

OPINIÓN DEL TUTOR DEL TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO: OBTENCIÓN DE FUNCIONES DE APROXIMACIÓN PARA DETERMINAR EL DESGASTE REFRACTARIO EN EL HORNO DE REVERBERO DE LA UEB COLADA DE COBRE.

Autor: *Daniel Pérez Días*

Tutor: *MSc. Osmel Martínez Valdés.*

Ing. Alejandro Ricardo García

Los tutores del presente trabajo de diploma consideramos que durante la ejecución del mismo, el diplomante demostró tener muy altas cualidades para desempeñarse como ingeniero en el sector metalúrgico y darle respuesta a los problemas profesionales que se le presenten.

Entre las cualidades a destacar están el alto grado de independencia, su alto nivel de responsabilidad y laboriosidad en la ejecución de las diferentes partes que componen la Tesis, en los plazos planificados, así como en la conformación del texto del trabajo. Fue capaz de ir dando respuesta a las diferentes dificultades que se fueron presentando.

Para el desarrollo del trabajo tuvo que profundizar en temas como la utilización de revestimientos refractarios en el proceso de fundición de cobre, sus características y los factores que influyen en el desgaste de los mismos. Fue necesario además dar seguimiento a 1 campaña productiva en la UEB Colada de Cobre, requiriéndose de gran dedicación teniendo en cuenta las dificultades tecnológicas existentes en la misma.

En el desarrollo de los cálculos utiliza acertadamente las herramientas informáticas y profundiza en la búsqueda bibliográfica y el uso de INTERNET. Para ello se hizo necesario la actualización del sistema computacional SIAR v2.0 teniendo en cuenta las condiciones actuales del revestimiento del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre. Obteniéndose funciones de aproximación para determinar el desgaste refractario de la capa de trabajo que pueden servir de base para una herramienta que permita conocer los momentos oportunos para la reparación o demolición del revestimiento, aprovechando mejor su período de vida útil.

El trabajo desarrollado reviste gran importancia teniendo en cuenta las nuevas políticas del país de desarrollo económico a partir del ahorro y mejor utilización de los recursos con los que contamos y esta herramienta pudiera evitar las costosas averías que se han producido por inadecuadas decisiones con respecto al estado del revestimiento.

Por todo lo anteriormente expresado consideramos que el diplomante está apto para ejercer como Ingeniero metalúrgico; y proponemos que se le otorgue al Trabajo de Diploma la calificación de 5 puntos.

MSc. Osmel Martínez Valdés

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Osmel Martínez Valdés', written in a cursive style.



**Instituto Superior Politécnico
"José Antonio Echeverría"
Facultad de Ingeniería Mecánica
Unidad Docente Metalúrgica
Ingeniería Metalúrgica**



Trabajo de Diploma

**“OBTENCIÓN DE FUNCIONES DE APROXIMACIÓN
PARA DETERMINAR EL DESGASTE REFRACTARIO
EN EL HORNO DE REVERBERO DE LA UEB COLADA
DE COBRE”.**

Autor: Daniel Pérez Díaz

Tutores: MSc. Osmel Martínez Valdés.

Ing. Alejandro Ricardo García.

La Habana, 2014

Dedicatoria.

Dedico todo mi sacrificio y esfuerzo reflejado en este trabajo de diploma a mi mamá Derelis Díaz Díaz, por su paciencia amor y cariño, a mi querido abuelo Feliciano Díaz Echenique, que desafortunadamente hoy no está, a mi padrastro, por guiarme siempre por el buen camino, a mi esposa por enseñarme lo que es amar y a mi hermana, por demostrarme lo que es valor. A mis otros hermanos que me han dado vida al estar en las buenas y las malas conmigo. En fin, dedico mi tesis a mi familia, porque siempre estarán ahí para mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que han hecho posible la culminación de este Trabajo de Diploma; en especial a mis tutores; el MSc. Osmel Martínez Valdez y el Ing. Alejandro Ricardo García, que han sido los encargados de orientarme y apoyarme durante todo el desarrollo de la tesis.

A todos los profesores que directa o indirectamente han contribuido con mi formación como futuro profesional y en especial al MSc. Vicente Robinson.

Además, agradezco a todas esas personas que considero mis amigos por entenderme y escucharme cuando más los necesité.

A todos, muchas gracias.

Resumen

El presente trabajo trata sobre la obtención de funciones de aproximación para determinar el desgaste refractario de las paredes de trabajo del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre. Se realiza además un diagnóstico de la situación existente en la UEB Colada de Cobre referente a la explotación del horno de reverbero encargado de realizar la fusión de chatarra de cobre.

Para la creación de las datas necesarias para la obtención de las funciones de aproximación, se realizó el seguimiento de 1 campaña de producción de la UEB mencionada, donde se monitorea la temperatura del metal en el horno y en diferentes puntos con el objetivo de relacionar estas temperaturas con el espesor del revestimiento refractario del agregado, para lo que también se obtienen los perfiles de desgastes del mismo.

Con la ayuda del sistema computacional *SIAR v2.0*, el cual está destinado al diseño del revestimiento refractario de agregados metalúrgicos y el sistema estadístico *STATGRAPHICS Plus 5.0*, se obtienen las funciones de aproximación para determinar el desgaste refractario de la pared de trabajo. Que sirva de base para elaborar una herramienta a los tecnólogos de la UEB que sea capaz de determinar el retiro del revestimiento refractario, además de saber el momento oportuno para la reparación o demolición y para aprovechar mejor el revestimiento y evitar las averías.

Abstract

This work deals with obtainment of approximation functions to determine the thickness on the refractory used in the working walls of the furnace existing in the UEB Colada de Cobre. In this work we carried out a study about the refractory's characteristics and the factors that impact in the life cycle of the refractory used in the furnace of UEB Colada de Cobre. We also carried out a diagnosis of the present situation in the UEB Colada de Cobre, related to the furnace exploitation in the metallurgist process making plant.

Its objective is to create a data base to obtain the approximation functions to estimate the thickness residual of the furnace wall of the UEB Colada de Cobre. Then the necessary data are taken for the future creation of the approximation functions through this *SIAR v2.0* and *STATGRAPHICS Plus 5.0* computing programs.

Índice

Introducción.....	1
CAPÍTULO I: Diagnóstico de la explotación del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.....	8
1.1 Características de fusión de concentrados de cobre en los hornos de reverberos.....	8
1.1.1 Estructura de los hornos de reverberos.....	10
1.2 Características de materiales refractarios para la construcción de hornos.....	16
1.3 Descripción de la UEB Colada de Cobre.....	17
1.4 Características del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.....	19
1.5 Descripción de los materiales refractarios utilizados en la construcción del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.....	22
1.6 Estructura del horno reverbero de la UEB Colada de Cobre.....	25
CAPÍTULO II: Fundamentos teórico-prácticos empleados para la elaboración del método de determinación de desgaste refractario.....	31
2.1 Métodos para la determinación del espesor del revestimiento refractario a partir de las temperaturas interiores y exteriores.....	33
2.2 Identificación de las zonas de desgastes.....	35
2.3 Bases para la propuesta.....	36
CAPÍTULO III: Propuesta del método para obtener las funciones de aproximación.....	44
3.1 Elementos del análisis de regresión.....	44

3.1.1 Clasificación de las ecuaciones de regresión.....	46
3.1.1 Clasificación de las ecuaciones de regresión.....	49
3.2 Procesamiento de la data experimental para la búsqueda de las funciones de aproximación.....	51
3.3 Análisis económico.....	55
3.4 Análisis ambiental.....	56
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	60
Referencia bibliográfica.....	61
Bibliografía.....	64
Anexos.....	67

Introducción

El cobre es una de las materias primas con mayor uso industrial, siendo el tercer metal, después del hierro y aluminio, más consumido en el mundo. Como tal tiene múltiples aplicaciones, esto es atribuible a su disponibilidad y capacidad de reciclaje, así son sus propiedades metálicas que hacen del cobre un excelente conductor de calor y electricidad, resistente a los antimicrobianos y la corrosión. Aportando también propiedades como elemento aleante, formando aleaciones para mejorar las prestaciones mecánicas (maquinabilidad, ductilidad y maleabilidad) y resistente a la corrosión y oxidación.

Las producciones de materiales metálicos de cobre como cables eléctricos (tanto de uso industrial como residencial, conductores de cobre en numerosos equipos eléctricos como generadores, motores y transformadores), componentes de coches y camiones (principalmente los radiadores, frenos y cojinetes), redes de transporte de agua (hechas de cobre o latón), etc, se obtiene a través de dos formas, reducción a partir de minerales y fusión de chatarra.

Siendo la última la más expandida, debido al alto precio del mineral de cobre (US \$6,674.00/Ton de mineral por US \$3,950.00/Ton de chatarra) [10], [16], además de ser un recurso renovable, el cobre reciclado tiene las mismas características químicas, físicas y tecnológicas que el cobre primario. En consecuencia, no sufre pérdidas de rendimiento ni tiene limitaciones para ser reutilizado. La fusión de la chatarra de cobre permite reciclar un material y utilizarlo para crear cualquier objeto, desde una joya hasta un alambre de cobre. Sin embargo, para fundir el metal se necesita aplicar una gran cantidad de calor para grandes cantidades de cobre empleando un horno, proporcionando este calor suficiente. No obstante, es peligroso lidiar con ese nivel de temperaturas, así que por razones de seguridad, como así también para lograr una fusión eficaz, es necesario seguir algunos pasos específicos.

La fusión tanto por mineral como por chatarra se puede realizar en hornos de reverberos, hornos de inducción, hornos de arco eléctricos, hornos de cuba, etc. Para lograr un buen empleo de estos hornos deben contar con requerimientos que son imprescindibles para su buena explotación, por mencionar alguno se destaca: alto nivel de aseguramiento refractario como medio de seguridad y parámetro económico.

Debido a que históricamente no ha existido estabilidad en el uso correcto de los aseguramientos refractarios de dichos agregados. Existen grandes deficiencias en la producción y aumento del índice económico, debido a los daños ocasionados por mal uso como: mal procedimiento a la hora de la carga, pérdida de calor producido por el agregado y bajo rendimiento del agregado, además de prolongación del período de fusión.

Aunque se han realizado numerosos cambios interesantes en el uso de diferentes marcas y tipos de refractarios con buenos resultados en los períodos de pruebas y seguimiento, no se han obtenido los resultados que se requieren para este tipo de producción, debido a la situación tan cambiante que presenta el mercado internacional en la actualidad.

En el caso de los hornos de reverberos que son un tipo de horno generalmente rectangular, cubierto por una bóveda de ladrillo refractario y con chimenea, la cual refleja (o reverbera) el calor producido en un sitio independiente del hogar donde se hace la fusión. En estos hornos el combustible no está en contacto directo con el contenido, sino que lo calienta por medio de una llama insuflada sobre él desde otra cámara; siendo por tanto el calentamiento indirecto. Es uno de los hornos más utilizados para realizar la fusión de la chatarra de cobre y separar la escoria, así como para la fundición de mineral y el refinado [9].

Estos hornos requieren de paredes compuestas de múltiples capas de materiales refractarios y aislantes que sean capaces de disminuir los déficits en los índices productivos, averías innecesarias que conlleven a la paralización del mismo y de la producción, mayor consumo energético y mayor costo de producción. Algunos de los refractarios empleados en estos hornos son: ladrillos Dinas, ladrillos de Alúmina, ladrillos de Magnesita y de Cromo-Magnesia.

En el caso de Cuba existen producciones de cobre, elaborados por la Empresa de Conductores Eléctricos “Conrado Benítez” (ELEKA), única en su tipo en el país. La misma está constituida por siete Unidades Empresariales de Base (UEB), de ellas cinco son productivas, donde una es la UEB Colada de Cobre, concebida con el fin de producir alambro de cobre térmico con un alto nivel de pureza; este material se convirtió en el principal renglón exportable de la Empresa de Conductores Eléctricos (ECE) “Conrado Benítez” por la calidad que presenta.

Para lograr la UEB sus objetivos, cuenta con una tecnología de avanzada que integra un horno de reverbero de 50 toneladas de capacidad la cual se emplea en la fusión y refinación de la chatarra de cobre, una máquina de vaciado continuo de 5tn/h de productividad y su tren de laminación.

En el caso del horno de reverbero está presentando problemas con el revestimiento refractario (paredes refractarias) provocando pérdidas de grandes cantidades de calor, prolongación del período de fusión, aumento de los consumos de combustibles conllevando todo esto a crear afectaciones de la productibilidad de la UEB Colada de Cobre. Respecto a este proceso, una de las problemáticas que más preocupa a los directivos, tecnólogos y jefes de brigadas de la UEB Colada de Cobre, es la determinación del espesor residual del revestimiento refractario de trabajo en el horno de reverbero para continuar en operación sin afectar el proceso productivo.

El control de este parámetro proporciona la disminución de averías, las cuales, en ocasiones, pueden ser fatales para el propio agregado dejándolo inutilizado. También pueden afectar otros equipos que funcionen de conjunto en el proceso, causando grandes pérdidas económicas y de tiempo por paros y reparaciones. En estos momentos esta determinación se toma visualmente y depende de la experiencia de los tecnólogos o jefes de brigadas, pero existen descorches que se hacen muy difíciles de detectar, por no existir puntos de referencias.

La no existencia de un método seguro para determinar el desgaste refractario en las condiciones de operación del agregado, considerando el período de explotación y los regímenes de trabajo a partir de la colada o estado del refractario, es recomendable retirar el mismo para su reparación o demolición y se eviten averías por errores de decisión, lo cual constituye **la situación problemática** de la investigación.

A partir de la situación problemática expuesta anteriormente se plantea el siguiente **problema científico** de la investigación: ¿Cómo estimar el desgaste de las paredes de trabajo del horno de reverbero de fusión de cobre de la UEB Colada de Cobre?

Objeto de estudio: El proceso de diseño de revestimiento refractario de los hornos de reverbero de fusión de cobre.

Campo de acción: El proceso de desgaste del revestimiento refractario en la UEB Colada de Cobre.

Objetivo. Elaborar funciones de aproximación para estimar el espesor residual de las paredes de trabajo del horno de reverbero de fusión de cobre a partir de la toma de la temperatura externa e interna.

Hipótesis: Si se utiliza una función de aproximación que relacione la temperatura externa e interna del horno de reverbero y el espesor del revestimiento refractario, se podrá obtener un procedimiento para determinar el espesor residual de las paredes de trabajo, para así conocer el momento oportuno de la reparación capital del agregado.

Variable independiente: correlación de la temperatura externa e interna del agregado.

Variable dependiente: método para estimar el espesor residual de las paredes.

Las **tareas a desarrollar** son las siguientes:

1. Estudio de los fundamentos teóricos-prácticos del proceso de revestido del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.
2. Estudio de los fundamentos de los procesos de desgaste del revestimiento del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.
3. Elaboración del diseño experimental para la toma de datos asociados al comportamiento del desgaste durante la operación del agregado.
4. Generación de las funciones de aproximación.
5. Evaluación de los resultados.

Para este estudio se proponen los siguientes **métodos científicos**:

Métodos teóricos.

- ✓ **Histórico - lógico:** Se utilizó en el estudio de los antecedentes históricos-metodológicos y conceptuales relacionados con el objeto de estudio, su desarrollo y evolución, así como las tendencias actuales en los hornos de reverbero.

- ✓ **Análisis – síntesis:** Se empleó este método en el análisis general y particular de la situación problemática, en determinar los factores que influyen en el desgaste de las paredes de los hornos de reverberos, así como en el trabajo bibliográfico.
- ✓ **Análisis documental:** Permitió el análisis y estudio de la literatura especializada, así como otras investigaciones relacionadas con el objeto de estudio y diferentes soportes bibliográficos que contribuyeron a sustentar las conceptualizaciones y valoraciones relacionadas con el objeto de estudio.

Métodos empíricos: Las entrevistas y encuestas a técnicos de la producción, se aplicaron con el objetivo de conocer el estado de la explotación del horno de reverbero y los métodos utilizados por el jefe de colada, especialistas y los jefes de turnos para estimar el desgaste de las paredes refractarias.

