O ₃	52.50
Fe ₂ O ₃	1.00
TiO ₂	1.70

Otros	12.20
-------	-------

Tabla 3. Compuestos típicos del tapón MU-410.

Previo a la adición del alquitrán, se analizaron 3 muestras granulométricas, como lo indican las tablas 4 y 5. Lo reportado en dichas tablas es el porcentaje retenido sobre malla y su acumulado respectivo, de muestras de 100 g, de las cuales se obtuvieron los promedios, tabla 6, y el gráfico 1.

ALQUITRÁN NACIONAL						
Malla	PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3	
	% RETENIDO	% ACUMULADO	% RETENIDO	% ACUMULADO	% RETENIDO	% ACUMULADO
1	4	4	3.7	3.7	4.6	4.6
2	10.9	14.9	11.6	15.3	11.4	16
3	9.8	24.7	10	25.3	9.1	25.1
4	28	52.7	29	54.3	27.4	52.5
-4	47.3	100	45.7	100	47.5	100

Tabla 4. Pruebas granulométricas del tapón seco para la prueba con Alquitrán Nacional.

ALQUITRÁN AMERICANO						
Malla	PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3	
	% RETENIDO	% ACUMULADO	% RETENIDO	% ACUMULADO	% RETENIDO	% ACUMULADO
1	4.3	4.3	4.8	4.8	4.3	4.3
2	11.8	16.1	12.3	17.1	11.5	15.8
3	9.6	25.7	9.6	26.7	10.5	26.3
4	27.9	53.6	27.7	54.4	28.8	55.1
-4	46.4	100	45.6	100	44.9	100

Tabla 5. Pruebas granulométricas del tapón seco para la prueba con Alquitrán Americano.

Malla	ALQUITRÁN NACIONAL		ALQUITRÁN AMERICANO	
	PROMEDIO		PROMEDIO	
	% RETENIDO	% ACUMULADO	% RETENIDO	% ACUMULADO
1	4.10	4.10	4.47	4.47
2	11.30	15.40	11.87	16.33
3	9.63	25.03	9.90	26.23
4	28.13	53.17	28.13	54.37
-4	46.83	100.00	45.63	100.00

Tabla 6. Pruebas granulométricas promedio del tapón seco para pruebas con Alquitranes Americano y Nacional.

Esta prueba previa a la elaboración de las mezclas da una mayor seguridad de que estas se realizarán lo más semejante posible en la demanda de líquidos. De acuerdo con el gráfico 1, los porcentajes retenidos sobre malla y los porcentajes acumulados son muy similares entre sí, por lo que no habrá disparidad en las pruebas ocasionada por la distribución granulométrica. Las desviaciones estándar muestrales para los porcentajes retenidos sobre las mallas “1, 2, 3 ,4” y la base “-4”, con respecto a su media, son 0.4 g, 0.46 g, 0.47 g, 0.63 g y 1.02 g respectivamente. Estas pruebas realizadas comparando los resultados de las 6 muestras, de Alquitrán Americano y Alquitrán Nacional en conjunto, mostraron diferencias mínimas.

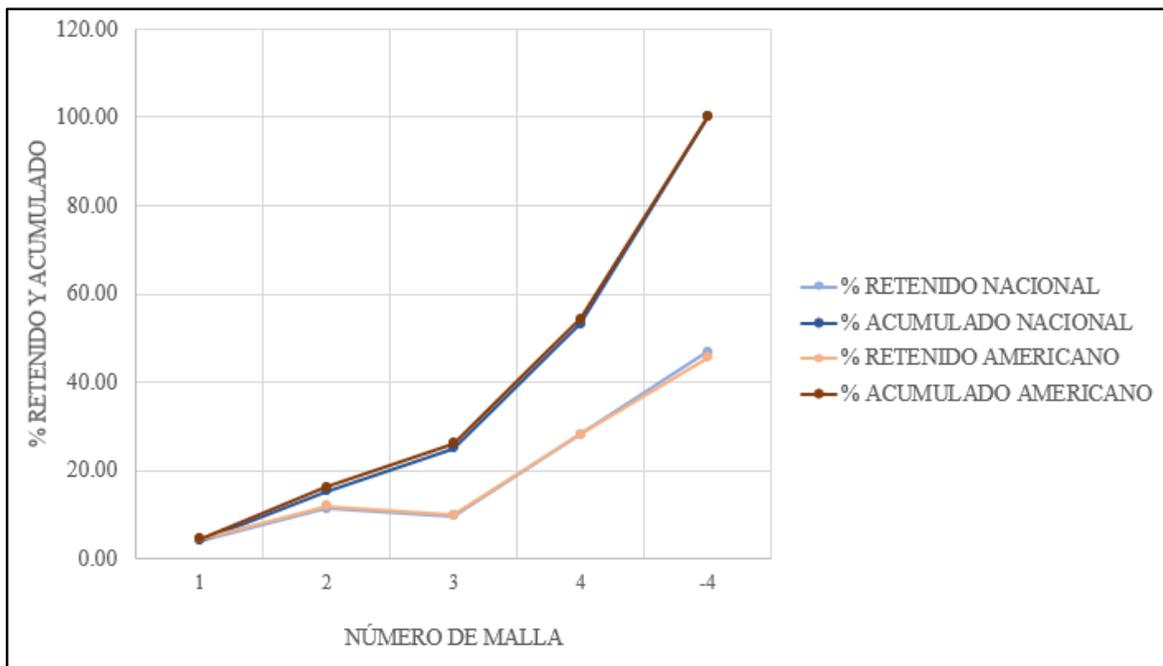


Gráfico 1. Comparación de las granulometrías retenidas sobre malla y acumuladas.

4.3 ANÁLISIS DEL MEZCLADO Y CONSISTENCIA FINAL

Cada muestra seca se mezcló con el 16% de su alquitrán respectivo (Nacional y Americano). La mezcla de grano seco y el alquitrán se mantuvieron a 60°C para evitar el enfriamiento y

endurecimiento del tapón. Se analizaron el comportamiento del mezclado y la consistencia de la mezcla final.

Durante el mezclado del Alquitrán Nacional la mezcladora tuvo dificultades pese al mantenimiento de la temperatura. La mezcla tuvo al final una consistencia granular, como se muestra en la figura 19, donde al tratar de amasar manualmente se notó la poca cohesión del material, por lo que no se ve homogénea. La falta de cohesión y poca plasticidad hacen entender que este tipo de material requerirá un mayor contenido de alquitrán para alcanzar la plasticidad deseada, lo que se traduce a un mayor costo de fabricación. Esto se comprobará más adelante con el cálculo del Valor Marshall. El Alquitrán Americano fue mezclado sin ninguna dificultad, y la integración manual de la mezcla fue mayor.



Figura 19. Consistencia de las mezclas de tapón (Elaboración propia).

4.4 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS BARRAS CONTRA ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA CINASA.

DATOS DE BARRAS EN MOLDEO					
PARÁMETRO		ALQUITRÁN NACIONAL			
		1	2	3	PROMEDIO
Largo	cm	14.48	14.25	14.40	14.38
Ancho	cm	3.69	3.70	3.69	3.69

Espesor	cm	3.02	3.06	3.11	3.06
Peso Moldeo	g	395.30	399.40	402.70	399.13
Densidad Teórica	g/cm ³	2.45	2.48	2.44	2.45
DATOS DE BARRAS DESPUÉS DE QUEMA A 1,350°C					
Largo	cm	14.40	14.33	14.44	14.39
Ancho	cm	3.74	3.76	3.74	3.75
Espesor	cm	3.14	3.18	3.20	3.17
Peso Seco	g	353.80	358.20	362.10	358.03
Peso Húmedo	g	387.20	391.80	395.00	391.33
Peso Suspendido	g	223.40	226.50	228.20	226.03
Volumen de Tina	cm ³	163.80	165.30	166.80	165.30
Densidad Teórica	g/cm ³	2.09	2.09	2.10	2.09
Densidad Aparente	g/cm ³	2.16	2.17	2.17	2.17
Porosidad Aparente	%	20.39	20.33	19.72	20.15
C. Lineal P.	%	-0.55	0.56	0.28	0.10
Volátiles (P.P.I.)	%	-10.50	-10.32	-10.08	-10.30
Lectura M.O.R.	kg _f	107.84	123.69	120.68	117.40
M.O.R.	kg _f /cm ²	43.87	48.80	47.27	46.64
Peso Muestra (P ₁)	g	100			
Peso Muestra (P ₂)	g	75.2			
CARBÓN FIJO	%	14.50			

Tabla 7. Datos de Barras del Alquitrán Nacional.