Métodos estadísticos: En el procesamiento de las datos experimentales obtenidas y en la evaluación de los parámetros estadísticos de ajustes de las funciones de aproximación obtenidas.

Estructura del documento:

Capítulo 1: Diagnóstico de la explotación del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.

En este capítulo se hace una descripción generalizada de los hornos de reverbero y en especial el horno de reverbero de fusión de cobre de la UEB Colada de Cobre, se caracteriza el mismo haciéndose énfasis en el proceso de fusión por su influencia en la vida útil de los refractarios. Se hace una descripción de los materiales refractarios utilizados y los factores que inciden en la durabilidad de los mismos y su situación de desgaste.

Capítulo 2: Fundamentos teóricos–prácticos empleados para la elaboración del método de determinación de desgaste refractario.

En este capítulo se hace referencia a métodos para la determinación de los espesores de las paredes refractarias de los hornos, a partir de las temperaturas interiores y exteriores. Además se explica la importancia de utilizar funciones de aproximación para estimar el desgaste de las paredes refractarias. También se describe el desarrollo experimental elaborado para la confección de la base de datos y creación de las funciones de aproximación. Así como la descripción de las zonas de mayor desgaste en el horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre y los instrumentos utilizados.

Capítulo 3: Propuesta del método para obtener las funciones de aproximación.

En este capítulo se expone el desarrollo del proceso de confección de las funciones de aproximación, se exponen las funciones de aproximación elaboradas para cada zona contemplada en este trabajo, así como análisis económico y medioambiental del empleo del método propuesto para la estimación del desgaste.

Posteriormente se exponen las conclusiones de la investigación realizada, se plantean las recomendaciones para garantizar la continuidad del trabajo y por último las referencias bibliográfica y anexos utilizados en la confección de la tesis.

CAPÍTULO I: DIAGNÓSTICO DE LA EXPLOTACIÓN DEL HORNO DE REVERBERO DE LA UEB COLADA DE COBRE.

1.1 Características de fusión de concentrados de cobre en los hornos de reverberos.

Los objetivos principales de la fusión en hornos de reverberos consisten en fundir la carga, es decir los concentrados, fundentes y materiales de retorno (chatarra) y en obtener el cobre líquido y escoria de composiciones prefijadas. La fusión en hornos de reverberos se distinguen de otros tipos de fusión y sobre todo de las que se realizan en hornos de cuba [4].

Como es sabido, en los hornos de cuba se debe cargar solamente el material en pedazos ya que los materiales finos, siempre que no estén convertidos en pedazos, se van soplados del horno y se llevan por los gases. En los hornos de reverberos se puede fundir la carga menuda que, durante tal fusión no se va soplada. Por eso la fusión en hornos de reverberos ha sustituido la de los hornos cuba y ha obtenido una gran difusión desde cuando fue descubierto el procedimiento, para enriquecer las menas por flotación y en las fundarías se han comenzado a suministrar los concentrados de flotación en vez de la mena en pedazos.

Los hornos de reverberos difieren de otros por el método de transmitir el calor. En algunos hornos los pedazos de la carga se calientan estando en contacto directo con los gases calientes que atraviesan el lecho de fusión, moviéndose de abajo arriba (hornos cuba). Mientras que en los hornos de reverberos la carga va calentada por el gas caliente de la llama por convención en la superficie de los taludes y por transmisión del calor a costa de la conductividad térmica de la carga.

Sin embargo, los gases más calientes pasan por la bóveda, calentándose su superficie interior y la mampostería calentada de la bóveda que irradia el calor a los taludes de la carga. En virtud de que la bóveda participa en la transferencia de una parte considerable del calor a la carga, estos hornos han recibido el nombre de hornos de reverberos.

Una ventaja importante de fusión de los hornos de reverberos consiste en la posibilidad de utilizar tipos de combustibles más baratos, tales como la hulla pulverizada, mazut y gas natural en ves de coque, combustible costoso que goza de gran demanda.

No obstante, la fusión de los concentrados en los hornos de reverberos tiene una serie de inconveniencias entre los cuales hay que señalar las siguientes:

1. Necesidad de efectuar grandes inversiones para la construcción de los hornos propiamente dicho, así como de los conductos de escape de los gases, de las calderas recuperadoras de calor y de las plantas para fabricación de hulla pulverizada, en caso de que el horno se calienta por hulla pulverizada.
2. Bajo grado de quemadura del azufre en el proceso de fusión (baja desulfuración) y obtención del cobre líquido más pobres en composición con la fusión en otros hornos.
3. Como resultado de lo anterior se usa una escala menor de la capacidad calorífica de los concentrados sulfurados durante la fusión y mayor consumo de combustible.
4. Bajo coeficiente de utilización del calor que se desprende al quemar el combustible el cual constituye el 25-30 % de todo el calor desprendido del horno.

5. Poco contenido de anhídrido sulfuroso (1-2%) en los gases procedentes de hornos de reverberos y, como resultado, imposibilidad de utilizar en forma económica el azufre que se contiene en los gases para la producción del ácido sulfúrico.
6. Pequeña duración de servicios (campañas) de un horno de reverbero entre las reparaciones generales y gran consumo de materiales refractarios costosos como: ladrillos Dinas, ladrillos de Alúmina, ladrillos de Magnesita y de Cromo-Magnesita.

1.1.1 Estructura de los hornos de reverberos.

En la actualidad los hornos de reverberos modernos tienen dimensiones interiores en plano como por ejemplo las siguientes: largo 28-35, ancho 7-10, alto 4 m. En el área de la solera de los hornos de reverberos varía de 180 a 330 m². La masa total alcanza, sin fundamento, 2000-3000 ton, el baño líquido de cobre, la escoria y la carga pesan cerca de 1000 ton [4].

Las paredes se hacen, para toda la altura, de ladrillos altamente refractarios de magnesita los cuales soportan bien la acción corrosiva del baño líquido y la escoria. La mampostería interior de las paredes, por encima del nivel del baño de cobre y de escoria, se halla bajo la protección del lecho de fusión que va cargando a lo largo de las paredes en forma de taludes, y puede estar hecha de ladrillos Dinas, menos costosos. La parte exterior de la mampostería de las paredes se levanta, utilizando ladrillos de chamota que es más barato. Las partes importantes de la mampostería interior de las paredes del horno situadas en la zona del baño y en los lugares de salida del cobre líquido y la escoria se prefieren hacer de ladrillos de cromo-magnesita, más resistentes y refractarios.

Muchas son las fábricas en que las partes correspondientes de la mampostería por fuera del horno están revestidas por planchas de acero o cobre enfriadas por el agua. Las partes superiores de las paredes son de 575 a 600 mm de espesor; en la parte inferior, en la zona de la masa fundida, estas se ensanchan hasta 1500 mm. Las paredes interiores del horno se terminan por una mampostería escalonada llamada adaraja y destinada para mantener la carga.

La solera y el fondo del horno se colocan entre las paredes y se descansa sobre el fundamento. El fondo del horno se hace de varias hiladas de ladrillos, rojos en la parte inferior del fondo (cerca del fundamento) y refractarios en la parte superior del mismo. Estos ladrillos van asentados haciendo una bóveda invertida (arco invertido). Por arriba de la mampostería de ladrillos se rellena una solera gruesa de arena cuarzosa pura (95% de SiO_2) con 5-8% de arcilla refractaria. Durante el funcionamiento del horno la solera de cuarzo viene poco a poco degenerándose y va sustituida en gran parte por la magnetita precipitada del baño líquido de cobre y escoria.

Los últimos años la estructura de la solera de los hornos ha sufrido grandes cambios y se hace de ladrillos refractarios de cromo-magnesita asentados formando una bóveda invertida, así como de retacado de magnesita. Para esto la solera se calienta hasta 1400-1600 °C y se rellena de escoria caliente de convertidor que se obtiene al soplar el cobre líquido sin fundente. Tal escoria de convertidor contiene mucha magnetita. Esta escoria se mantiene cierto tiempo en el estado fundido, luego, su temperatura se baja hasta de 900-1000 °C y se impregna por magnetita desmenuzada para la profundidad de 150-170 mm. El espesor de tal solera es mayor que el de la solera cuarzosa y alcanza 1,5 m.

La bóveda es la parte más vulnerable de un horno de reverbero, sobre todo las primeras secciones de la misma dispuestas en la proximidad de la pared de hogar. La resistencia de la bóveda determina la duración de la campaña del horno. Antes las bóvedas eran construidas solamente en forma arco. El arco se hacía de ladrillos Dinas que se caracterizan por tener una baja conductividad térmica, proporcionando así la disminución de las pérdidas de calor.

La luz del arco, es decir su anchura, alcanza 10 m. El espesor o la altura del ladrillo Dina son igual a 500 mm y más raramente a 380 mm. La flecha del arco constituye aproximadamente 1/10-1/12 parte de la anchura interior del mismo. El arco de los ladrillos Dina se apoya en ladrillos de arranque del arco los cuales se colocan en las vigas U por ambos lados del horno y mantenidos por los elementos de fijación del horno.

En la actualidad los hornos de reverberos modernos tienen una mayor difusión de las bóvedas de estructuras suspendidas. Estas bóvedas se hacen de ladrillos refractarios de magnesita o de ladrillos de cromo-magnesita termorresistente. Las ventajas de la bóveda de estructura suspendidas consisten en la posibilidad de crear en el horno una temperatura más alta y una gran resistencia a la acción corrosiva de los óxidos principales de la frita al fundir una carga tostada.

La estructura suspendida ofrece la posibilidad de construir las bóvedas y, por consiguiente, los hornos de cualquier anchura lo que no es posible al emplear estructuras de arco. La bóveda suspendida se puede reparar durante el funcionamiento del horno reemplazando los bloques o las secciones por separado. Por eso la duración de servicios de tal bóveda es mayor que la de la bóveda en arco.

Las bóvedas suspendidas son rectas y se hacen de ladrillos en forma de paquetes sujetos por láminas de hierro que van colgadas de ganchos en la estructura de fijación del horno. Como regla general, las bóvedas efectúan la fusión de los concentrados tostados. La mampostería de la bóveda suspendida se hace de ladrillos amarrados los cuales adquieren cada vez mayor importancia ya que la armadura, colocada a presión dentro de tales ladrillos, previene la aparición de grietas y aumenta la resistencia de las partes inferiores de los ladrillos a la oscilación de la temperatura.

Actualmente se han comenzado a emplear las bóvedas suspendidas de empuje. La bóveda cuyo radio es de 8 500 mm se compone de “arcos” hechos de ladrillos de cromo-magnesita. Entre los ladrillos de un “arcos” están colocados en las láminas de acero de 0,8-1,0 mm de espesor. Las bandas salientes de acero en chapas se cuelgan de los angulares los cuales, a su vez, se suspenden de las vigas de arco que se apoyan en las consolas soldadas a los montantes verticales de fijación del horno.

Las ventajas de una bóveda suspendida de empuje consiste en lo que el arco, hecho de pedazos de ladrillos de magnesita o de cromo-magnesita, se conserva cualquiera que sea la anchura de la bóveda y esta última tiene una mayor hermeticidad. Mientras que la bóveda en forma de arco del horno de reverbero tiene un empuje horizontal el cual, al calentarse la misma durante el funcionamiento del horno, aumenta más de tres veces debido a la dilatación térmica del ladrillo. Para mantener la bóveda de un horno de reverbero sirve la estructura de fijación del horno [11].

También una de las partes importantes de los hornos de reverbero es el dispositivo de evacuación de los gases. En los hornos de reverberos modernos este dispositivo se hace inclinado y en forma fuselada con transición suave al conducto de escape de los gases. Tal dispositivo de evacuación de los gases deja pasar una gran cantidad de gases, permitiendo quemar más combustible. Los gases procedentes del horno de reverbero con la temperatura de 1250-1300 °C pasan por el conducto y llegan a las calderas recuperadoras en las cuales el calor de los gases evacuados se utiliza para la producción del vapor. Luego los gases se envían a los colectores de polvos de filtro eléctrico y pasan a la chimenea.

El dispositivo de evacuación de los gases de un horno de reverbero se hace de ladrillos Dinas. El horno de reverbero con el área de la solera igual a 225 m² tiene conductos de escape de los gases con la superficie de sección transversal igual a 22-25 m². La velocidad de los gases en el conducto no debe de superar 8 m/s para que en ellos pueda precipitarse el polvo grueso.

Para cargar el lecho de fusión, en la bóveda del horno de reverberos se practica por cada lado del horno, a lo largo de las paredes laterales y a una distancia aproximada igual a 250 mm a partir de la superficie interior de las misma, 20-23 orificios de 300 mm de diámetros en los cuales se ponen las mangas de carga.

El lecho de fusión se carga principalmente a través de los orificios dispuestos a lo largo del horno, comenzando 2-3 m a partir de la pared de hogar en una extensión de 5-7 m. Siempre que el horno de reverbero funcione con una llama larga (extendida), los orificios dispuestos en la bóveda cerca de escorias del horno también se utilizan para cargar el lecho de fusión.

Para la salida de la escoria hay aperturas en la pared trasera del horno o en la extremidad de las paredes laterales, más abajo del espejo del baño de escoria del horno, a la altura de 700-900 mm a partir de la solera. Los agujeros para la salida del cobre líquido se practican en una de las paredes laterales del horno, al nivel de la solera o un poco más arriba. Con el fin de proteger el revestimiento del horno en las aperturas para la salida del cobre líquido se colocan en la mampostería los casquillos de hierro fundido provistos de orificios a través de los cuales logra salir.

En el extremo del hogar del horno hay 4-6 orificios destinados para los quemadores de gas o las toberas. Por encima del nivel de estos orificios hay una apertura para verter la escoria del convertidor. La plataforma de servicio para cargar el lecho de fusión (destinada para los transportadores de rasquetas o de cinta y de lanzadera, así como para los alimentadores pesadores) llamada plataforma del tragantes hace una altura aproximada de 10 m a partir del suelo de modo que entre las vigas de apoyo de esta plataforma y la superficie de la bóveda quede un espacio suficiente para mantener la bóveda durante el funcionamiento del horno.

También es pertinente destacar la importancia de los índices técnico-económico principales de la fusión en hornos de reverberos, destacándose los siguientes:

- ❖ Rendimiento específico de la fusión de la carga.
- ❖ Consumo específico del combustible.
- ❖ Paso del cobre a la mata.
- ❖ Contenido del cobre en la mata y la escoria.

1.2 Características de materiales refractarios para la construcción de hornos.

Teniendo en cuenta los criterios de la literatura especializada, se define como refractario aquellos materiales fabricados fundamentalmente de óxidos, aunque también por compuestos no oxigenados que se caracterizan por preservar sin variación significativa sus propiedades funcionales en las más disímiles condiciones de trabajo a altas temperaturas; así como aquellos materiales que sin llegar a soportar altas temperaturas tienen un bajo coeficiente de conductividad térmica [12].

Por regla, en los refractarios la conductividad térmica es baja, no descartando que pueda ser elevada en materiales que mantienen sus características a muy altas temperaturas, tales como las magnesitas, cromitas, carbono y altas alúminas [5].

También de un refractario es bueno conocer sus propiedades, ya que estas tienen gran importancia en la selección y uso, su clasificación indica el origen o forma de fabricación, las propiedades proporcionan conocimiento de duración, así como funcionamiento y durabilidad en determinadas condiciones. Las propiedades más significativas en este caso son:

- ❖ Refractariedad.
- ❖ Porosidad.
- ❖ Resistencia mecánica de construcción.
- ❖ Resistencia térmica, (Resistencia a los cambios bruscos de temperatura).
- ❖ Resistencia a escorias.
- ❖ Constancia de volumen.
- ❖ Conductividad térmica.
- ❖ Conductividad eléctrica.

Un material refractario ideal debe tener las siguientes características:

1. Alta refractariedad.
2. Estabilidad volumétrica a las temperaturas de operación.
3. Estabilidad química (frente a gases, vapores y escorias).
4. Resistencia al choque térmico.
5. Alta resistencia mecánica en caliente.
6. Alta densidad.
7. Baja conductividad térmica.
8. Baja resistencia a la abrasión.
9. Baja conductividad eléctrica a altas temperaturas.