DATOS DE BARRAS EN MOLDEO					
PARÁMETRO		ALQUITRÁN AMERICANO			
		1	2	3	PROMEDIO
Largo	cm	14.71	14.32	14.59	14.54
Ancho	cm	3.70	3.70	3.71	3.70
Espesor	cm	2.94	2.98	2.83	2.92
Peso Moldeo	g	391.70	393.00	371.30	385.33

Densidad Teórica	g/cm ³	2.45	2.49	2.42	2.45
DATOS DE BARRAS DESPUÉS DE QUEMA A 1,350°C					
Largo	cm	14.68	14.72	14.81	14.74
Ancho	cm	3.76	3.70	3.78	3.75
Espesor	cm	3.10	3.12	2.97	3.06
Peso Seco	g	352.50	352.70	333.60	346.27
Peso Húmedo	g	383.70	384.60	364.40	377.57
Peso Suspendido	g	219.50	221.40	207.20	216.03
Volumen de Tina	cm ³	164.20	163.20	157.20	161.53
Densidad Teórica	g/cm ³	2.06	2.08	2.01	2.05
Densidad Aparente	g/cm ³	2.15	2.16	2.12	2.14
Porosidad Aparente	%	19.00	19.55	19.59	19.38
C. Lineal P.	%	-0.20	2.79	1.51	1.37
Volátiles (P.P.I.)	%	-10.01	-10.25	-10.15	-10.14
Lectura M.O.R.	kgf	126.83	131.26	113.76	123.95
M.O.R.	kgf/cm ²	52.65	54.67	51.18	52.83
Peso Muestra (P ₁)	g	100			
Peso Muestra (P ₂)	g	76.8			
CARBÓN FIJO	%	13.06			

Tabla 8. Datos de Barras del Alquitrán Americano.

Las tablas 7 y 8 presentan los datos recopilados de las barras y los cálculos correspondientes para determinar las propiedades físicas de estas y ser comparadas con los parámetros de aceptación de la empresa CINASA. Los datos de las gráficas siguientes muestran la comparación individual y promedio de las tres barras sometidas a prueba.

4.4.1 Densidad Aparente y Porosidad Aparente en Barras

De acuerdo con el gráfico 2, ambas Densidades Aparentes son muy parecidas entre sí, 2.17 g/cm³ en promedio del Alquitrán Nacional contra 2.14 g/cm³ en promedio del Alquitrán Americano, y con valores por arriba del límite central. El Alquitrán Nacional es ligeramente más denso que el Alquitrán Americano. El gráfico 3 muestra coherentemente que, debido a

la alta Densidad Aparente de las dos muestras, los valores de Porosidad Aparente se encuentran por debajo del límite central. El valor de Porosidad Aparente es mayor para el Alquitrán Nacional, 20.15 % contra 19.38 % del Alquitrán Americano, ambos en promedio.

De acuerdo con los valores mostrados, ambos alquitranes proveerán de una permeabilidad adecuada para el desahogo de los volátiles, sin riesgo de penetración del metal y escoria.

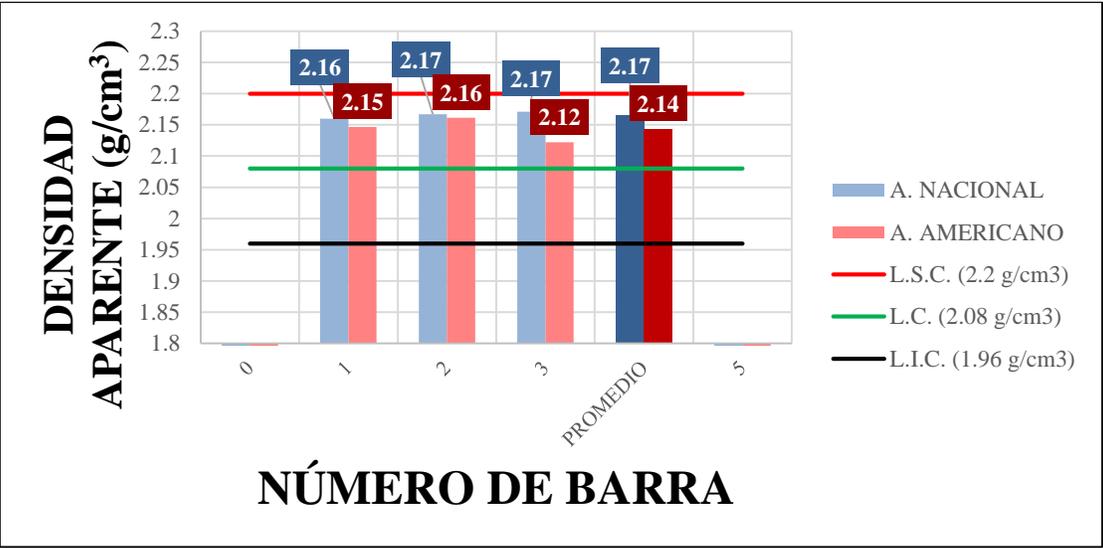


Gráfico 2. Densidad Aparente en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.

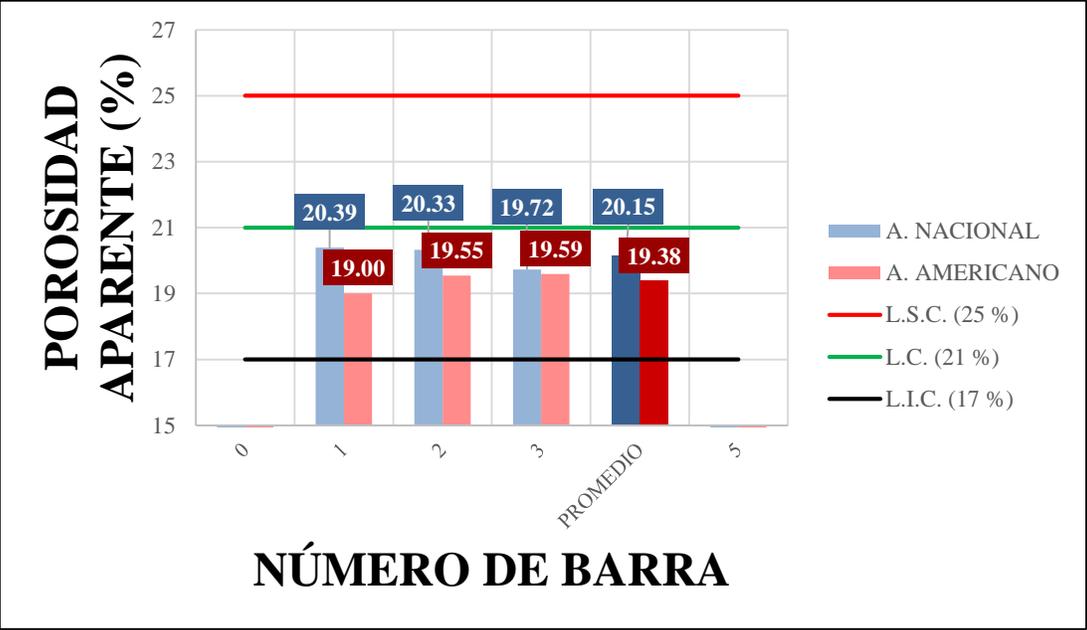


Gráfico 3. Porosidad Aparente en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.

4.4.2 Cambio Lineal Permanente en Barras

El Cambio Lineal Permanente mostrado en el gráfico 4, muestra en promedio, que el Alquitrán Americano tiene una mejor propiedad para sellar dentro de la piqueta, debido a su alto porcentaje de crecimiento, 1.37% en promedio, en comparación con el Alquitrán Nacional, 0.1 % en promedio. Incluso, como se puede ver en los datos de las primeras barras, de existir una contracción en el material, esta sería menor en el caso del Alquitrán Americano.

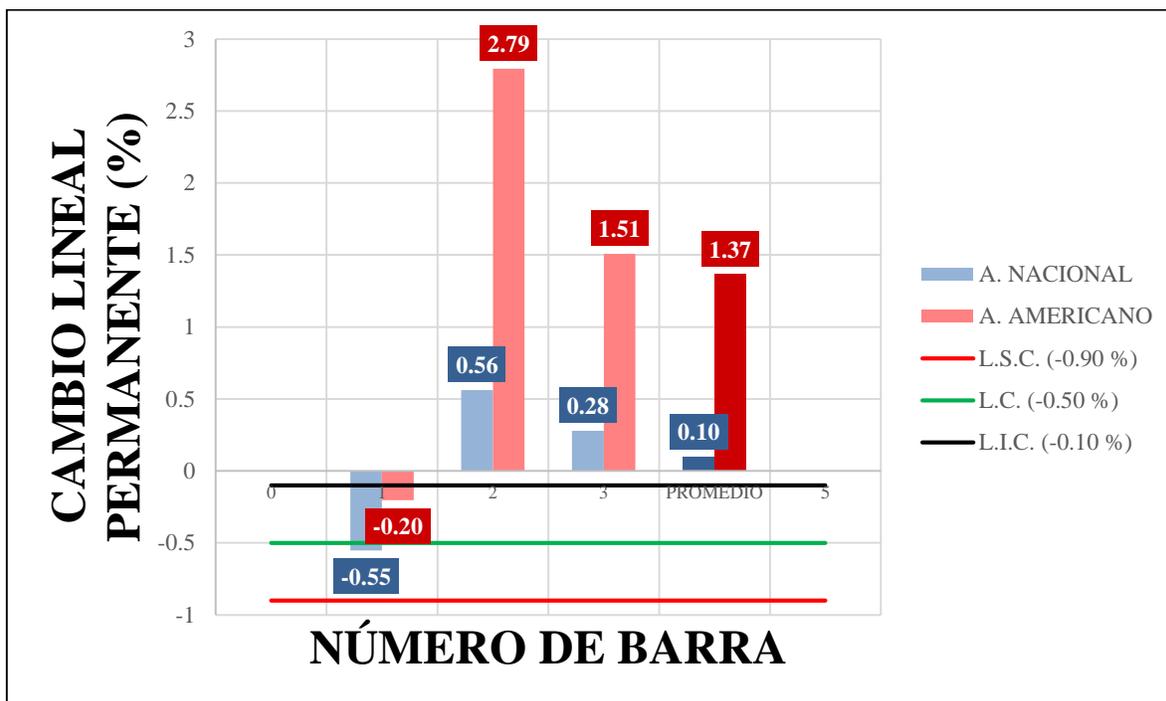


Gráfico 4. Cambio Lineal Permanente en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.

4.4.3 Volátiles (P.P.I.) y Porcentaje de Carbón Fijo (C.F.)

Los resultados de Volátiles (P.P.I.) mostrados en el gráfico 5 fueron similares para ambos tipos de alquitranes. Las barras perdieron en promedio para cada caso de Alquitrán, Nacional y Americano, el 10% en peso.

En cuanto al contenido de Carbón Fijo, el Alquitrán Americano tiene un valor promedio menor que el Nacional, como se observa en el gráfico 6, esto en teoría significaría un mayor

desarrollo de la liga carbonífera y un mayor M.O.R. El aumento en la cantidad de carbón puede deberse a la pérdida prematura de volátiles en el alquitrán Nacional, lo que causó un aumento en el porcentaje de carbón.

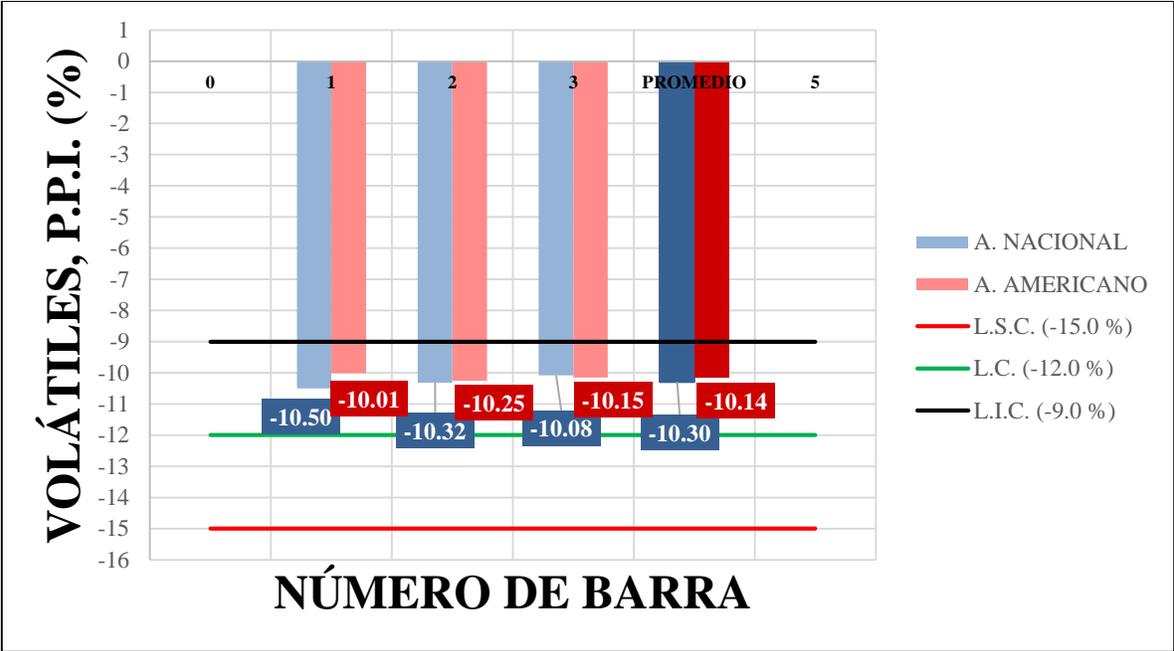


Gráfico 5. Volátiles (P.P.I.) en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.

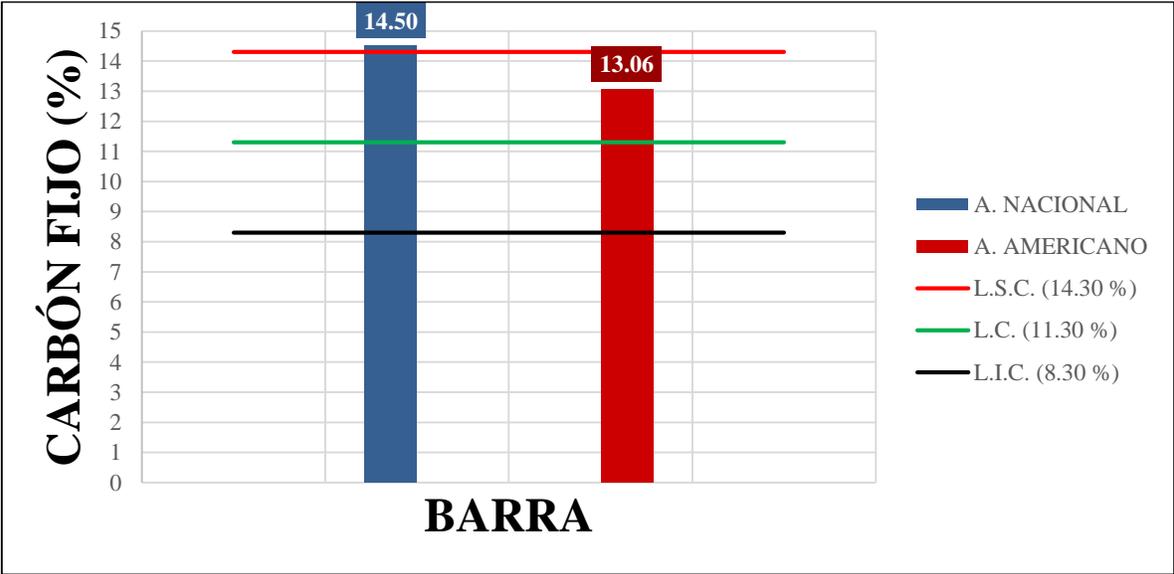


Gráfico 6. Carbón Fijo en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.