Un refractario aislante es el que presenta las siguientes características:

1. Baja conductividad térmica.
2. Alta refractariedad.
3. Buena resistencia al ataque químico de gases, vapores y escorias.
4. Buenas propiedades mecánicas en caliente.
5. Baja densidad.

1.3 Descripción de la UEB Colada de Cobre.

En el país, la Empresa de Conductores Eléctricos “Conrado Benítez” más conocida como ELEKA, ubicada en el Km 34 de la Carretera Central en el municipio de San José de las Lajas, provincia Mayabeque, única en su tipo en el país, tiene como objeto social producir y comercializar de forma mayorista piezas de repuesto, herramientas, cables, alambres de energía, cables telefónicos y de transmisión de datos, alambres barnizados, alambrón de cobre térmico y granulado de cloruros de polivinilo [7].

Está constituida por siete Unidades Empresariales de Base (UEB), de las cuales cinco son productivas, una de ellas, la UEB Colada de Cobre, concebida con el fin de producir alambro de cobre térmico con un alto nivel de pureza. El que por la calidad que presenta se convirtió en el principal renglón exportable de la ECE “Conrado Benítez”.

Para lograr sus objetivos, cuenta con una tecnología de avanzada que integra un horno de reverbero de 50 toneladas de capacidad que se emplea en la fusión y refinación de la chatarra de cobre, una máquina de vaciado continuo de 5tn/h de productividad y su tren de laminación, contando con una vista en planta y su leyenda mostrada en el Anexo 1 y proceso productivo mostrado en el Anexo 2.

En el caso del horno, es un horno reverbero basculante, que trabaja entre los 1200 y los 1250 °C de temperatura. Está sometido a cambios bruscos de temperatura (al terminar la colada y durante la carga), que no son dañinos para el refractario (magnesia-cromo y chamota) empleado en su revestimiento interior. El mismo mantiene una producción continua, pues se trabaja por campañas largas. El combustible utilizado para su funcionamiento es el diesel y es compatible con el refractario básico que se encuentra recubriendo el agregado.

Se utiliza ácido bórico para la escoria inicial (licuar) y hexametáfosfato de sodio para limpiar el metal de elementos como (Pb, Sn, Zn, S). Estos dos materiales atacan el refractario, pero como se trabaja a tan bajas temperaturas (entre 1120 y 1200 °C) no es significativa su acción sobre los mismos.

El cobre se trabaja a espejo limpio, es decir, se elimina la escoria inicial y se trata de que todo el tiempo el metal esté libre de escoria, esta solo se forma para eliminar los elementos dañinos existentes en el baño metálico y luego es eliminada.

1.4 Características del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.

La estructura y la forma del horno de reverbero es clásica, con paredes rectas y la cuna en forma de arco. La bóveda es un techo plano suspendido y sujetado con muelles. Está recubierto en su interior por dos capas de refractarios de Magnesia-Cromo (una de trabajo y otra de seguridad) y otra de Chamota de alta alúmina (aislante). La superficie interior es de 15 m² (longitud de 6.23 m x ancho 2.42 m) y la altura del baño es de 480–500 mm. Los pesos de los recipientes del horno son los siguientes [7]:

- Estructura metálica+quemador+tubos+varios 75.0 Ton.
- Mampostería 140.0 Ton.
- Contenido normal de baño de Cobre 50.0 Ton.
- Escorias 3.0 Ton.

Las paredes están descritas como se muestra a continuación:

- a) Pared frontal: donde están situadas la puerta de carga y ventanilla de escoriar.
- b) Pared posterior: donde están situadas las lanzas de oxidación - reducción y la abertura de colada (piquera).
- c) Pared lado quemador: donde está situado el quemador de fusión y la ventanilla para la toma de muestras.
- d) Pared lado chimenea: donde está situada la salida de humos.

El recipiente de la solera está soldado herméticamente por completo en la zona del baño y rígido para poder absorber irregularidades eventuales de los cilindros de basculación. La solera está formada por dos arcos con ladrillos de Magnesita-Cromo y están separados por una chapa especial de 1mm de espesor que se inserta en la junta intermedia, de tal forma que el cobre pueda penetrar, a lo máximo a través del arco de desgaste, de 350 mm de espesor. Es casi imposible que la escoria o el cobre pueda desbordar por encima de la placa base de la puerta de carga además, de desgastarse siempre más la solera, el baño de cobre queda más bajo al no aumentarse la capacidad de colada.

El horno, en la pared frontal, tiene una gran abertura de 1800 mm ancho x 1050 mm de alto, por donde se puede realizar la carga. Los pilares de la puerta y las paredes laterales están asegurados adicionalmente por chapas insertadas y suspendidas.

En la bóveda (techo plano) para absorber la expansión térmica y la expansión causada por la filtración de Cobre, están previstas juntas en sentido longitudinal y transversal. Además están previstos de muelles, a ambos los ladrillos y permiten una expansión adicional cuando aumenta la filtración. En la cuna, hay grandes juntas que absorben la expansión de los arcos y solera, en sentido longitudinal y transversal. Adicionalmente, el sentido longitudinal, la expansión se absorbe mediante la inserción de juntas de cartón. La transición a la salida de humos o gases, consiste en ladrillos suspendidos. El canal de salida de humos o gases es muy corto, circular y todo él mampostado.

El horno posee dos caminos de rodadura (estructura metálica en forma de arco) que están situados por debajo de la estructura de la cuna y en las paredes laterales (pared lado quemador y pared lado chimenea) que se deslizan sobre una placa base de rodadura, cada uno de ellos.

Para el buen movimiento de basculación del horno, es importantísimo mantener el radio para los caminos de rodadura. El movimiento de basculación va regulado por dos cilindros oleohidráulicos que permiten 20° para el vaciado y 5° para el escoriado.

Para mantener el contacto tangencial entre los caminos de rodadura y sus placas base, sin posibilidad de deslizamiento, existen unos cables soporte-guía. El circuito oleohidráulico de basculación esta provisto de un sistema automático que pone al horno en posición horizontal, cuando se produzca un corte en el fluido eléctrico. Actualmente el mismo se compone de tres bombas, de las cuales dos (una como repuesto de emergencia) generan velocidad lenta mientras que la otra produce movimientos veloces.

El mismo posee como ciclo de trabajo el siguiente:

a) Carga y fusión.	8 horas
b) Oxidación, refinó y escoriado.	6 horas
c) Refinó y reducción.	2 horas
d) Pinchado y vaciado.	8 horas

Total 24 horas

1.5 Descripción de los materiales refractarios utilizados en la construcción del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre.

A la hora de la construcción de cualquier horno metalúrgico los materiales que presentan pésimas condiciones de trabajo soportan son los refractarios, por lo que son varios los factores a tener en cuenta en la selección de estos [26].

En la práctica existe la tendencia de analizar solo la refractariedad, sin tener en cuenta el medio en que va a trabajar el material, y las características del proceso, por eso para seleccionar correctamente un refractario se debe tener en cuenta los siguientes factores [30]:

1. La temperatura, que indica la refractariedad del material.
2. Los cambios bruscos de temperatura y la continuidad de la operación, indican la resistencia térmica.
3. De acuerdo al tipo de combustible utilizado en el horno se puede saber la compatibilidad química para evitar reacción entre los productos de la combustión, el combustible y el refractario.
4. Según el tipo de material a tratar en el horno se puede conocer la compatibilidad química y resistencia a las escorias.
5. La abrasión causada por el material o escoria, da la medida de la resistencia a las escorias y compatibilidad química con esta.
6. El tipo de horno a construir, formas y métodos de colocación del ladrillo.
7. Las dimensiones del horno, tipo de material estructura y tipos de ladrillos.
8. La conductividad eléctrica del material.

En la selección de un refractario (ladrillo), del conocimiento que no existe un material que satisfaga todas las demandas anteriormente planteadas, por lo que se debe hacer un análisis de las características más importantes del horno en el momento de seleccionar el refractario. Conociendo la temperatura de trabajo del horno se determina la refractariedad del material a utilizar; la selección será siempre aquel material que su temperatura de deformación sea mayor que la temperatura máxima de trabajo.

Al saber si el horno es de operación continua o no, se selecciona un material que permita cambios de temperaturas mayores posibles para no afectar la estructura refractaria. Otro aspecto a tener en cuenta al seleccionar un refractario es su composición química, debido a que en la práctica se producen reacciones entre los diferentes tipos de materiales que componen la mampostería de un horno [29].

Como se explicó anteriormente el horno trabaja entre los 1200 y los 1250 °C, mantiene una producción continua y el combustible utilizado para su funcionamiento es el diesel. Se utiliza ácido bórico para la escoria inicial (licuar) y hexametáfosfato de sodio para limpiar el metal de elementos como (Pb, Sn, Zn, S).

Por lo que la Empresa decide emplear en la construcción del revestimiento refractario del horno, materiales refractarios de magnesia- cromo y chamota, quedando constituido por tres capas, una de trabajo, otra de seguridad; que son de magnesia-cromo y la capa aislante, que es de chamota de alta alúmina. Escogiendo estos por la buena capacidad de soportar altas temperaturas sin fundir o descomponerse y la capacidad de permanecer inertes sin reaccionar cuando son expuestos a medios agresivos (escoria), además de producir un buen aislamiento térmico.

En el caso de los ladrillos refractarios de magnesia-cromo 58% que es un ladrillo básico, esta formado por un compuesto espinal con óxido crómico, $MgO.Cr_2O_3$, mostrando como composición química la mostrada en la tabla 1.1 a continuación. Suele llamarse magnesia-cromo a este ladrillo por la predominación de la magnesia en la composición química.

Tabla 1.1: Composición química del ladrillo magnesia-cromo.

Composición química					
MgO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂
58	19	15	6	1.3	0.6

Este tiene como características las siguientes [8]:

1. Se emplea en toda la capa de trabajo y seguridad del horno.
2. De la novena hila de ladrillos hacia abajo (línea de escoria) tiene un espesor 575 mm haciendo la capa de seguridad y de trabajo una ya que son del mismo material.
3. De la novena hilada hacia arriba (línea de escoria) 460 mm.
4. Tiene una conductividad térmica de $2.2 \text{ W/m}^0\text{C}$ a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.
5. Una densidad de 3.28 g/m^3 .
6. Porosidad aparente de 18%.
7. Se puede emplear hasta los $1750 \text{ }^\circ\text{C}$.
8. Resistencia a la rotura de 30 N/m^2 .

En el caso del ladrillo de chamota el cual se emplea como aislante y es proveniente de la Empresa "Refractarios Habana". El mismo tiene una composición química mostrada en la tabla 1.2 a continuación [8]:

Tabla 1.2: Composición química de la chamota 60.

Composición química.			
Chamota	% Al₂O₃	% SiO₂	% Fe₂O₃
Chamota 60 %	60	36	1
	60	35	0.9

Este tiene como características las siguientes:

1. Se emplea en toda la capa aislante del horno.
2. Tiene un espesor de 115 mm.
3. Tiene una conductividad térmica de 1.65 W/m⁰C a 700 °C.
4. Densidad de 2.31 g/m³.
5. Porosidad aparente de 15%.
6. Modulo de rotura de 10 N/m².
7. Se puede trabajar hasta los 1530 °C.

1.6 Estructura del horno reverbero de la UEB Colada de Cobre.

El horno de reverbero esta estructurado de la siguiente forma [28]:

❖ Piso.

El piso tiene forma de cilindro cuyo eje es paralelo al eje longitudinal del horno, el que está constituido por tres capas, una de trabajo, otra de seguridad; que son de magnesia-cromo y la capa aislante, que es de chamota de alta alúmina. Las dos primeras capas se construyen con una pieza básica y otra de amarre, en los extremos de cada fila, además de que están compuestas por 25 hiladas de piezas y tienen una conicidad tal que la de una es continuación de la otra y a su vez convergen en el eje del cilindro.

Las dimensiones de estas piezas también son únicas, en la figura 1.1 que se muestra a continuación, se puede observar la forma en que se encuentran dispuestos los ladrillos en el piso de horno, según con las especificaciones del proyecto, además de los formatos de estos.

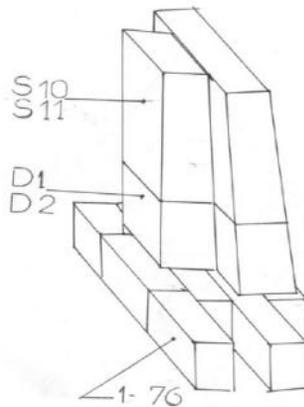


Figura 1.1: Disposición de los ladrillos piso del horno según proyecto.

El piso tiene un espesor de 350 mm y un radio exterior de 3210 mm. Para obtener el espesor deseado se decide que el piso estaría compuesto de tres capas, una capa aislante de chamota de alta alúmina del formato 1-76, dispuestos a plan, es decir a 75 mm de espesor, con el eje mayor del ladrillo paralelo al eje longitudinal del horno (no se puede colocar esta hilada a sardinel porque se altera la altura total del piso y por ende la capacidad del crisol).

La capa de seguridad, se obtiene mediante la combinación de piezas de magnesia-cromo de los formatos D1 y D2. La capa de trabajo se obtiene combinando los formatos S10 y S11 de magnesia-cromo en relación (2:1). Con estas capas se obtiene el espesor deseado y el asentamiento estable de los ladrillos sin dejar juntas abiertas.

❖ **Base oblicua de las paredes frontal y posterior.**

Las piezas necesarias para estas son del formato +WL413 de configuración romboidal, las que no existen en el país, lo que obliga a la ECE a buscar nuevas soluciones. En la figura 1.2 que se muestra a continuación se observan como están dispuestas las piezas en el horno según el proyecto inicial.

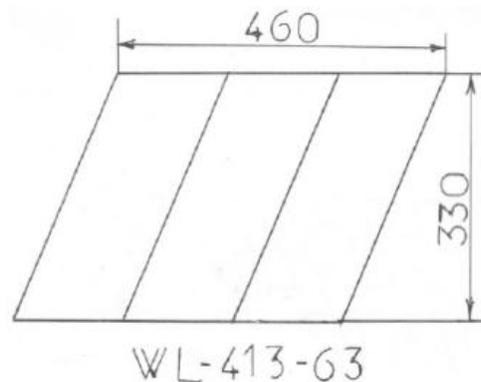


Figura 1.2: Base oblicua de las paredes según proyecto.

❖ **Banco de la puerta de carga.**

El banco de la puerta de carga tiene forma de un muro de 350 mm de alto, con un bisel hacia dentro del horno en su superficie recta superior; su ancho es de 575 mm, su longitud superior es de 1800 mm y la inferior es de 2016 mm, está formado por 63 piezas de gran tamaño entre los 20 y los 40 Kg, todas de magnesia-cromo. En cada fila lleva dos piezas y un taco con el mismo ángulo, que se altera con el de la siguiente fila para obtener la correcta mata juntas. A cada lado del eje central hay igual cantidad de piezas, solo que una mitad son derechas y la otra izquierdas.

Los ángulos de cada trío de piezas son diferentes y todos convergen en un punto elevado, situado en la misma línea del eje de simetría transversal del horno. Los mismos garantizan que al dilatarse por el calor la superficie superior del banco, no se levante, sino que se apriete aun más sobre su base eliminando cualquier posibilidad de filtración del metal líquido a través del refractario. En la figura 1.3 se puede observar el banco de la puerta de carga, tal y como es por el proyecto original.

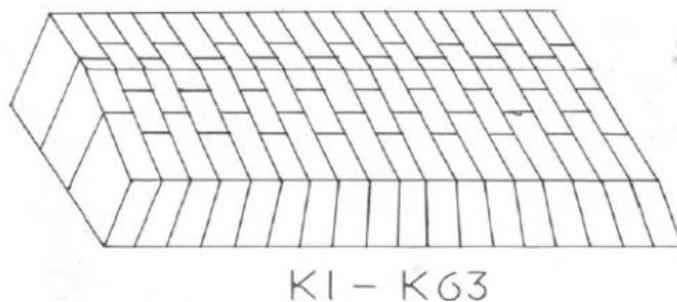


Figura 1.3: Banco de la puerta de carga según proyecto.

❖ **Piquera y lanzas de oxígeno.**

Ambos elementos están conformados por bloques, escalonados a 76 mm de altura uno del otro. La piquera está compuesta por cinco bloques y cada lanza por tres bloques. Hay fabricantes que obtienen los bloques a partir de piezas especiales, y otros las obtienen por la unión de dos piezas 1B pegadas por su cara más amplia, que después son perforadas en pareja a 80 mm de diámetro cuyo eje coincide con la superficie de unión de ambas piezas. El orificio tiene una inclinación de 19° en la piquera y 23° en las lanzas, atravesando las piezas por su longitud mayor. A continuación en la figura 1.4 que se muestra se puede apreciar la forma original de la piquera y las lanzas de oxígeno según el proyecto de construcción original.

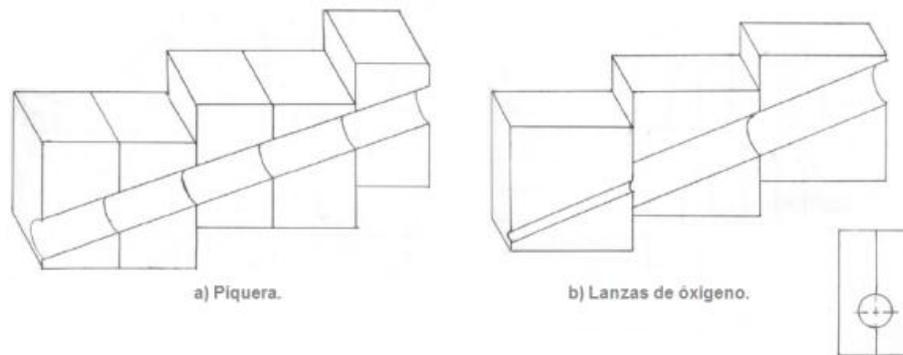


Figura 1.4: Piquera y Lanzas de oxígeno según proyecto.

❖ **Paredes.**

Por proyecto están compuestas por un conjunto de piezas que de cumplirse las orientaciones del proyecto se obtiene la mejor precisión, hermeticidad y solidez del asentamiento sin necesidad de cortes imprecisos o empates. Las piezas son 1-76, 1-L76, 1B-76, 1LB-76, todas de magnesia-cromo.

❖ **Amarre de las esquinas.**

Por proyecto se obtiene mediante la combinación de cuatro piezas 1B-76 en las hiladas impares y tres placas 1B-76 más una 1LB-76 en las hiladas pares, de ahí parten todas las paredes con sus respectivos elementos, piqueras, lanzas, puertas, quemador, etc. En la figura 1.5 que se muestra a continuación se observa la forma en que están dispuestas estas piezas en el horno.

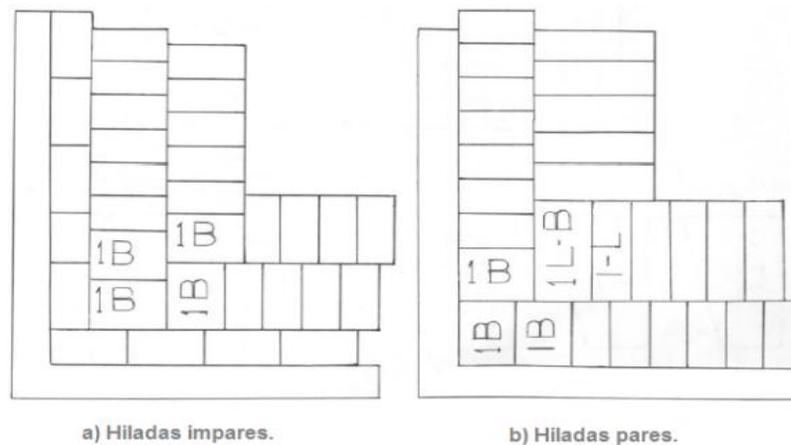


Figura 1.5: Amarre de las esquinas de las paredes según proyecto.

❖ **Parte superior de las paredes.**

La parte superior de las paredes que son más estrechas que la base, están compuestas por piezas 1GG 16 y 1GG 24.

❖ **Machones.**

Se construyeron con piezas del formato V3L que daban una inclinación exacta a la del proyecto.

❖ **Bóveda.**

Por proyecto, la bóveda es plana, colgada, cada pareja de ladrillos, es suspendida por un colgante de acero inoxidable. Los ladrillos son de magnesia-cromo, del formato P-2 (350x125x90). Este formato tiene una perforación de 20 mm, ubicada en el eje longitudinal de la cara mayor, separada 50 mm de uno de sus extremos; el orificio queda casi al centro de una depresión o cajuela donde se aloja el colgante.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICO-PRÁCTICOS EMPLEADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL MÉTODO DE DETERMINACIÓN DE DESGASTE REFRACTARIO.

La importancia del mantenimiento industrial radica en la necesidad que tienen las empresas de conservar todas sus máquinas e instalaciones trabajando continua y eficientemente. Existen dos formas de mantenimiento, uno es el mantenimiento correctivo dedicado a la reparación de los equipos en el momento en que fallan; y el otro, es el mantenimiento preventivo encargado de detectar daños en los equipos antes de que éstos dejen de funcionar y detengan el proceso de producción. Debido a las exigencias de competitividad y eficiencia a las que se ven sometidas diferentes empresas, se ve la necesidad de desarrollar nuevas herramientas que permitan diagnosticar el estado de los instrumentos, para así ejercer un control sobre ellos, aumentando su disponibilidad, y reduciendo las fallas intempestivas; alcanzando así la optimización de la calidad y la reducción de costos de mantenimiento; potenciando así el mantenimiento predictivo. [15]

En las operaciones de fusión de concentrado de cobre, conversión y refino, los materiales refractarios cumplen un papel fundamental dentro del proceso, ya que tienen la función de mantener la temperatura y otorgar estabilidad estructural al horno o convertidor. Una de las dificultades que tiene su funcionamiento es el desgaste prematuro y localizado de su revestimiento refractario. Por esta razón la determinación del espesor de ladrillo es relevante para determinar el estado del equipo, que se requiere para planificar los trabajos de mantenimientos pertinentes y optimizar el proceso de fusión.

La termografía provee una técnica no muy costosa para reunir datos necesarios para determinar pérdidas de calor, debido a que en la industria la cuantificación de las pérdidas de calor es de relevante importancia debido a la enorme cantidad de energía consumida en los procesos mecánicos, térmicos y eléctricos; y al alto costo consecuente de la energía desperdiciada [13], [14], [3].

La inspección termográfica provee incontables beneficios en los programas de mantenimientos, salidas de servicios inesperadas, grandes costos de producciones no relacionadas con el objeto económico y daños de equipos, se reducen por la detención de fallas incipientes, mucho antes que se transforme en fallas que causen interrupciones en la producción. Esta trae como ventajas las siguientes:

- Se realiza durante la normal operación de equipos e instalaciones.
- Inspección sin contacto, no invasiva e instantaneas.
- Durante la inspección se toman imágenes digitales de los problemas detectados para general un reporte final.
- Aporte de la experiencia, en todo los procesos industriales, de análisis especializados.

Conllevando así a que se incremente la eficiencia de los programas de mantenimientos, ya que se logran detectar las futuras fallas que sacan de servicio los equipos de la planta al cual pertenecen.

2.1 Métodos para la determinación del espesor del revestimiento refractario a partir de las temperaturas interiores y exteriores.

Actualmente existen equipos con tecnología de avanzada que permiten por varias vías (termografías, pirometría láser, termopares de contacto etc.) proporcionar conocimiento directo de la temperatura externa en el agregado y de esta forma estiman los espesores internos además de monitorear y detectar las zonas calientes en los agregados. Estas tecnologías son altamente costosas de implementar, además de atraen asociados muchas veces, pagos adicionales de licencias tecnológicas [18].

Una forma alternativa es la utilización de la modelación matemática como herramienta, para a partir de mediciones puntuales y con la ayuda de procedimientos estadísticos, estimar parámetros de interés con la ayuda de los fundamentos de la transferencia de calor [19], [20].

Para estimar el espesor es necesario controlar aquellas variables que fundamentalmente inciden en los fenómenos a estudiar, de tal forma que se determinan como variables a controlar las siguientes:

- ❖ Temperatura externa.
- ❖ Temperatura Interna.

La temperatura externa es un factor fundamental en la descripción del espesor, ya que su valor depende directamente de este y se manifiesta a través de la resistencia térmica de la pared dada por la relación entre la conductividad térmica y el espesor según la ecuación (1), [17], [29].

$$R_p = \frac{\lambda_{pared}}{S_{pared}} \quad (2.1)$$

Dónde: R_p es la resistencia de la pared refractaria o aislante, λ_{pared} es la conductividad térmica de la pared y S_{pared} el espesor. La temperatura externa también está condicionada por la temperatura interna lo cual se conoce por teoría fundamental de la transferencia de calor [17].

Como la temperatura externa está fuertemente relacionada con el espesor según se muestra en la relación (2), [17].

$$T_{ext} = T_{int} - Q \sum (\lambda_i / S_i) \quad (2.2)$$

Dónde: T_{ext} es la temperatura externa de la pared, T_{int} es la temperatura interna, Q es el flujo calórico en la pared, λ_i es la conductividad térmica en la capa i y S_i es el espesor correspondiente. Para una temperatura externa y una temperatura interna es posible realizar la estimación del espesor de la capa de trabajo:

$$S_{st} = f(T_{int}, T_{ext}) \quad (2.3)$$

Primeramente, para caracterizar de forma correcta el desgaste, es necesario identificar las zonas donde el revestimiento refractario sufre mayor deterioro. Esto se puede realizar consultando las bases de datos de las coladas del horno, a los técnicos que laboran en la actividad, o realizando un estudio visual del revestimiento una vez este fuera de acción el horno.

2.2 Identificación de las zonas de desgastes.

Una de las problemáticas que más preocupa a los tecnólogos y jefes de turnos de la UEB Colada de Cobre, es la determinación del espesor refractario residual de las paredes de trabajo en el horno de reverbero de la UEB para continuar en operación sin afectar el proceso productivo. El control de este parámetro proporciona la disminución de averías, las cuales en ocasiones pueden ser fatales para el propio agregado dejándolo inutilizado. En ocasiones puede afectar otros equipos que funcionen de conjunto en el proceso, causando grandes pérdidas económicas y tiempo por paros y reparaciones.

En estos momentos esta determinación se toma visualmente y depende de la experiencia de los jefes de turnos o jefes de brigada, pero existen descorches que se hacen muy difíciles de detectar por no existir puntos de referencia.

Es conocido que el desgaste del material refractario está condicionado por la propia operación del agregado destacándose como principales factores los siguientes [6]:

- ❖ Preparación incorrecta del revestimiento para su puesta en operación: Este paso es clave para el proceso. La inadecuada extracción de la humedad física y química puede generar grietas por el escape brusco de los vapores a través de los poros. Un inadecuado precalentamiento del revestimiento produce grandes tensiones en el refractario durante la evacuación del metal, causando descorchado y agrietado de los materiales, facilitando posteriormente la penetración de la escoria.
- ❖ Composición inadecuada de escoria. Fundamentalmente para una buena calidad del proceso. El control del grado de basicidad y su fluidez permite disminuir su agresiva acción en el revestimiento, fundamentalmente en la zona de escoria.

- ❖ Exceso de permanencia del metal en el horno. Con esto se aumenta también el tiempo de agresión de la escoria.
- ❖ Temperatura de vaciado incorrecta. Provoca la solidificación del metal el cual se adhiere al refractario, y se desprende al tratar de rehabilitar el horno.

De tal manera, el deterioro prematuro del revestimiento causa dos impactos fundamentales en el proceso de elaboración: el aumento de los costos de producción por el consumo de materiales refractarios y el aumento de consumo energético por las pérdidas calóricas a través del revestimiento refractario.

Lo planteado anteriormente denota la necesidad de controlar el espesor refractario de forma tal que se pueda estimar la disponibilidad del funcionamiento y la planificación de los mantenimientos a estos agregados. Durante la creación de la base de este estudio se identificaron las zonas con mayores desgastes las siguientes:

1. Zona 1: Machones (tanto el izquierdo como el derecho).
2. Zona 2: Banco de carga.
3. Zona 3: Lanza abajo (se le denomino así por la diferencia de espesor existente, es decir de la novena hilada de ladrillos hacia abajo).
4. Zona 4: Lanza arriba (se le denomino así por la diferencia de espesor existente, es decir de la novena hilada de ladrillos hacia arriba).

2.3 Bases para la propuesta

Para lograr la obtención de los datos necesarios para cumplir con el objetivo propuesto en esta tesis, es necesario partir de la experimentación en fábrica, la cual está en muchas ocasiones frenada por la propia complejidad del proceso productivo y la necesidad de cumplir los planes de producción.

En muchas ocasiones se ha de diseñar el plan experimental sin alterar ni frenar la producción, lo cual en muchas ocasiones prescinde de la elaboración del diseño estadístico de experimentos y en sustitución se trata de realizar una toma de datos con el agregado en su funcionamiento normal en tiempo real. Esto tiene como ventaja que en muchas ocasiones se toman mediciones de determinados comportamientos del agregado que pueden incluirse en la modelación y como desventaja el propio tratamiento e identificación de las perturbaciones o anomalías lo que trae la necesidad de realizar un minucioso filtrado de datos. En este caso la experimentación se planificó de la forma que se explica a continuación.

Para estimar el espesor es necesario controlar aquellas variables que fundamentalmente inciden en el fenómeno a estudiar, de tal forma se determinan como variables a controlar las siguientes:

1. Temperatura externa
2. Temperatura interna

La temperatura externa es un factor fundamental en la descripción de espesor, ya que su valor depende directamente de este y se manifiesta a través de la resistencia térmica de la pared, dada por la relación entre la conductividad térmica y el espesor según la ecuación (2.1) expuesta en el Capítulo II, aspecto 2.1 de la presente tesis.

Primeramente para caracterizar de forma correcta el desgaste, es necesario identificar las zonas donde el revestimiento refractario sufre mayor deterioro. Esto se puede realizar consultando las bases de datos de las coladas del horno, consultando la experiencia de los técnicos que laboran en la actividad o realizando un estudio visual del revestimiento una vez estén fuera de campaña.

Para el caso que ocupa este trabajo se determinó que las zonas de mayores desgastes están situada en la pared frontal y pared trasera donde se encuentran situada las lanzas, donde como consecuencia existe una variación significativa en la temperatura externa e la chapa metálica. De tal forma, midiendo esta temperatura, la temperatura del metal, es posible predecir el espesor remanente en la capa de trabajo.

Para la medición de la temperatura interna del metal se emplea establemente con dos cañas pirométricas con un tubo de protección cerámico y termopar, con un rango de temperatura hasta los 1400-1600 °C, en el caso de la medición de la temperatura externa se utiliza un termómetro infrarrojo manual sin contacto, con un rango de medición de 0 a 1450 °C con error de 1-3 °C de fabricación en la antigua URRS, mostrado en la figura 2.1.



Figura 2.1: Foto del termómetro infrarrojo sin contacto utilizado en los experimentos.

Para tomar las mediciones de la temperatura externa se situaron en toda la zona 1, 2, 3 y 4 una serie de puntos con el objetivo de medir siempre en el mismo lugar la transferencia de calor existente, como se muestran a continuación en las figuras 2.2 y 2.3 respectivamente. A partir de este patrón de experimentos se realizaron 65 tomas de datos del horno en operación como se muestra en la tabla 2.1. No se realizó el mismo trabajo en la bóveda y crisol del horno debido a que en la bóveda existía averías a la hora de tomar mediciones y en el crisol por falta de condiciones de trabajo.