4.4.4 Módulo de Ruptura (M.O.R.) en Barras

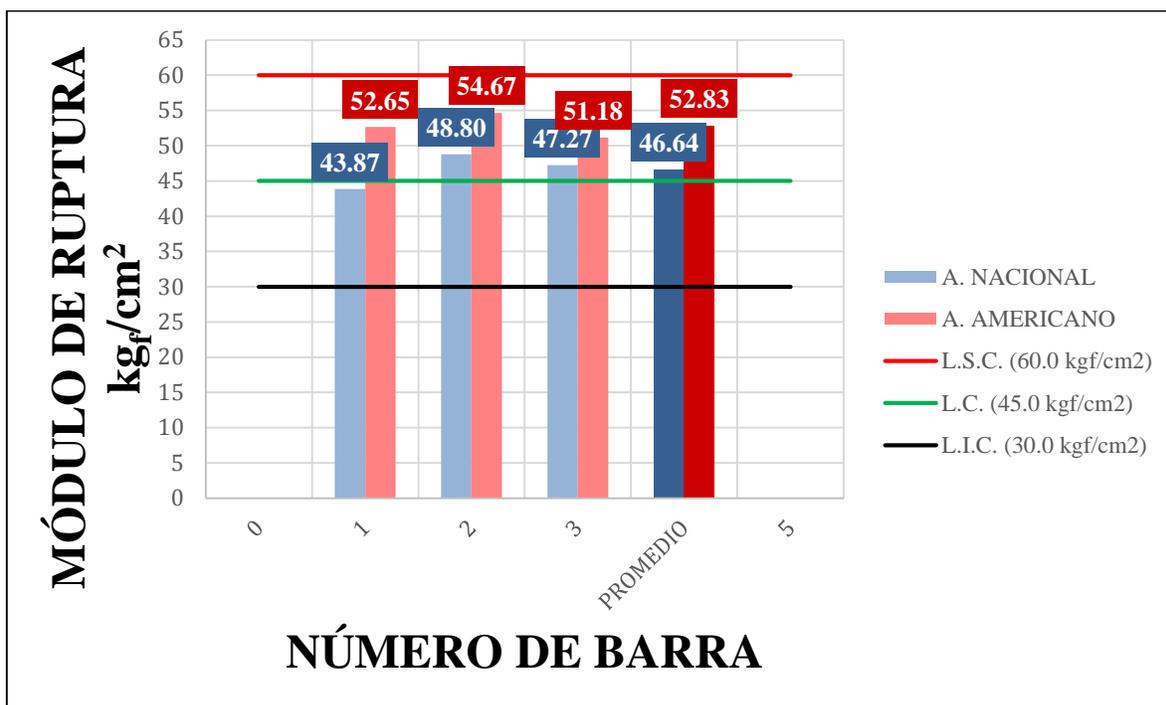


Gráfico 7. Módulo de Ruptura en Barras con Alquitranes Americano y Nacional.

A pesar de lo visto en el punto anterior, donde el contenido de carbón es mayor en el caso del Alquitrán Nacional, el Módulo de Ruptura observado en el gráfico 7 muestra que el desarrollo de la liga, reflejado en su resistencia mecánica, es mayor en el caso del Alquitrán Americano. En promedio, el M.O.R. del Alquitrán Americano está 6.29 unidades por arriba del Alquitrán Nacional, lo que significa que con el primero, se podrá fabricar un tapón con una mayor resistencia al paso del metal y escoria.

Lo anterior se debe al contenido de Insolubles en Tolueno (IT), mayores para el caso del Alquitrán Nacional, que hasta ahora no había sido un parámetro de aceptación y seguimiento de calidad del alquitrán para CINASA. Autores señalan a la mesofase como un precursor único para materiales avanzados de carbono, es obtenida de la carbonización controlada de breas de alquitrán o petróleo. Durante el tratamiento térmico de las breas en atmósfera inerte, los hidrocarburos aromáticos policondensados grandes (PAH) se forman debido a la descomposición térmica y las reacciones de polimerización. Los componentes volátiles también son removidos y finalmente los PAH son orientados en direcciones preferentes

dando un aumento a la formación de una fase anisotrópica dentro de una matriz isotrópica. Esta fase anisotrópica es la mesofase y tiene inicialmente una forma esférica. Estas esferas crecen y si la viscosidad del sistema cambia pueden coalescer llegando a formar la llamada mesofase granular. La mesofase carbonosa se genera a partir de agrupaciones de láminas de compuestos poliaromáticos que se disponen paralelamente entre sí por fuerzas de Van der Waals adoptando una configuración pre grafítica que se transformará en carbono grafítico a temperaturas más elevadas. **(Camporredondo, J., Martínez, R., García, A., Garza, M., y Sifuentes, C., 2012)**. Autores señalan que los IT, que son comúnmente partículas finas inorgánicas recubiertas por materia orgánica polar y aromática, pueden provocar el bloqueo y el ensuciamiento en el hidrocrqueo de lecho fijo y retrasar la generación de la esfera mesofásica en el proceso de carbonización. Como resultado, antes de la eliminación de los IT, los residuos de alquitrán de hulla no pueden romperse directamente en componentes de petróleo valiosos deseados en el hidrocrqueo de lecho fijo o aplicarse a la producción de varios materiales avanzados de carbono en el proceso de carbonización. De lo anterior se encuentra que la existencia de componentes de IT inhibe la formación de coque durante el hidrocrqueo en fase de suspensión **(Juntao, Du., et al., 2017)**.

Actualmente, y como consecuencia de los resultados del M.O.R. mostrados en este trabajo, CINASA se ha puesto en contacto con sus tecnólogos japoneses para establecer un parámetro máximo de aceptación en el contenido máximo de Insolubles en Tolueno en el Alquitrán de Hulla. El parámetro máximo permitido será de 15% en peso, para evitar efectos en el desarrollo de la liga carbonífera. Este parámetro, es únicamente cumplido por el alquitrán Americano.

4.4.5 Valor Marshall

Este valor representa la plasticidad de la muestra. De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 9, el Valor Marshall del Alquitrán Nacional tuvo un Valor aproximadamente tres veces mayor que el Alquitrán Americano. Lo anterior significa que la fabricación del tapón con Alquitrán Nacional podría demandar un mayor esfuerzo de los equipos de proceso, así como causar un mayor desgaste. De la misma forma, durante la aplicación en el Alto Horno, un tapón fabricado con Alquitrán Nacional podría tener problemas en lograr la longitud de piqueta deseada.

PARÁMETRO		ALQUITRÁN NACIONAL	ALQUITRÁN AMERICANO
		Valor Marshall	kgf/cm ²

Tabla 9. Valores Marshall de Tapón con alquitranes Americano y Nacional.

4.5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PASTILLAS CONTRA ESPECIFICACIONES DE LA EMPRESA “B”.

Las siguientes tablas, 10 y 11 muestran los valores físicos obtenidos a partir de pastillas de tapones fabricados con Alquitranes Americano y Nacional. Para facilitar los cálculos, se tomó como base el Sistema Internacional de Unidades (S.I.), posteriormente, los Valores de Densidad Aparente y C.C.S. se convirtieron de g/cm³ a lb/ft³ y kgf/cm² a lb/in², respectivamente, para poder realizar la comparación con los parámetros de aceptación de la empresa “B”.

DATOS DE PASTILLAS EN MOLDEO					
PARÁMETRO		ALQUITRÁN NACIONAL			
		1	2	3	PROMEDIO
Diámetro	cm	5.67	5.68	5.66	5.67
Espesor	cm	4.04	4.03	4.09	4.05
Área Transversal	cm ²	25.25	25.34	25.16	25.25
Peso Moldeo	g	249.60	249.90	249.80	249.77
Densidad teórica	g/cm ³	2.45	2.45	2.43	2.44
DATOS DE PASTILLAS DESPUÉS DE QUEMA A 2,000°F					
Diámetro	cm	5.74	5.76	5.74	5.75
Espesor	cm	4.12	4.07	4.16	4.12
Área Transversal	cm ²	25.88	26.06	25.88	25.94
Peso Seco	g	225.60	226.40	225.80	225.93
Peso Húmedo	g	246.00	246.30	246.20	246.17
Peso Suspendido	g	142.50	141.90	142.80	142.40
Volumen de Tina	cm ³	103.50	104.40	103.40	103.77

Densidad Teórica	g/cm ³	0.37	0.37	0.37	0.37
Densidad Aparente	g/cm ³	2.18	2.17	2.18	2.18
Porosidad	%	19.71	19.06	19.73	19.50
C. Diámetro P.	%	1.23	1.41	1.41	1.35
C. Volumétrico P.	%	4.51	3.86	4.61	4.33
Volátiles (P.P.I.)	%	-9.62	-9.40	-9.61	-9.54
Lectura C.C.S.	kg _f	3201.00	3130.00	3340.00	3223.67
C.C.S.	kg _f /cm ²	123.70	120.12	129.07	124.30

Tabla 10. Datos de Pastillas del Alquitrán Nacional.

DATOS DE PASTILLAS EN MOLDEO					
PARÁMETRO		ALQUITRÁN AMERICANO			
		1	2	3	PROMEDIO
Dimensión	cm	5.68	5.65	5.60	5.64
Espesor	cm	4.11	4.08	4.06	4.08
Área Transversal	cm	25.34	25.07	24.63	25.01
Peso Moldeo	g	251.10	250.20	250.50	250.60
Densidad Teórica	g/cm ³	2.41	2.45	2.51	2.45
DATOS DE PASTILLAS DESPUÉS DE QUEMA A 2,000°F					
Diámetro	cm	5.74	5.78	5.74	5.75
Espesor	cm	4.22	4.19	4.20	4.20
Área Transversal	cm	25.88	26.24	25.88	26.00
Peso Seco	g	225.80	225.00	225.00	225.27
Peso Húmedo	g	246.00	245.30	245.60	245.63
Peso Suspendido	g	142.40	142.20	141.40	142.00
Volumen de Tina	cm ³	103.60	103.10	104.20	103.63
Densidad Teórica	g/cm ³	0.36	0.35	0.36	0.36
Densidad Aparente	g/cm ³	2.18	2.18	2.16	2.17
Porosidad	%	19.50	19.69	19.77	19.65
C. Diámetro P.	%	1.06	2.30	2.50	1.95
C. Volumétrico P.	%	4.86	7.48	8.69	7.01

Volátiles (P.P.I.)	%	-10.08	-10.07	-10.18	-10.11
Lectura C.C.S.	kgf	3587.00	3754.00	3634.00	3658.33
C.C.S.	kgf/cm²	138.62	143.07	140.43	140.71

Tabla 11. Datos de Pastillas del Alquitrán Americano.

4.6.1 Densidad Aparente y Porosidad Aparente en Pastillas

De acuerdo con el gráfico 8, pese a que los valores de Densidad Aparente no tengan un parámetro de control en la empresa B, están fuertemente relacionados con el porcentaje de Porosidad Aparente deseado, ya que, si este es bajo, tendrá una alta Densidad Aparente. Tanto los parámetros de Densidad Aparente como de Porosidad Aparente son muy similares en promedio, en este último parámetro, ambos tipos cumplen con los criterios de la empresa “B”, la cual requiere una Porosidad Aparente debajo del 30%. Lo anterior significa que la permeabilidad con el uso de ambos tipos de alquitrán será la adecuada para su empleo en el Alto Horno de la empresa “B”.

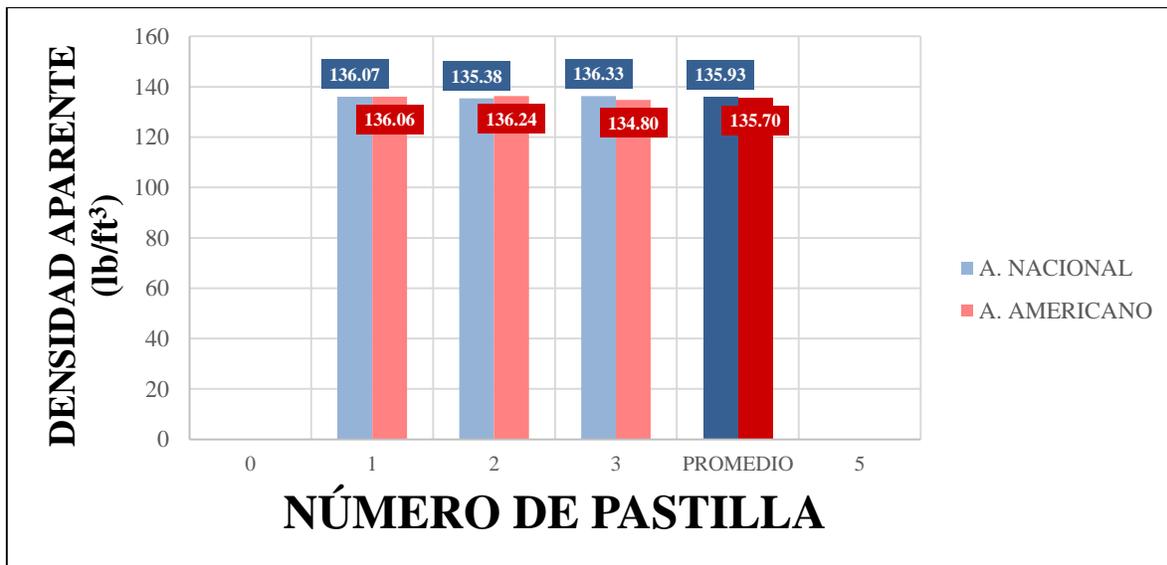


Gráfico 8. Densidad Aparente en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

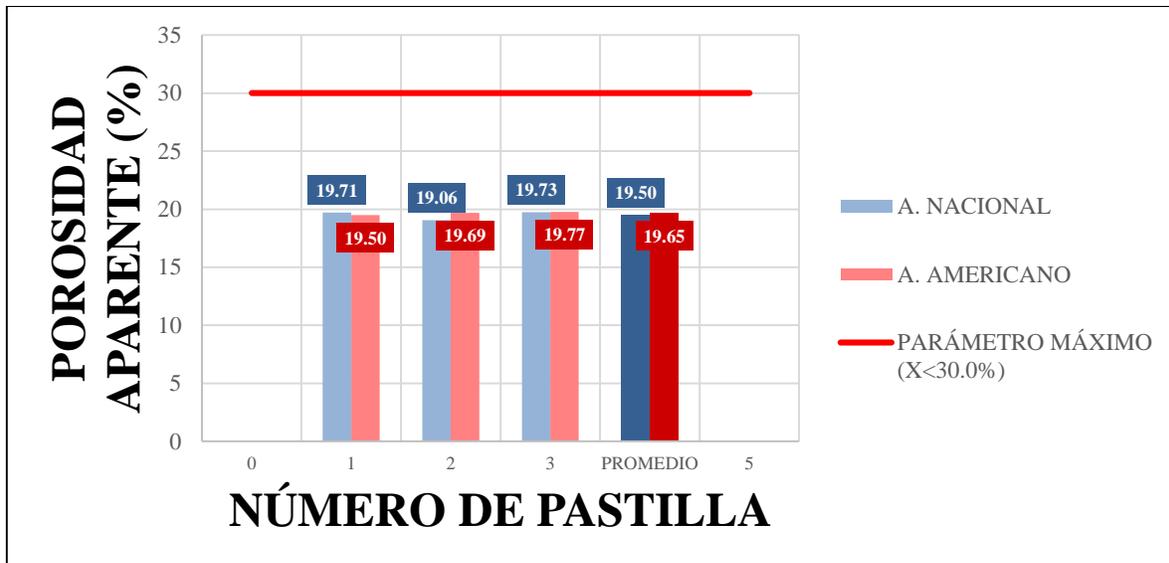


Gráfico 9. Porosidad Aparente en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