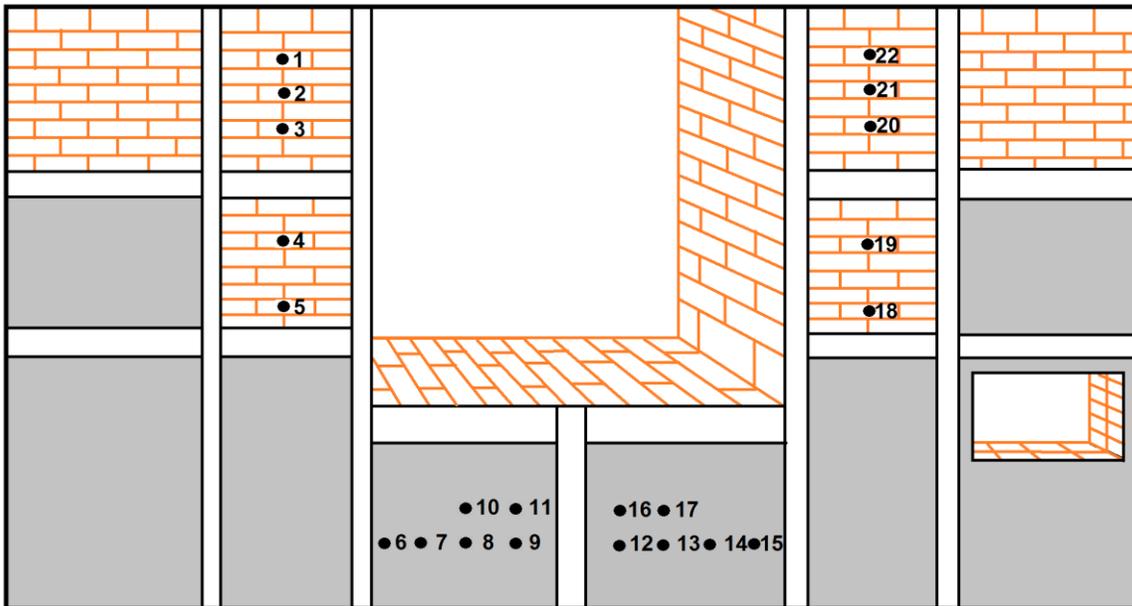


Figura 2.2: Zona 1 y 2 (machones y banco de carga).

La figura anterior expuesta no es más que la vista frontal del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre. En la misma se muestra los puntos colocados en la zona 1 y 2 con el objetivo de general la base de datos y futuro procesamiento para la obtención de las funciones de aproximación.

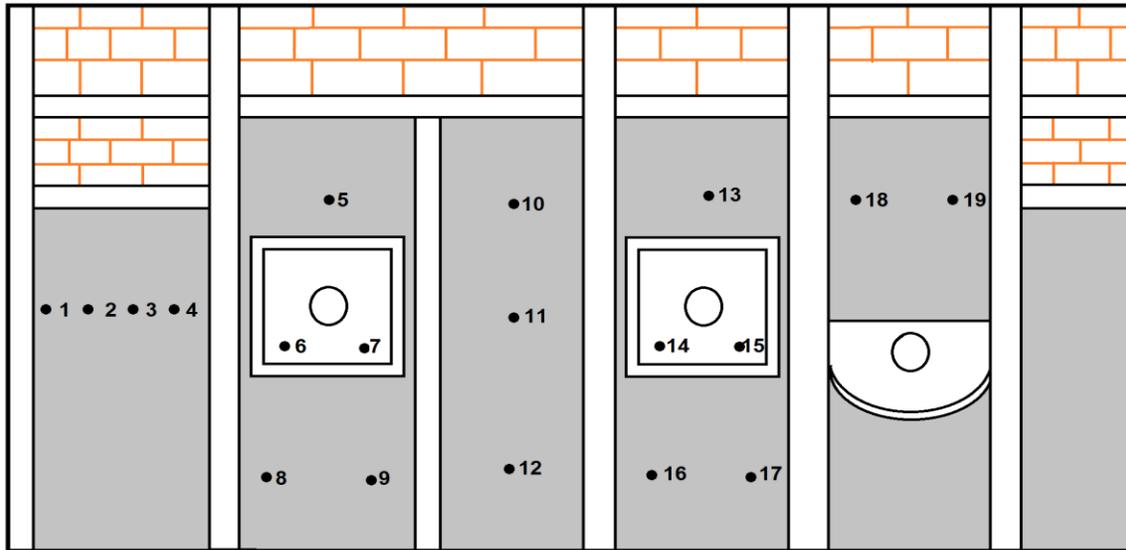


Figura 2.3: Zona 3 y 4 (pared trasera donde se encuentran las lanzas arriba y abajo).

La figura anterior expuesta no es más que la vista trasera del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre. En la misma se muestra los puntos colocados en la zona 3 y 4 con el objetivo de general la base de datos y futuro procesamiento para la obtención de las funciones de aproximación.

Tabla 2.1: Muestra de toma de datos para la zona 1 y 2.

Fecha	06/03/2014	06/03/2014	06/03/2014	06/03/2014	
Hora	8:30 AM	9:00 AM	09:30 am	10:00 AM	
# de Colada	1608	1608	1608	1608	
T. Interior	1160	1162	1171	1177	
1	138	145	138	140	Machón Lado Izquierdo
2	175	192	170	170	
3	213	213	208	209	
4	240	240	240	241	
5	208	209	204	205	
6	298	281	285	284	Banco de Carga
7	312	294	306	305	
8	317	307	310	311	
9	319	311	315	313	
10	318	312	311	310	
11	325	325	322	325	
12	320	308	309	310	
13	302	286	298	299	
14	310	302	312	314	
15	303	301	297	300	
16	354	349	342	344	Machón Lado Derecho
17	330	329	338	340	
18	167	157	168	165	
19	174	170	176	177	
20	220	200	221	220	
21	253	252	255	256	
22	265	259	265	267	

Como se puede apreciar las mediciones se tabularon de la forma que se muestra en la tabla expuesta anteriormente, es una muestra de cómo se creó la base de datos, los cuales son los correspondiente a la zona 1 y 2, los mismos se realizaron teniendo en cuenta la fecha, hora, número de colada, temperatura interior y siempre colocando estos datos en los puntos correspondientes de las zonas a trabajar. Realizándose lo mismo para la zona 3 y 4 mostrados a continuación en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Muestra de toma de datos para la zona 3 y 4.

Fecha	06/03/2014	06/03/2014	06/03/2014	06/03/2014	06/03/2014
Hora	8:30 AM	9:00 AM	09:30 AM	10:00 AM	10:30 AM
# de Colada	1608	1608	1608	1608	1608
T. Interior	1160	1162	1171	1177	1156
1	160	155	160	162	152
2	190	186	183	181	187
3	193	189	188	190	192
4	209	204	200	201	208
5	234	228	225	222	231
6	132	127	125	129	128
7	144	133	129	133	131
8	197	191	187	190	192
9	180	174	171	178	179
10	238	231	235	241	238
11	216	201	207	210	211
12	192	186	184	189	191
13	232	225	223	221	213
14	151	146	143	144	148
15	142	140	136	138	142
16	183	186	186	186	194
17	193	193	193	194	197
18	213	213	211	214	220
19	215	202	205	210	218

CAPÍTULO III: PROPUESTA DEL MÉTODO PARA OBTENER LAS FUNCIONES DE APROXIMACIÓN.

La elaboración de las funciones de aproximación está sujeta al análisis de las variables que intervienen en su conformación. Del comportamiento estadístico y de su análisis de correlación, depende el tipo de modelo a considerar para la obtención de valores que sean próximos numéricamente a la función original. En el caso tratado en este trabajo se utilizara el Análisis de Multiregresión. Los fundamentos de los procedimientos utilizados se muestran a continuación.

3.1 Elementos del análisis de regresión.

El análisis de regresión es una rama de la teoría estadística de gran utilidad en casi todas las disciplinas científicas y, en particular, en todas las especialidades de ingeniería. Es un poderoso medio para estimar la relación existente entre variables. Con su ayuda se puede, en la mayoría de los casos, determinar la ecuación que mejor representa la relación existente entre las variables analizadas[1].

De acuerdo con el enfoque tradicional, se requiere establecer la mejor relación posible entre una variable aleatoria y , con respecto a una serie de variables independientes no aleatorias x_1, \dots, x_k . Se parte del supuesto que los valores de las variables x_i pueden ser controlados o seleccionados a voluntad. Se estudia primero la regresión simple, donde la variable y se supone que depende de una sola variable independiente x y, posteriormente, se harán extensivos los resultados al caso de la regresión múltiple, cuando la variable dependiente y depende de dos o más variables x_1, \dots, x_k .

Definición: Sea y una variable aleatoria que depende de una variable x . Se denomina ecuación de regresión de y con respecto a x , a la función $y = f(x)$ que contiene el valor promedio de y para cada valor fijo de x .

Se supone que se dispone de n resultados experimentales. De acuerdo con la definición realizada, la ecuación de regresión incluye los puntos: $(x_1, E(y/x_1))$, $(x_2, E(y/x_2)), \dots, (x_n, E(y/x_n))$. De tal forma:

$$f(x) = E(y/x) \quad (3.1)$$

Donde:

$E(x, y/x)$: Valor medio que adopta la variable y para un valor cualquiera de la variable x

Así, para los resultados que se ilustran en la figura 3.1 se tendría la ecuación de regresión del tipo:

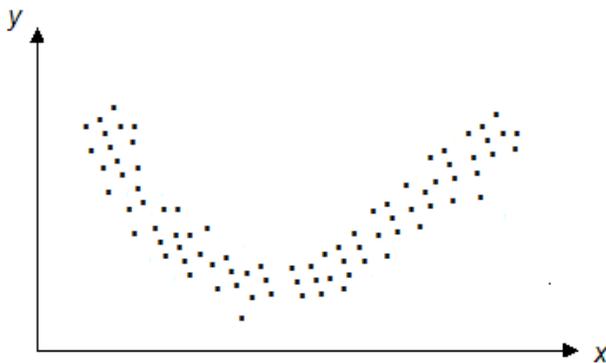


Figura 3.1: Datos estadísticos que admiten estimación por un modelo cuadrático.

De igual forma, los resultados que se ilustran en la figura 3.1 se pueden modelar por:

$$y = b_0 e^{b_1 x} \quad (3.2)$$

Se denominan parámetros de la ecuación de regresión a los coeficientes b_1, \dots, b_r , que aparecen en la ecuación.

Está claro, que entre cada valor observado de y y el valor obtenido mediante la ecuación de regresión existe una diferencia $u_i = y_i - \hat{y}_i$ donde y_i es el valor observado de y (para el mismo valor de x para el que se calcula \hat{y}_i).

3.1.1 Clasificación de las ecuaciones de regresión.

Las ecuaciones de regresión se clasifican en: lineales y no lineales. La linealidad se establece entre los parámetros de las ecuaciones y no entre las variables. Por ejemplo, la ecuación $y = b_0 + b_1 x + b_2 x_2$ se considera una ecuación de regresión lineal. Sin embargo, la ecuación se estima como no lineal, ya que es no lineal con respecto a los coeficientes b_0, b_1 [2].

Determinación de coeficientes. El problema de estimar la ecuación de regresión, es decir, determinar los coeficientes del modelo, se realiza de forma tal de asegurar el mínimo error de estimación. Se utiliza el criterio:

$$\min_{\substack{\text{equation} \\ \text{parameters}}} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.3)$$

Donde:

y_i : Resultados experimentales.

\hat{y}_i : Valor calculado de y para los mismos valores de las variables independientes, para los que se obtuvieron los respectivos valores y_i .

Los coeficientes de la ecuación de regresión calculados en correspondencia con (3.3) serán denominados estimadores mínimo cuadráticos y la ecuación correspondiente ecuación de regresión mínimo cuadrática.

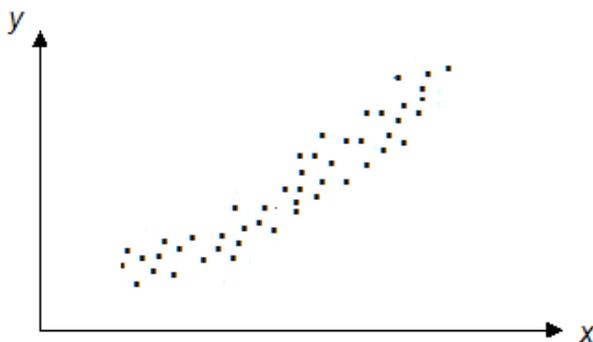


Figura 3.2 Datos estadísticos que admiten estimación por un modelo exponencial.

Aquí no se realiza la deducción de las fórmulas para el cálculo del estimador mínimo cuadrático, ya que este tema desviaría innecesariamente la atención del lector de los objetivos principales del presente trabajo. Por otra parte, existe una gran cantidad de programas y paquetes de programas que realizan todos los cálculos necesarios, por lo que el usuario no especialista en estadística matemática no necesariamente tiene que dominar estas fórmulas para hacer un uso eficiente de esta técnica. Basta con conocer, que si el modelo de regresión ha sido bien seleccionado, la variable aleatoria y_i (i es el índice de los experimentos) cumple con los siguientes requisitos [1]:

a) El valor promedio de y tiene que coincidir con el valor calculado por la ecuación de regresión, es decir,

$$y = E(y/x) \quad (3.4)$$

b) La varianza de las y_i para cada valor fijo de x debe ser constante (requisito de homocedasticidad en las varianzas), es decir,

$$V(y_i) = \sigma^2 \text{ para } i = 1, 2, \dots, .n \quad (3.5)$$

c) Para cada valor fijo de x las y_i deben de ser estadísticamente independientes, o sea, las covarianzas de dos experimentos distintos, para los mismos valores de x :

$$\text{cov}(y_i, y_j) = 0, \text{ para } i \neq j. \quad (3.6)$$

d) Las y_i correspondientes a iguales valores de x se distribuyen normalmente con valor medio \hat{y}_i (valor calculado por la ecuación de regresión) y dispersión σ (correspondiente al error estándar de la ecuación). Esto se ilustra en la figura 3.2. Hasta ahora, se han analizado modelos lineales en los parámetros, para los que se utiliza el método de mínimos cuadrados en la obtención de los coeficientes de regresión. Sin embargo, en la ingeniería predominan los modelos no lineales, incluyendo los modelos no lineales en los parámetros. Al mismo tiempo, la utilización de determinadas transformaciones permite convertir una gran cantidad de modelos no lineales en los parámetros en modelos lineales en los parámetros y, por lo tanto, aplicar las técnicas de regresión a este grupo de modelos. Aquellos modelos no lineales en los parámetros que admiten linealización se denominan intrínsecamente lineales [1].

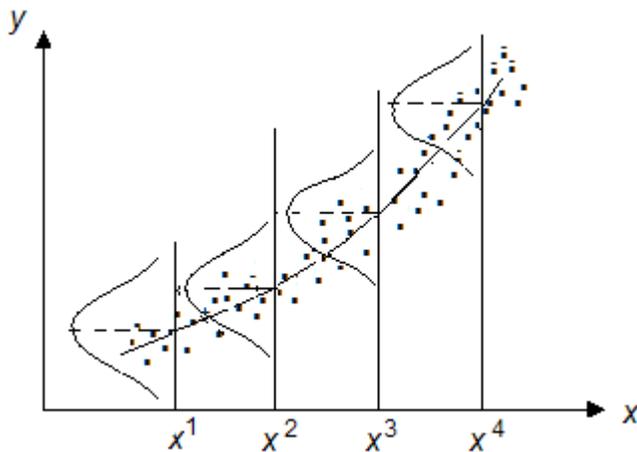


Figura 3.3 Distribución de los datos estadísticos con respecto a los valores calculados por una ecuación de regresión.

3.1.2 Selección de la mejor ecuación de regresión

La determinación del modelo más adecuado es una tarea compleja, que requiere de mucho trabajo por parte del investigador, dotado del aseguramiento de programas necesario. Existen variadas técnicas en este sentido; aquí se presenta la técnica preferida por el autor, denominada procedimiento de selección hacia atrás [1].

En este procedimiento se siguen los siguientes pasos:

1. Selección de todos los factores “sospechosos” de ejercer influencia sobre la variable dependiente y generación de estos factores. Aquí se pueden utilizar procedimientos auxiliares diferentes. Por ejemplo, los factores de interacción entre las variables se pueden establecer mediante un modelo *monomial* auxiliar, que incluye todas las variables de la interacción; luego de hallada la ecuación de regresión de este modelo auxiliar quedan esclarecidos los exponentes más adecuados del factor de interacción.