4.6.2 Cambio Diámetro Permanente en Pastillas

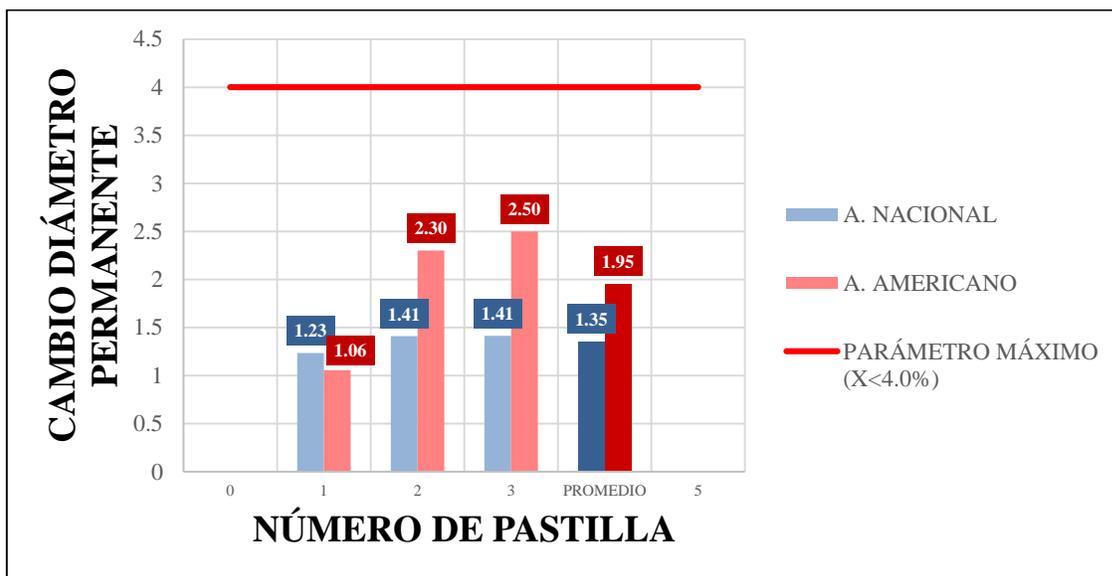


Gráfico 10. Cambio Diámetro Permanente en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

En este caso, la expansión lineal se mide a partir del cambio en la dimensión del diámetro. La empresa “B” busca una expansión no mayor al 4%. Ambos tipos de tapón cumplen con el parámetro. En el caso del tapón fabricado con Alquitrán Nacional tuvo una menor

expansión en promedio, 1.35 %, contra 1.95% promedio del tapón con Alquitrán Americano, como siempre, esto significa que el sellado dentro de la piquera será mejor con el uso del Alquitrán Americano.

4.6.2 Cambio Volumétrico en Pastillas

El Cambio Volumétrico implica el cambio en el volumen teórico de las pastillas, es decir el cambio en volumen basado en el aumento o decremento de las dimensiones, diámetro y altura, de las pastillas. Al igual que en el caso Cambio Lineal Permanente en barras, el Alquitrán Americano da un mayor aumento de volumen, 7.01 % en promedio, contra 4.33 % en promedio con el Alquitrán Nacional. Este parámetro no tiene especificaciones por parte de la empresa “B”, pero se usa como una referencia del crecimiento global.

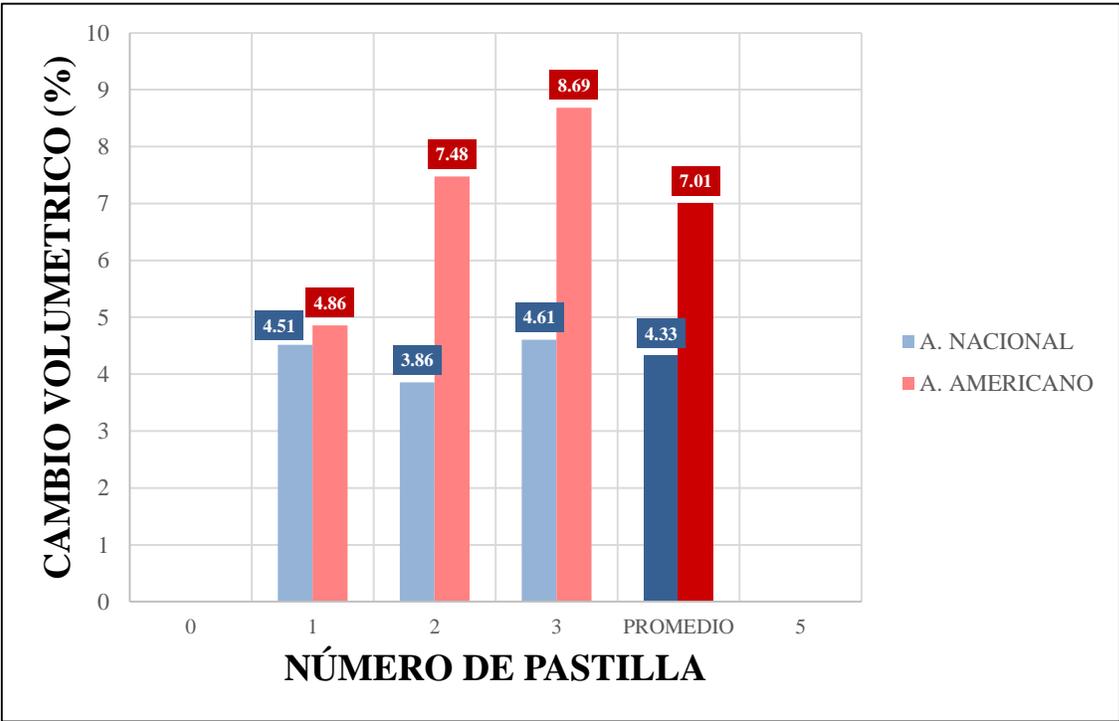


Gráfico 11. Cambio Volumétrico en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

4.5.3 Volátiles (P.P.I.) en Pastillas

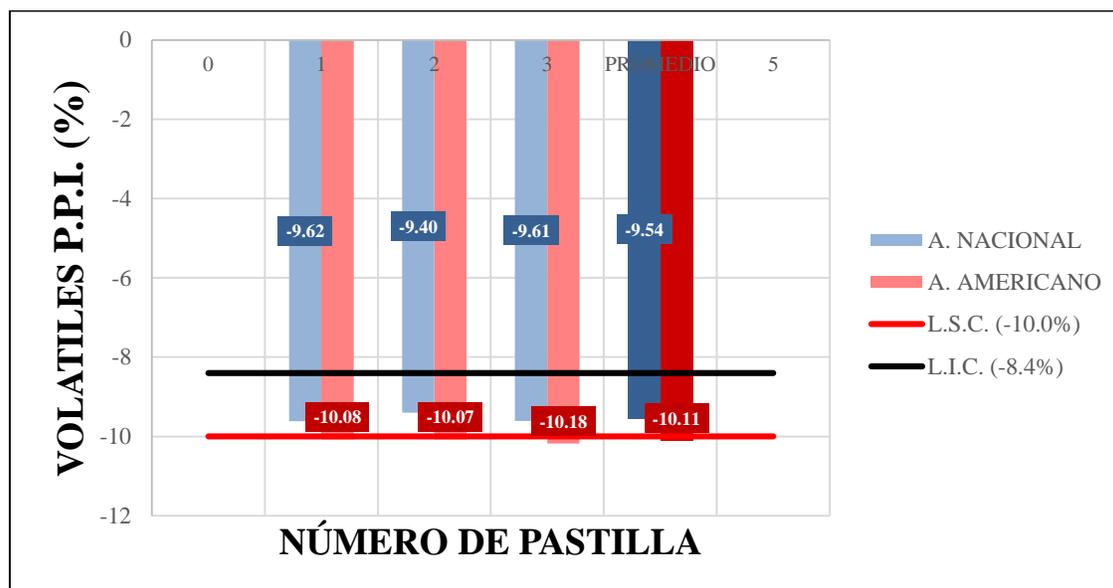


Gráfico 12. Volátiles (P.P.I.) en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

La pérdida de volátiles, de acuerdo con el gráfico 12, fue similar con el uso de los dos tipos de alquitrán, con una pérdida ligeramente mayor con el Alquitrán Americano, 10.11 % en promedio, contra 9.54 % en promedio con el uso del Alquitrán Nacional. El parámetro de pérdida, 8.5 -10 % es cumplido únicamente por el Alquitrán Nacional, mientras que el Alquitrán Americano está 0.11% arriba en promedio del parámetro superior permisible, por lo que este ya no es adecuado para el uso en el Alto Horno de la empresa B.

4.5.4 Resistencia a la Compresión (C.C.S.) en Pastillas

Los resultados expuestos en el gráfico 13 muestran nuevamente que el Alquitrán Nacional, tiene una Resistencia a la Compresión menor (1,767.91 lb_f/in² en promedio) en comparación con el Alquitrán Americano (2,002.31 lb_f/in² en promedio). En este caso, ambos tipos de tapón están fuera del parámetro máximo permisible, por lo que ninguno es capaz de cumplir con los requerimientos físicos del Alto Horno de la empresa “B”. El parámetro del C.C.S., análogo al M.O.R. en barras, simboliza el desarrollo de liga carbonífera.

Algunos autores consideran que, para un tapón tradicional, el ajuste del alquitrán de hulla puede cambiar la resistencia a la compresión a temperatura ambiente. La razón principal es

que el contenido de carbón en el alquitrán de hulla es bajo, por lo que la resistencia será baja de la misma manera. Incrementando la cantidad del aglutinante, el tapón puede mejorar su plasticidad, sin embargo, la resistencia se reduce (Jiang, T., Hwang, J., Masset, P., Yucel, O., Padilla, R., y Zhou, G., 2012). No obstante, como ya se observó en el punto 4.4.4 de este trabajo, el contenido de carbón no es el problema principal, ya que el desarrollo de la liga carbonífera se verá afectado si el contenido de Insolubles en Tolueno es alto.

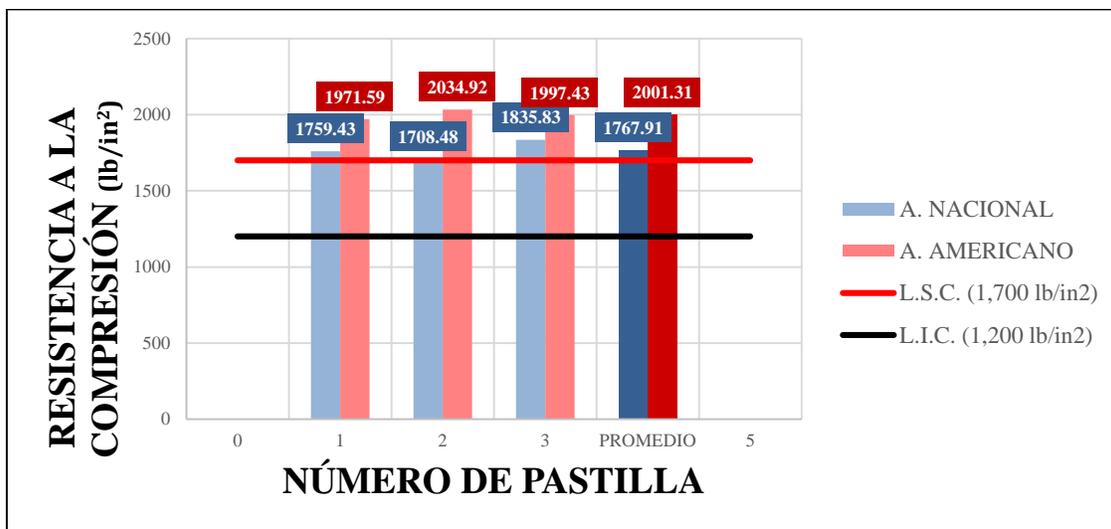


Gráfico 13. Resistencia a la Compresión en Pastillas con Alquitranes Americano y Nacional.

5 CONCLUSIONES

Con respecto a los parámetros cualitativos de la empresa CINASA:

- La apariencia principal de los dos tipos de alquitranes fue similar con respecto al color, y diferente de acuerdo con el aroma desprendido, ya que el Alquitrán Americano tenía un olor más profundo a aceite de creosota. El Alquitrán Americano demostró mejor fluidez que el Alquitrán Nacional. El Alquitrán Nacional presenta una falta de homogeneidad, debido a la presencia de partículas de brea que no estaban disueltas, lo que significa variaciones en la cantidad de liga carbonífera, además, la formación de cristales hace evidente la pérdida prematura de volátiles, lo cual implica una pérdida de la plasticidad del material.
- En la consistencia final del tapón fabricado con los dos tipos de alquitrán, el Alquitrán Americano dio buenas propiedades de penetración en los granos secos, ya que, con la misma cantidad de aglutinante, la plasticidad manual y la reintegración del tapón fue mejor que con el uso de Alquitrán Nacional, el cual no se reintegrará fácilmente al ser manipulado.

Con respecto a los parámetros físicos de la empresa CINASA, a partir de las barras:

- Los valores de Densidad Aparente y Porosidad del tapón refractario son muy similares entre sí, por lo que ambos tipos de tapón no tendrán problemas con la impermeabilidad al metal y desahogo de los gases.
- En cuanto al Cambio Lineal Permanente, el tapón fabricado con el Alquitrán Americano tiene una mayor expansión, por lo que asegura un mayor sellado en la piquera del Alto Horno.
- Los Volátiles (P.P.I.) en ambos alquitranes fueron, en promedio, similares, lo que es coherente con las tablas 1 y 2, donde se aprecia que el contenido total de destilados en la sección de 0 a 300 °C es similar en el caso de los dos alquitranes, 21.6% para el Nacional, y ligeramente más alto, 23.78 para el Americano.
- Para el contenido de Carbón Fijo, el tapón con Alquitrán Nacional tuvo un contenido mayor de carbón, comparado con el Alquitrán Americano, lo cual significaría una mayor formación de la liga carbonífera en el tapón con Alquitrán Nacional, sin embargo, los resultados visto en la resistencia mecánica, muestran que hubo una

mayor formación de la liga carbonífera en el tapón fabricado con Alquitrán Americano, ya que el M.O.R. fue más alto.

- En cuanto al Valor Marshall, la amplia diferencia entre los valores, donde el valor del Alquitrán Nacional fue mayor, fue provocado por una baja penetración del aglutinante en los granos de la mezcla seca. Para asegurar una plasticidad adecuada al parámetro 600-1,000 kg_t/cm² con el uso del Alquitrán Nacional se tendría que aumentar su consumo, lo cual afectará los costos del material final.
 - Se seleccionó al Alquitrán Americano para la fabricación del Tapón MU-410 debido a las ventajas que este ofreció en cuanto a consumo, plasticidad y formación de la liga carbonífera.

Con respecto a los parámetros físicos de la empresa B:

- Aunque los valores de Porosidad y Cambio Lineal Permanente fueron aceptables para los dos tipos de alquitranes, ninguno logró ser seleccionado debido al valor de la Resistencia a la Compresión por arriba del parámetro permisible. Se debe buscar otro tipo de alquitrán que pueda dar las características requeridas por la empresa B.