2. Se halla la ecuación de regresión con todos los factores “sospechosos” (sean, por ejemplo, k factores).
3. Se registra el coeficiente de correlación múltiple y el error estándar de la ecuación.
4. Se elimina el factor con menor coeficiente de correlación parcial y se halla una nueva ecuación de regresión con $k - 1$ factores. Este proceso se repite mientras se observe el incremento del coeficiente de correlación múltiple o la reducción del error estándar (inicialmente ambos coeficientes mejoran, con posterioridad el coeficiente de correlación múltiple comienza a disminuir y continúa reduciéndose el error estándar).
5. Finalmente, se verifica el cumplimiento de los requisitos formulados con anterioridad. Si ellos se cumplen, para valores del error estándar tales que $2\sigma \leq \delta$ donde σ es el error estándar de la ecuación y δ es el error máximo permisible en la estimación de la variable dependiente, se puede dar por definido el modelo buscado.

En la práctica, si el coeficiente de correlación múltiple es superior a 0,9; el error de apreciación es inferior al permisible y más de 95 % de los errores de estimación son inferiores a $\pm 2\sigma$, se cumplen generalmente los requisitos señalados.

3.2 Procesamiento de la data experimental para la búsqueda de las funciones de aproximación.

Para completar las datas experimentales fue necesaria la estimación previa de los espesores correspondientes a cada juego de datos obtenidos, conocidas previamente la temperatura externa y la interna en el sistema. Para esto se utilizó el sistema computacional *SIAR v2.0*, este sistema está destinado al diseño del revestimiento refractario de agregados metalúrgicos. Dentro de sus prestaciones se encuentra la simulación y optimización de los espesores de materiales al considerar la minimización de la temperatura externa, flujo calórico, espesor total y costo de materiales. Su funcionamiento está dirigido a la búsqueda de relaciones de compromisos de estos indicadores de eficiencia. El sistema fue desarrollado como parte de una Tesis de Ingeniería en Metalurgia y perfeccionado posteriormente en una Tesis de Maestría en Diseño y Fabricación asistida por ordenador [21], [22], [23], [24], [25].

Este sistema se ha aplicado a trabajos relacionados con la remodelación de los hornos metódicos de los laminadores 300 y 250, rediseño de horno de calcinación de la planta de cal, en la selección de materiales refractarios para el revestimientos de cazuelas metalúrgicas en el taller de cazuelas en la Empresa “Antillana de Acero” y en asesorías a la empresa “Refractarios Habana”. Este programa cuenta con módulos especializados en la estimación de propiedades de las paredes refractarias y aislantes, como es el caso de la estimación de los espesores residuales, conductividades térmicas, temperaturas internas.

Una vez completada la data con los valores estimados (ver anexo 7 al 10) se procede a la búsqueda de las potencias de mejor ajuste para determinar el modelo final. Para ello se empleó el software *Monomial v1.0*, el cual está destinado al desarrollo de modelos con estructuras monomiales, posinomiales, signomiales y logarítmicosignomiales.

Este sistema se ha aplicado a numerosos trabajos, en particular a la determinación de reglas de conducta para la operación de diversos procesos (Operación óptima de ruedas desecantes y Conciliación de regímenes térmicos en hornos metódicos y de regímenes de deformación de acero en molinos de laminación) [1], [27]. Como apoyo se utilizó el *Statgrafics Plus 5.0* para la caracterización de los estadígrafos de las variables implicadas en los modelos obtenidos.

Como resultado de la aplicación de los sistemas computacionales antes mencionados se obtuvieron los modelos para la estimación del espesor de la capa de trabajo para las condiciones referidas anteriormente. En particular se obtuvieron funciones de aproximación según las relaciones indicadas en la ecuación (2.3) del presente trabajo.

Para las zonas de mayor desgaste del horno, las funciones de aproximación obtenidas son las siguientes:

- **Zona 1: Machones izquierdo y derecho (espesor en función de la temperatura interna y externa).**

$$E_{st} = -971.123 - 334.757 \times \sqrt{T_{ext}} - 12.30441 \times (\sqrt{T_{ext}} \times \sqrt{T_{int}}) + 246.248 \times \sqrt{T_{int}} + 19.3111 \times T_{ext} + 1.05447 \times 10^{10} \times T_{ext}^{-3.47719} \quad (3.7)$$

Donde:

E_{st} : es el espesor de la capa de trabajo y seguridad en (mm), T_{int} es la temperatura interna en ($^{\circ}\text{C}$), T_{ext} es la temperatura externa en ($^{\circ}\text{C}$). Los estadígrafos correspondientes a esta ecuación se reflejan en el anexo 3. Este modelo presenta un porcentaje de ajuste = 99.953 % y error estándar de aproximación de 0.0890159.

- **Zona 2: Banco de Carga (espesor en función de la temperatura interna y externa).**

$$E_{st} = 11983.8 - 10175.9 \times \text{Log}_{10}(T_{ext}) + 801.941 \times \sqrt{T_{ext}} + 135.369 \times \sqrt{T_{int}} - 5.78138 \times (\sqrt{T_{ext}} \times \sqrt{T_{int}}) - 5.53731 \times T_{ext} \quad (3.8)$$

Los estadígrafos correspondientes a esta ecuación se reflejan en el anexo 4. Este modelo presenta un porcentaje de ajuste = 99.998 % y error estándar de aproximación de 0,0469429.

- **Zona 3: Lanzas abajo (espesor en función de la temperatura interna y externa).**

$$E_{st} = 14373.4 - 12409.3 \times \text{Log}_{10}(T_{ext}) + 1087.79 \times \sqrt{T_{ext}} + 111.305 \times \sqrt{T_{int}} - 4.97134 \times (\sqrt{T_{ext}} \times \sqrt{T_{int}}) - 10.8198 \times T_{ext} + 1595.15 \times (T_{int}^{2.11923} \times T_{ext}^{-3.1898}) \quad (3.9)$$

Los estadígrafos correspondientes a esta ecuación se reflejan en el anexo 5. Este modelo presenta un porcentaje de ajuste = 99.999 % y error estándar de aproximación de 0,0489993.

- **Zona 4: Lanzas arriba (espesor en función de la temperatura interna y externa).**

$$E_{st} = 54247.7 - 44715.5 \times \text{Log}_{10}(T_{ext}) + 4139.41 \times \sqrt{T_{ext}} + 114.334 \times \sqrt{T_{int}} - 4.96271 \times (\sqrt{T_{ext}} \times \sqrt{T_{int}}) - 531644 \times T_{ext} + 1327.9 \times (T_{int}^{2.23982} \times T_{ext}^{-3.29965}) \quad (3.10)$$

Los estadígrafos correspondientes a esta ecuación se reflejan en el anexo 6. Este modelo presenta un porcentaje de ajuste = 99.913 % y error estándar de aproximación de 0,045914.

Los modelos generados como resultado de esta investigación son válidos para las siguientes condiciones:

$$100mm \leq E_{st} \leq 710mm \quad (3.11)$$

$$1080^{\circ}C \leq T_{int} \leq 1187^{\circ}C \quad (3.12)$$

$$220^{\circ}C \leq T_{ext} \leq 306^{\circ}C \quad (3.13)$$

Las funciones de aproximación elaboradas aplicando las técnicas descritas anteriormente, permiten una buena aproximación para la determinación del desgaste de la pared a partir de la relación siguiente:

$$\Delta E_{st} = E_{st}^{Max} - E_{st}^{Estim} \quad (3.14)$$

Donde: ΔE_{st} es el desgaste de la capa de trabajo, E_{st}^{Max} es el espesor máximo de la capa de trabajo y E_{st}^{Estim} es el espesor estimado a partir de las funciones de aproximación. Es recomendable la estimación del espesor de las zonas a partir de las formulaciones que se calcularon para cada caso, pues la medición directa de la temperatura tiene mucho más relación con el espesor y por tanto el error es menor.

3.3 Análisis económico.

Se toman como referencia para el estudio del trabajo de diploma la última campaña de trabajo de la UEB Colada de Cobre (18/10/2013 – 10/04/2014), de donde se recopilaron todos los datos del horno de reverbero para identificar los principales problemas de consumo de refractario, ya que se han retirado algunos en otras ocasiones que pueden seguir en explotación, pasa esto porque el trabajo se realiza visualmente y no se llega al espesor mínimo de trabajo establecido por tecnología en el taller, para que el revestimiento refractario tenga un rendimiento pronóstico aceptable, se propone la metodología en el Trabajo de Diploma.

Balance económico	
A) Reparación capital del horno.	178.376,70 UM.
B) Reparación de las zonas que más se afectan están:	
a) Zona 1: Machones izquierdo y derecho.	9.560,60 UM.
b) Zona 2: Banco de carga.	12.197,27 UM.
c) Zona 3: Lanzas abajo.	22.796,44 UM.
d) Zona 4: Lanzas arriba.	37.739,60 UM.
Total de la reparación por zonas.	82.293,91 UM.
C) Gastos de la investigación.	
Cantidad de personas: 2 con categoría de Ing.	3.600 UM.
Multiplicado por 6 meses (período de la Investigación).	21.600 UM.
D) Total de la investigación.	103.893,91 UM.

Como se puede apreciar en la tabla expuesta anteriormente del balance económico donde se muestra la reparación capital que lleva el horno en general, además se expone una supuesta reparación por zonas de mayores desgastes, proporcionando esto un ahorro de 96.082,79 UM. Logrando con esto que dure más la explotación de los ladrillos que no han sufrido aun un desgastes significativo, logrando así que la reparación no tarde demasiado y deje la UEB sin producir, ya que se realizaría solo en las zonas donde más desgastes ocurran.

3.4 Análisis ambiental.

El notable desarrollo económico e industrial durante los últimos años ha aumentado considerablemente la generación de residuos industriales, afectando no sólo al medio ambiente, sino también la calidad de vida de la población. De ello surgen nuevos problemas, vinculados a la debilidad de un marco regulatorio y a la falta de coordinación institucional, lo que se traduce en dificultades para identificar los distintos tipos de residuos industriales y para el ejercicio efectivo de una acción fiscalizadora por parte de la autoridad. A estas dificultades hay que agregar la insuficiente dotación de instalaciones adecuadas para el tratamiento y disposición final de los productos dañinos.

La fundición de cobre a la que se hace referencia en el trabajo de diploma se localiza muy cerca de una zona urbana, el municipio San José de las Lajas en la provincia de Mayabeque. En el proceso descrito, aparecen elementos en el baño metálico compuesto por estaño (Sn), zinc (Zn), plomo (Pb), hierro (Fe), níquel (Ni), fósforo (P), azufre (S), bismuto (Bi), antimonio (Sb), arsénico (As), selenio (Se), telurio (Te), plata (Ag) y cobre (Cu). De estos, el S, Bi, Sb, As y otras trazas, al ser emitidas en forma gaseosa, generan una zona de impacto ambiental muy extensa con fuerte daño ecológico y de salud para los seres vivos, por ser fuente generadora de enfermedades irreversibles, y en casos mortales, por la exposición prolongada, su ingestión, respiración y por vías indirectas.

Son perjudiciales también a la atmósfera el ácido bórico y el hexametafosfato de sodio, utilizados como aditivos durante el proceso tecnológico para la reducción del cobre, es decir, para minimizar la presencia de los elementos indeseables. Además de que también van a la atmósfera los gases producto de la combustión del combustible.

Sus efectos sobre la salud humana y sobre el resto del medio ambiente si bien no se manifiestan a corto plazo, constituyen un problema ecológico, pues todos estos contaminantes inhalados pueden favorecer la aparición de lluvias ácidas, empeorar el calentamiento global, con todos sus efectos, y puede favorecer la aparición de cáncer, alergias respiratorias en la población expuesta de forma crónica.

Otro elemento que se ve afectado por la planta es el agua de la cuenca Mayabeque, la que está contaminada por los vertimientos de los residuos industriales producidos por la empresa, lo que se provoca por no contar con un sistema de tratamiento para las aguas de enfriamiento del proceso tecnológico, principalmente en el área de colada.

Estos residuales, al contaminar el agua afectan de forma considerable la calidad de la misma, que provocan afectaciones en las plantas y animales, lo que provoca el desequilibrio del ecosistema acuático, y la destrucción de todo el ecosistema fluvial ya que se interrumpen las cadenas tróficas. Las personas que consumen dicha agua son más propensas a contraer enfermedades infecciosas que se propagan a través de aguas contaminadas. Además, la contaminación producida por las aguas residuales destruye los peces de agua dulce, una importante fuente de alimentos.

El ser humano no está exento de los peligros que se derivan del consumo del agua o de los alimentos que proceden de estos ríos y suelos contaminados. Los problemas para la salud pública que pueden presentarse son reales, y si bien no están suficientemente estudiados, los expertos prevén un aumento de la incidencia de alergias y enfermedades respiratorias a medida que el aire más caliente contenga más contaminantes.

En la tesis se asegura un método seguro para la determinación del desgaste del revestimiento del horno para de esta forma mejorar las condiciones medioambientales de los trabajadores del taller. Conociendo el comportamiento del espesor del refractario se tiene una idea del tiro de la chimenea, lo que hace que disminuya la sobrepresión del horno y que los gases sean expulsados bien alto en la atmósfera, mejorando además, las condiciones de seguridad y salud del trabajo en la planta.

La UEB Colada de Cobre, obtiene como desechos tecnológicos, el polvo enriquecido en cobre y el tratamiento que se le da es su comercialización; la emulsión de enfriamiento, los que se colectan en tanques y se vierten en unos depósitos para esos menesteres. Para combatir todos estos problemas medioambientales es necesario aplicar con las siguientes recomendaciones:

- ✓ Normas de seguridad y salud del trabajo.
- ✓ Procedimiento de Producción Más Limpia, que en su primera etapa conlleva un diagnóstico medioambiental.
- ✓ Uso de los medios y equipos de protección al trabajador.
- ✓ Programa de educación ambiental a directivos, profesionales y trabajadores.
- ✓ Ley actual de Medio Ambiente.

Conclusiones

1. El diseño experimental realizado permitió obtener una descripción detallada del comportamiento del revestimiento refractario del horno de reverbero de fusión de cobre del la UEB Colada de Cobre, además de las zonas de mayor desgaste para la correcta aplicación de las técnicas de búsquedas de funciones de aproximación.
2. La aplicación de los fundamentos matemáticos para la elaboración de funciones de aproximación al problema de la estimación de los espesores del revestimiento del horno de reverbero permitió la obtención de funciones de aproximación para determinar el desgaste refractario de la capa de trabajo.
3. La obtención de las funciones de aproximación descritas en este trabajo permitió la elaboración de una hoja de cálculo Excel la cual permite la determinación de los espesores del revestimiento refractario y cuantificar la pérdida de material refractario por cada zona considerada.
4. Los resultados de esta investigación pueden ser aplicados a otras zonas de las paredes del agregado, teniendo en cuenta que presenten un comportamiento similar al analizado.

Recomendaciones

1. Continuar con la realización de experimentos con el objetivo de incrementar la base de datos para lograr más precisión y mejor ajuste de las funciones de aproximación.
2. Realizar un estudio similar al realizado en esta tesis considerando además el tiempo de operación del horno, el cual permita estimar los parámetros de desgaste refractario a partir de los tiempos acumulados de operación.
3. Presentar un informe técnico a la empresa ELEKA a partir del cual se evalué la posibilidad de automatizar el proceso de medición de las temperaturas en el horno reverbero y así establecer un control en tiempo real del comportamiento del revestimiento refractario.
4. Emplear técnicas avanzadas de predicción de comportamientos como las redes neuronales artificiales para optimizar el proceso de operación del horno de reverbero
5. Realizar un estudio similar al elaborado en este trabajo a la zona del crisol y la bóveda del horno de reverbero de la UEB Colada de Cobre con el objetivo de estimar los comportamientos de estas zonas.

Referencia bibliográfica.