Con respecto a los resultados de M.O.R. y C.C.S.

- El déficit en el M.O.R. y del C.C.S., se debe al contenido de IT. Pese a que el contenido de Carbón Fijo fue más alto en el Alquitrán Nacional, la resistencia mecánica (y, por lo tanto, la formación de la liga carbonífera), fue mayor en el caso del Alquitrán Americano, el cual tiene un contenido menor (9.99%) que el Alquitrán Nacional (20.1%). Los IT provocan el ensuciamiento en el hidrocraqueo de lecho fijo y retrasan la generación de la esfera mesofásica en el proceso de carbonización, por lo cual se limita la formación de la liga carbonífera. Actualmente CINASA ha establecido en conjunto con sus tecnólogos, una especificación de 15% máximo en peso de IT para evitar problemas en la transformación de carbón a liga carbonífera.

REFERENCIAS

1. Asociación Latinoamericana del Acero. (agosto, 2019). América latina en cifras: 2019. Sao Paulo, Brasil.: Asociación Latinoamericana del Acero. Recuperado de: https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america_latina_en_cifras_2019_es-en_web.pdf
2. Calderys. (2021). Iron Making Tap-Hole. [Figura]. Recuperado de: <https://www.calderys.com/refractory-by-industry/ironmaking/tap-hole>
3. Cámara Nacional del Acero. (26 de abril, 2019). El acero en México: Infografía del panorama siderúrgico. Ciudad de México, México.: Cámara Nacional del Acero. Recuperado de: https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/infografia_canacero_2019.pdf
4. Cámara Nacional del Acero. (14 de junio, 2019). El acero en México: Siéntete orgulloso de tu industria siderúrgica. Ciudad de México, México.: Cámara Nacional del Acero. Recuperado de: https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/folleto_siderurgia_y_desarrollo_sustentable_web_2017.pdf
5. Camporredondo, J., Martínez, R., García, A., Garza, M., y Sifuentes, C., (2012). Contribuciones fundamentales para el desarrollo tecnológico de materiales avanzados de carbono a partir de alquitrán de hulla. PROSPECTIVA. Vol. (10), No. 2, pp. 7-12.
6. Coarrubias, H., Sáenz, A., y Castañeda, A. (2016). Resinas termoestables de fenol-formaldehído. Revista Iberoamericana de Polímeros. 17(6).
7. Comsol. (2021). Thermal Analysis Measures Blistering Heat. [Figura]. Recuperado de: <https://www.comsol.com/blogs/thermal-analysis-measures-blistering-heat/>
8. Cromtek. (s.f.). Así funciona un tamiz Ro-Tap. [Figura]. Recuperado de: <https://www.cromtek.cl/2020/12/23/asi-funciona-un-tamiz-ro-tap/>
9. Davila, F. (2009). Desarrollo de una tecnología refractaria basada en MgO-CaZrO₃ reforzado con hemicita para hornos refractarios de cemento. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León.
10. Delabre, Ph., Doufour, A., Guenard, C., Hitier, B., Hubert., P., Le, I., y Venturini, M. (1991). Taphole Mud: A refractory key for Control of Blast Furnace Casting

- Conditions. United International Technical Conference of Refractories (UNITERC). Congreso llevado a cabo en Aachen, Germany.
11. Encyclopaedia Britannica. (2019). Blast Furnace. Chicago, IL, Estados Unidos de América.: Encyclopaedia Britannica. Recuperado de: <https://www.britannica.com/technology/blast-furnace>
 12. Frank Bacon. (s.f.). Máquina de prueba Tinius Olsen Super L de 60 K. [Figura]. Recuperado de: <https://frankbacon.com/product/60-k-tinius-olsen-super-l-3-testing-machine/>
 13. Geyer, P., y Halifa, Z. (2014). Blast furnace tapping practice at ArcelorMittal South Africa, Vanderbijlpark Works. [Figura]. Recuperado de: <https://www.saimm.co.za/Conferences/FurnaceTapping/097-Geyer.pdf>
 14. Han, F., Xue, W., y Huang, X. (2012). Effects of Si-SiC additives on properties of taphole clay. *Advanced Materials Research*.418-420(2012), pp 660-664.
 15. INFOACERO. (s.f.). Catálogo Fotográfico (Altos Hornos). [Figura]. Recuperado de: https://www.infoacero.cl/catalogo/csh100_103.htm
 16. Jiang, T., Hwang, J., Masset, P., Yucel, O., Padilla, R., y Zhou, G. (2012). Study and Application of the Taphole Clay with High Strength and Environment-Friendly in a New Blast Furnace with 3,800 m³ Volume. 3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. The Minerals, Metals and Materials Society (TMS). Orlando, Florida, U.S.A.
 17. Juntao, Du., et al. (2017). Structural and compositional evolution of coal tar insoluble during slurry-phase hydrocracking. *Fuel* Vol. 203. No. 2017, pp 352-359.
 18. Liu, X., Fang, M., Liu, Y., Qian, Z., Ding, H., y Huang, Z. (2014). Fe-Sialon-Ti(CN) composites from carbothermal reduction-nitridation of low-priced minerals and their application in taphole clay refractories. *Ceramics International*. 40(2014). 9709-9714.
 19. Norma ASTM C133-97, 2017 (Re aprobada 2015). Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, West Conshohocken, PA, 2017.
 20. Norma ASTM C179-14, 2017. “Drying and Firing Linear Change of Refractory Plastic and Ramming Mix Specimens. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, West Conshohocken, PA, 2017.

21. Norma ASTM C20, 2017. “Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water”. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, West Conshohocken, PA, 2017.
22. Saint Gobain. (s.f.). Performance Ceramics & Refractories. [Figura]. Recuperado de: <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/solutions/iron-making>
23. Sako E., Galesi, D., Leao, 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. Association of Iron & Steel Technology (AIST). Recuperado de: https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social_Media/18_mar_TapholeClay.pdf
24. Sako E., Galesi, D., Leao, 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. Association of Iron & Steel Technology (AIST). [Figura]. Recuperado de: https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social_Media/18_mar_TapholeClay.pdf
25. Secretaría de Economía. (2018). Coordinación General de Minería: Perfil del Mercado del Hierro – Acero. Ciudad de México, México.: Secretaría de Economía. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419274/Perfil_Hierro_y_el_Acero_2018__T_.pdf
26. Smruti, D. (2009). Development of Improved Tap Hole Clay for Blast Furnace Tap Hole. Tesis de Maestría. Instituto Nacional de Tecnología, Rourkela. Odisha, India.
27. Stevenson, P., y He, Q. (2004). Slug flow in a blast furnace taphole. Chemical Engineering and Processing. 44(2005), pp 1094-1097.
28. Sugita, K., y Shinohara, Y. (1983). Refractories Technology for Blast furnace tapholes and troughs. Interceram journal, Special Issue.
29. Tapping Measuring Technology. (2018). TMT-Tapping Measuring Technology. [Figura]. Recuperado de: <http://www.paulwurth.com/The-Group/International-Presence/Europe/TMT-Tapping-Measuring-Technology>
30. Tecnoalex. (s.f.). Obtención del Hierro (El Alto Horno). [Figura]. Recuperado de: <https://tecnoalex.weebly.com/obtencioacuten-del-hierro-y-el-acero.html>

31. United States Steel. (1971). *The Making, Shaping and Treating of Steel* (pp. 422, 424, 426, 445, 454 – 455). Pittsburgh, Pennsylvania.
32. Wang, L., Yin, Y., Qiu, W., Liang, Y., Ruan, G., y Zhao, L. (2017). Effects of Pitch Addition on the Properties of environmental-friendly tap-hole clay. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 125(1), pp, 12-18.
33. World Steel Association. (2020). *About Steel*. Brussels, Belgium. World Steel Association. Recuperado de: <https://www.worldsteel.org/about-steel.html>