1. Arzola, R. J. (2000): Sistemas de Ingeniería. Editorial Félix Varela, ISBN: 959-258-079-0, La Habana, Cuba.
2. Arzola, R. J. (2008): Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería. ISBN: 978-959-261-299-0, Disponible en (<http://www.bibliomaster.com/>, www.ilustrados.com/documentos/analisis-y-sintesis-09102009.pdf), Cuba.
3. Benítez, H., Contribución a la Caracterización de Defectos en Termografía Infrarroja mediante Máquinas de Aprendizaje., Tesis doctoral, Universidad del Valle, Programa de Postgrados en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2008.
4. Beregovski, V., Beregovski, B. “Metalurgia del Cobre y del Níquel”. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1985
5. Bosques Pie, D. “Obtención de funciones de aproximación para determinar el desgaste refractario de la capa de trabajo en las cazuelas de vaciado”. Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico, Unidad Docente Metalúrgica, ISPJAE, Cuba 2013.
6. Colectivo de autores. “Ingeniería de Refractarios”, Materiales-Diseño-Construcción, primera edición en castellano.
7. Colectivo de autores. “Línea de colada continua para alambión de cobre”. Tomo I, Octubre 1991.
8. Didier. “Productos refractarios y servicios”. [1991/1992],
9. http://www.ceramica.wikia.com/wiki/Horno_de_reverbero(27-marzo-2014).
10. <http://www.datosmacro.com/materias-primas/cobre> (27-marzo-2014).
11. <http://www.emison.com/hornos%20de%20reverbero.htm> (27-marzo-2014).

12. <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.Refractarios.Introduccion.pdf>. Página 14. (27-marzo-2014).
13. http://www.landinst.es/infrarroja/descarga_de_ficheros/Pdf/Termografia_Guia_Basica.pdf (27-marzo-2014).
14. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-temperatura/camara-termografica-ir4010.htm> (27-marzo-2014).
15. <http://www.renovetec.com/editorial/mantenimientoindustrial-vol3-predictivo.pdf> (27-marzo-2014).
16. <http://www.spanish.alibaba.com/p-detail/mineral-de-cobre-para-la-venta-400000248328.html> (27-marzo-2014).
17. Isachenko, V., Osipova, V. and Sukomel, A. "Transmisión del Calor". Editorial Pueblo y Educación, Tomo I, La Habana, Cuba, 1985.
18. Kjellberg, B. "Ladle furnace productivity". Technical report. The Swedish Ironmasters Association. 1993.
19. Levenspiel, O. "Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor". Ed. REVERTÉ. ISBN: 84-291-7968-2, España, 1993.
20. Lienhard, J. H. "A Heat Transfer Textbook". Third Edition, 2004.
21. Martínez, O. "Aplicación del Método de los Grafos Dicromáticos en el cálculo automatizado de paredes refractarias". Proyecto integrador. Cuba. 2005.
22. Martínez. O., "Sistema automatizado para el cálculo, simulación y optimización de hornos de calentamiento". Tesis de grado. Cuba. 2007.
23. Martínez. O., Arzola R. J. "Selección bajo criterios múltiples de aislamientos térmicos". XIV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Cuba. 2008.
24. Martínez. V. O., Arzola R. J., Lastre A. M. "Optimización del revestimiento refractario de cazuelas metalúrgicas" -Tesis en Opción al Título de Master en Diseño y Fabricación Asistido por Computadora, Centro de estudios CAD/ CAM, Universidad de Holguín, Cuba, 2011.

25. Martínez. V. O., Arzola R. J., Suárez G. L. “Cálculo, Simulación y Optimización del Calentamiento del Acero en Hornos Metódicos” -Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico, Unidad Docente Metalúrgica, ISPJAE, Cuba, 2007.
26. Santander, N. “Refractarios en Fundiciones de Cobre”. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, USACH, 1989.
27. Schacht, C. A. “Refractories Handbook”. “Marcel Dekker Inc”., ISBN: 0-8247-5654-1, (<http://www.dekker.com>), New York, Basel, 17, 475-490, EE UU.
28. Silva Suárez, Y. “Modificación de la estructura refractaria del horno de colada de ELEKA”. Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico, Unidad Docente Metalúrgica, ISPJAE, Cuba, 2011
29. Suárez, L. “Apuntes para un libro”. (Por publicar). Página 142 143.
30. Torres Triana, A. “Tecnología de los refractarios”. Ciencia y tecnología, Instituto cubano del libra, La Habana 1971

Bibliografía

1. Arzola, R. J. (2000): Sistemas de Ingeniería. Editorial Félix Varela, ISBN: 959-258-079-0, La Habana, Cuba.
2. Arzola, R. J. (2008): Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería. ISBN: 978-959-261-299-0, Disponible en (<http://www.bibliomaster.com/>, www.ilustrados.com/documentos/analisis-y-sintesis-09102009.pdf), Cuba.
3. Benítez, H., Contribución a la Caracterización de Defectos en Termografía Infrarroja mediante Máquinas de Aprendizaje., Tesis doctoral, Universidad del Valle, Programa de Postgrados en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2008.
4. Beregovski, V., Beregovski, B. “Metalurgia del Cobre y del Níquel”. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1985
5. Bosques Pie, D. “Obtención de funciones de aproximación para determinar el desgaste refractario de la capa de trabajo en las cazuelas de vaciado”. Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico, Unidad Docente Metalúrgica, ISPJAE, Cuba 2013.
6. Colectivo de autores. “Ingeniería de Refractarios”, Materiales-Diseño-Construcción, primera edición en castellano.
7. Colectivo de autores. “Línea de colada continua para alambión de cobre”. Tomo I, Octubre 1991.
8. Didier. “Productos refractarios y servicios”. [1991/1992],
9. http://www.ceramica.wikia.com/wiki/Horno_de_reverbero (27-marzo-2014).
10. <http://www.datosmacro.com/materias-primas/cobre> (27-marzo-2014).
11. <http://www.emison.com/hornos%20de%20reverbero.htm> (27-marzo-2014).

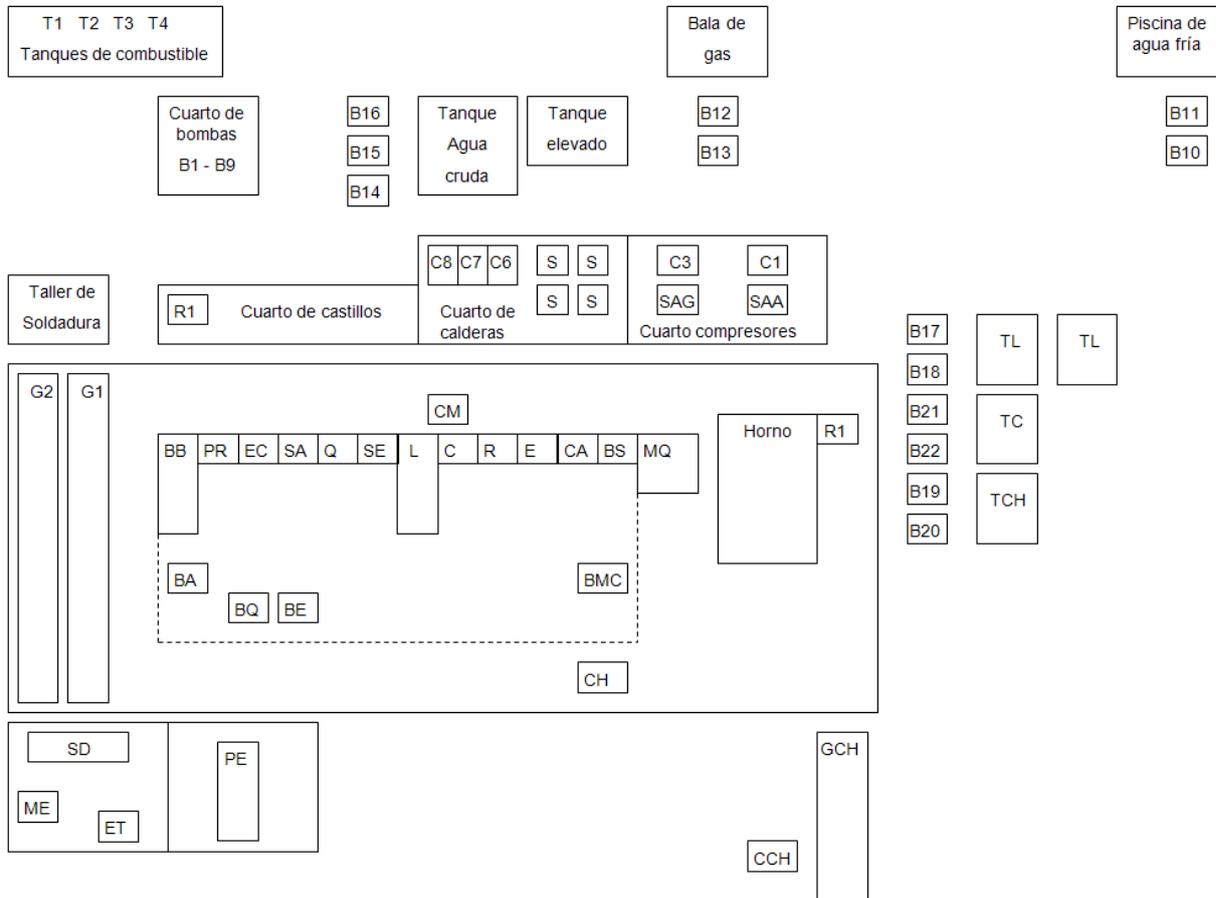
12. <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion1.Refractarios.Introduccion.pdf>. Página 14. (27-marzo-2014).
13. http://www.landinst.es/infrarroja/descarga_de_ficheros/Pdf/Termografia_Guia_Basica.pdf (27-marzo-2014).
14. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-temperatura/camara-termografica-ir4010.htm> (27-marzo-2014).
15. <http://www.renovetec.com/editorial/mantenimientoindustrial-vol3-predictivo.pdf> (27-marzo-2014).
16. <http://www.spanish.alibaba.com/p-detail/mineral-de-cobre-para-la-venta-400000248328.html> (27-marzo-2014).
17. Isachenko, V., Osipova, V. and Sukomel, A. “Transmisión del Calor”. Editorial Pueblo y Educación, Tomo I, La Habana, Cuba, 1985.
18. Kjellberg, B. “Ladle furnace productivity”. Technical report. The Swedish Ironmasters Association. 1993.
19. Levenspiel, O. “Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor”. Ed. REVERTÉ. ISBN: 84-291-7968-2, España, 1993.
20. Lienhard, J. H. “A Heat Transfer Textbook”. Third Edition, 2004.
21. Martínez, O. “Aplicación del Método de los Grafos Dicromáticos en el cálculo automatizado de paredes refractarias”. Proyecto integrador. Cuba. 2005.
22. Martínez. O., “Sistema automatizado para el cálculo, simulación y optimización de hornos de calentamiento”. Tesis de grado. Cuba. 2007.
23. Martínez. O., Arzola R. J. “Selección bajo criterios múltiples de aislamientos térmicos”. XIV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Cuba. 2008.
24. Martínez. V. O., Arzola R. J., Lastre A. M. “Optimización del revestimiento refractario de cazuelas metalúrgicas” -Tesis en Opción al Título de Master en Diseño y Fabricación Asistido por Computadora, Centro de estudios CAD/ CAM, Universidad de Holguín, Cuba, 2011.

25. Martínez. V. O., Arzola R. J., Suárez G. L. “Cálculo, Simulación y Optimización del Calentamiento del Acero en Hornos Metódicos” -Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico, Unidad Docente Metalúrgica, ISPJAE, Cuba, 2007.
26. Santander, N. “Refractarios en Fundiciones de Cobre”. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, USACH, 1989.
27. Schacht, C. A. “Refractories Handbook”. “Marcel Dekker Inc”., ISBN: 0-8247-5654-1, (<http://www.dekker.com>), New York, Basel, 17, 475-490, EE UU.
28. Silva Suárez, Y. “Modificación de la estructura refractaria del horno de colada de ELEKA”. Tesis en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico, Unidad Docente Metalúrgica, ISPJAE, Cuba, 2011
29. Suárez, L. “Apuntes para un libro”. (Por publicar). Página 142 143.
30. Torres Triana, A. “Tecnología de los refractarios”. Ciencia y tecnología, Instituto cubano del libra, La Habana 1971

ANEXOS

Anexos

Anexo 1: Vista en planta de la UEB Colada de Cobre y su leyenda.



Leyenda	Denominación	Modelo
T1	Tanque de almacenamiento diesel regular	-
T2	Tanque de almacenamiento diesel especial	-
T3	Tanque de almacenamiento diesel regular	-
T4	Tanque de almacenamiento diesel regular	-
B1	Bomba de almacenamiento	R6.5
B2	Bomba de almacenamiento	2KSEY-40-000
B3	Bomba de almacenamiento	2KSEY-40-000
B4	Bomba de tanque de diario	R5
B5	Bomba de tanque de diario	R5
B6	Bomba de tanque de diario	BFA-2
B7	Bomba de tanque de diario	BFA-2
B8	Bomba de tanque de diario	PE-1
B9	Bomba de tanque de diario	PE-1
B14	Bomba de agua cruda	C-62

B15	Bomba de agua cruda	C-62
B16	Bomba de agua cruda	AZCUE 50/20
TE	Tanque elevado	-
BG	Bala de gas	-
PAF	Piscina de agua fría	-
B10	Bomba de agua fría	C4R-203
B11	Bomba de agua fría	C4R-203
B12	Bomba de agua caliente	C4R-204
B13	Bomba de agua caliente	C4R-204
R1	Diferencial de taller de castillos	PK 2N-Z
C6	Caldera	ALASTOR EUS6/11
C7	Caldera	2PH 20-105
C8	Caldera	
S	Suavizador	-
C1	Compresor	2HA-2-TER
C3	Compresor	2HA-2-BIS
SAG	Secador aire – gas	SEK 1200/E
SAA	Secador aire – aire	AA-252
B17	Bomba de combustible diario	F, Nº 1
B18	Bomba de combustible diario	F, Nº 1
B19	Bomba de combustible diario	F, Nº 1
B20	Bomba de combustible diario	F, Nº 1
B21	Bomba de combustible diario	F, Nº 1
B22	Bomba de combustible diario	F, Nº 1
TL	Tanque de lanzas	-
TL	Tanque de lanzas	-
TC	Tanque de calderas	-
TCH	Tanque de horno	-
R2	Diferencial de puerta de tiro	PK 2N-Z
HORNO	Horno	REVERBERO
MQ	Máquina de colada	C10/1400
BS	Brazo sensor	-
CA	Cizalla automática	-
E	Enderezadora	-
R	Rebabadora	-
C	Cepilladora	-
CM	Cizalla manual	-
L	Laminador	2+6/9 MINI
SE	Separador de emulsión	-
Q	Quenching	-
SA	Secado del alambrón	-
EC	Encerado	-
PR	Pinch – roll	-
BB	Bobinador	-
BA	Bomba de achique	-

BQ	Bomba de quenching	NE 4X20
BE	Bomba de emulsión	NE 4X20
BMC	Bomba de máquina de colada	NE 5X20
CH	Centralita hidráulica	-
G1	Grúa de 12 t	T30 TERMINATOR
G2	Grúa de 5 t	G.P.B. 5 Ton/22.5
GCH	Grúa de chatarra 5 t	GHD
CCH	Cizalla eléctrica	-
PE	Planta de emergencia	-
ME	Máquina de elongación	-
ET	Equipo de torsión	TA 11-E
SD	Mesa de taladro y torno	-

Anexo 2: Proceso productivo de la UEB Colada de Cobre.



Anexo 3: Reporte de Análisis de Regresión Múltiple emitido por STATGRAPHICS Plus 5.0 para la data de análisis de temperaturas de la zona de Machones del horno reverbero de la UEB Colada de Cobre.

Parameter	Standard T		Statistic	P-Value
	Estimate	Error		
CONSTANT	-113284.0	6388.74	-17.7318	0.0000
Log Text	106764.0	4096.35	26.0631	0.0000
Log Tint	-10986.3	1828.64	-6.0079	0.0000
Raiz Text	-10488.7	395.452	-26.5233	0.0000
Raiz Tin x Raiz T	-26.2886	0.535495	-49.0922	0.0000
Raiz Tint	709.52	48.6737	14.5771	0.0000
Text	179.126	5.58687	32.0619	0.0000
Text Elevado	9.36207E10	3.42367E9	27.3452	0.0000
Tint Elelvado x T	-738.184	96.6831	-7.63508	0.0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	6.99704E6	9	777449.098115437.30		0.0000
Residual	5.0554	638	0.00792382		
Total (Corr.)	6.99705E6	647			

R-squared = 99.953 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99.953 percent

Standard Error of Est. = 0.0890159

Mean absolute error = 0.0586054

Durbin-Watson statistic = 0.969568 (P=0.0000)

Lag 1 residual autocorrelation = 0.499431

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between EsT and 9 independent variables. The equation of the fitted model is:

$$\text{EsT} = -971.123 - 334.757 \cdot \text{Raiz Text} - 12.3041 \cdot \text{Raiz Tin} \times \text{Raiz Text} + 246.248 \cdot \text{Raiz Tint} + 19.3111 \cdot \text{Text} + 1.05447 \times 10^5 \cdot \text{Text Elevado}$$

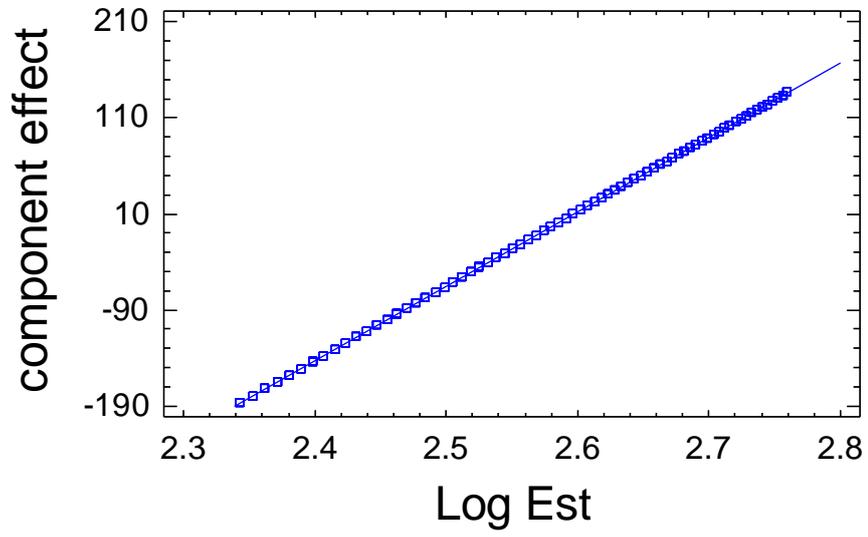
Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99.9999% of the variability in Est. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99.9999%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0.0890159.

This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0.0586054 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0.05, there is an indication of possible serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0.0000, belonging to Log Tint. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Component+Residual Plot for EsT



Anexo 4: Reporte de Análisis de Regresión Múltiple emitido por STATGRAPHICS Plus 5.0 para la data de análisis de temperaturas de la zona del Banco de carga del horno reverbero de la UEB Colada de Cobre.

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	11983,8	609,8	19,6521	0,0000
Log Text	-10175,9	547,901	-18,5726	0,0000
Raiz Text	801,941	55,3039	14,5006	0,0000
Raiz Tint	135,369	2,04652	66,1459	0,0000
Raiz Tint x Raiz	-5,78138	0,111405	-51,895	0,0000
Text	-5,53731	0,711462	-7,783	0,0000
Tint Elevado x Ti	5615,24	95,015	59,0985	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1,6074E7	6	2,679E6*****		0,0000
Residual	1,86868	848	0,00220364		
Total (Corr.)	1,6074E7	854			

R-squared = 99.998 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99.998 percent

Standard Error of Est. = 0,0469429

Mean absolute error = 0,0356785

Durbin-Watson statistic = 0,551597 (P=0,0000)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,722095

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Est and 6 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Est} = 11983,8 - 10175,9 \cdot \text{Log Text} + 801,941 \cdot \text{Raiz Text} + 135,369 \cdot \text{Raiz Tint} - 5,78138 \cdot \text{Raiz Tint} \times \text{Raiz Text} - 5,53731 \cdot \text{Text} + 5615,24 \cdot \text{Tint Elevado} \times \text{Tint Elevado}$$

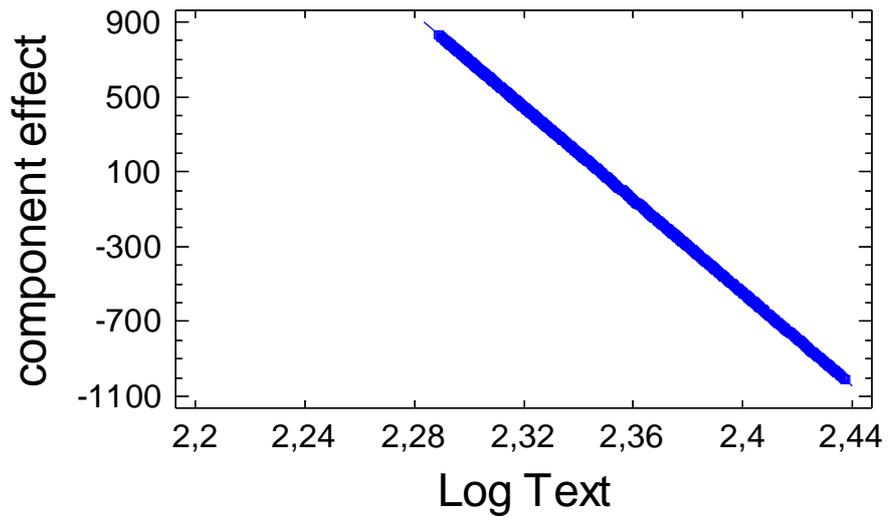
Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level. The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 100,0% of the variability in Est. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 100,0%.

The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,0469429. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,0356785 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0.05, there is an indication of possible serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0000, belonging to Text. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Component+Residual Plot for Est



Anexo 5: Reporte de Análisis de Regresión Múltiple emitido por STATGRAPHICS Plus 5.0 para la data de análisis de temperaturas de la zona de lanza abajo del horno reverbero de la UEB Colada de Cobre.

Parameter	Standard T		Statistic	P-Value
	Estimate	Error		
CONSTANT	14373,4	648,968	22,1481	0,0000
Log Text	-12409,3	614,418	-20,1968	0,0000
Raiz Tex	1087,79	65,6382	16,5724	0,0000
Raiz Tint	111,305	2,59085	42,9608	0,0000
Raiz Tint x Raiz	-4,97134	0,147799	-33,6358	0,0000
Text	-10,8198	0,8802	-12,2924	0,0000
Tint Elevado x Te	1595,15	28,3656	56,2355	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1,6074E7	6	2,679E6*****		0,0000
Residual	2,03599	848	0,00240093		
Total (Corr.)	1,6074E7	854			

R-squared = 99.999 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 99.999 percent
Standard Error of Est. = 0,0489993
Mean absolute error = 0,0368721
Durbin-Watson statistic = 0,595252 (P=0,0000)
Lag 1 residual autocorrelation = 0,701649
The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Est and 6 independent variables. The equation of the fitted model is:

$$\begin{aligned} \text{Est} &= 14373,4 - 12409,3 \cdot \text{Log Text} + 1087,79 \cdot \text{Raiz Tex} + 111,305 \cdot \text{Raiz} \\ \text{Tint} &- 4,97134 \cdot \text{Raiz Tint} \times \text{Raiz Text} - 10,8198 \cdot \text{Text} + 1595,15 \cdot \text{Tint} \\ &\text{Elevado} \times \text{Text Elevado} \end{aligned}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

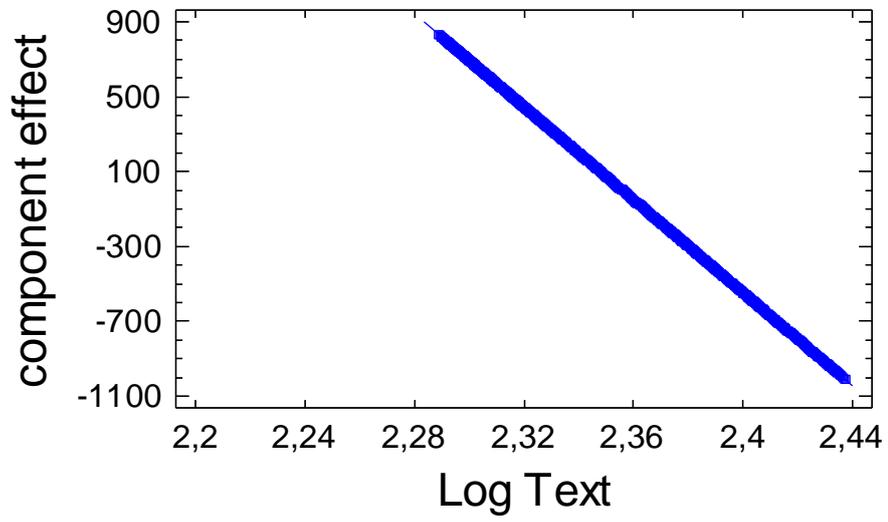
The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 100,0% of the variability in Est. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 100,0%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,0489993. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,0368721 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than

0.05, there is an indication of possible serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0000, belonging to Log Text. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Component+Residual Plot for Est



Anexo 6: Reporte de Análisis de Regresión Múltiple emitido por STATGRAPHICS Plus 5.0 para la data de análisis de temperaturas de la zona de las lanza arriba del horno reverbero de la UEB Colada de Cobre.

Parameter	Standard T		Statistic	P-Value
	Estimate	Error		
CONSTANT	54247,7	2717,09	19,9654	0,0000
Log Text	-44715,5	2219,12	-20,1501	0,0000
Raiz Text	4139,41	212,986	19,4352	0,0000
Raiz Tint	114,334	5,21606	21,9196	0,0000
Raiz Tint x Raiz	-4,96271	0,28808	-17,2268	0,0000
Text	-53,1644	2,98491	-17,811	0,0000
Text Elevado	-1,0504E10	7,93463E8	-13,2381	0,0000
Tint Elevado x Te	1327,9	55,3874	23,9748	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	6,99705E6	7	999578,0*****		0,0000
Residual	1,34918	640	0,0021081		
Total (Corr.)	6,99705E6	647			

R-squared = 99.913 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99.913 percent

Standard Error of Est. = 0,045914

Mean absolute error = 0,032882

Durbin-Watson statistic = 0,674286 (P=0,0000)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,661954

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Est and 7 independent variables. The equation of the fitted model is:

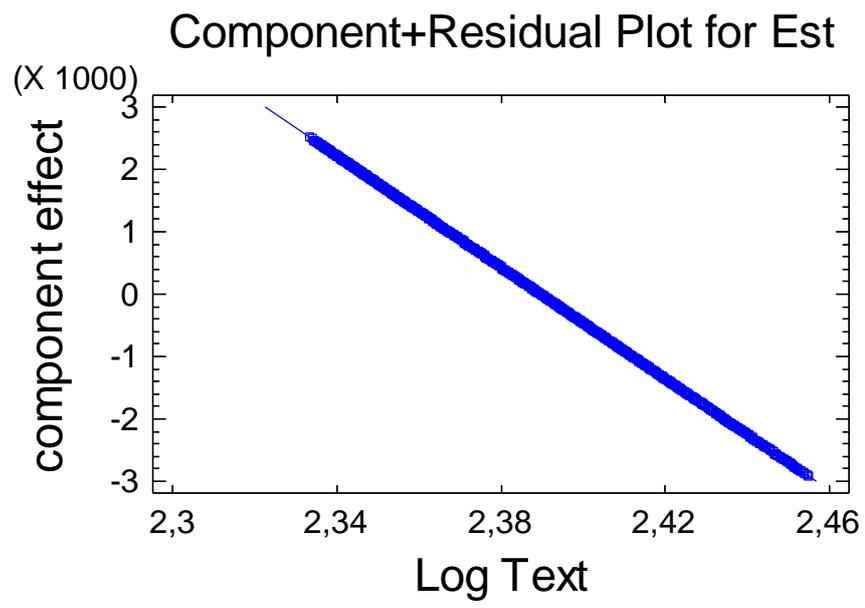
$$\begin{aligned} \text{Est} = & 54247,7 - 44715,5 \cdot \text{Log Text} + 4139,41 \cdot \text{Raiz Text} + 114,334 \cdot \text{Raiz} \\ & \text{Tint} - 4,96271 \cdot \text{Raiz Tint} \times \text{Raiz Text} - 53,1644 \cdot \text{Text} - 1,0504\text{E}10 \cdot \text{Text} \\ & \text{Elevado} + 1327,9 \cdot \text{Tint Elevado} \times \text{Text Elevado} \end{aligned}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 100,0% of the variability in Est. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 100,0%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,045914. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,032882 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the P-value is less than 0.05, there is an indication of possible serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0000, belonging to Log Text. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.



Anexo 7- Resultados de la Generación de Datos Banco de Carga (Horno ELEKA).

Especificaciones:

- ✓ Cantidad de capas: 3
- ✓ Variabilidad de Espesor: 5 mm
- ✓ Espesor Mínimo de la Capa Interna: 100 mm
- ✓ Temperatura Ambiente (Externa): 30 °C
- ✓ Temperatura Mínima: 1140 °C
- ✓ Temperatura Máxima: 1158 °C
- ✓ Variabilidad de Temperatura: 2 °C

Formato de salida de Datos:

Ti; Es; Te; Et

Donde:

- ✓ Ti - Temperatura interna (°C)
- ✓ Es - Espesor de la 1ra Capa (mm)
- ✓ Te - Temperatura externa (°C)
- ✓ Et - Espesor Total (mm)

Formato de salida de los datos			
Ti	Es	Te	Et
1158	575	220,32	710
1158	570	220,92	705
1158	565	221,53	700
1158	560	222,14	695
1158	555	222,75	690
1158	550	223,37	685
1158	545	223,99	680
1158	540	224,62	675
1158	535	225,26	670
1158	530	225,9	665

1158	525	226,54	660
1158	520	227,19	655
1158	515	227,85	650
1158	510	228,51	645
1158	505	229,18	640
1158	500	229,85	635
1158	495	230,53	630
1158	490	231,21	625
1158	485	231,9	620
1158	480	232,6	615
1158	475	233,3	610
1158	470	234	605
1158	465	234,72	600
1158	460	235,43	595
1158	455	236,16	590
1158	450	236,89	585
1158	445	237,63	580
1158	440	238,37	575
1158	435	239,12	570
1158	430	239,88	565
1158	425	240,65	560
1158	420	241,42	555
1158	415	242,2	550
1158	410	242,98	545
1158	405	243,77	540
1158	400	244,57	535
1158	395	245,38	530
1158	390	246,19	525
1158	385	247,02	520
1158	380	247,85	515

Anexo 8- Resultados de la Generación de Datos Lanzas abajo (Horno ELEKA).

Especificaciones:

- ✓ Cantidad de capas: 3
- ✓ Variabilidad de Espesor: 5 mm
- ✓ Espesor Mínimo de la Capa Interna: 100 mm
- ✓ Temperatura Ambiente (Externa): 30 °C
- ✓ Temperatura Mínima: 1140 °C
- ✓ Temperatura Máxima: 1158 °C
- ✓ Variabilidad de Temperatura: 2 °C

Formato de salida de Datos:

Ti; Es; Te; Et

Donde:

- ✓ Ti - Temperatura interna (°C)
- ✓ Es - Espesor de la 1ra Capa (mm)
- ✓ Te - Temperatura externa (°C)
- ✓ Et - Espesor Total (mm)

Formato de salida de los datos			
Ti	Es	Te	Et
1158	575	196,19	710
1158	570	196,72	705
1158	565	197,24	700
1158	560	197,77	695
1158	555	198,3	690
1158	550	198,84	685
1158	545	199,38	680
1158	540	199,93	675
1158	535	200,48	670
1158	530	201,03	665

1158	525	201,59	660
1158	520	202,15	655
1158	515	202,72	650
1158	510	203,3	645
1158	505	203,87	640
1158	500	204,46	635
1158	495	205,05	630
1158	490	205,64	625
1158	485	206,24	620
1158	480	206,84	615
1158	475	207,45	610
1158	470	208,06	605
1158	465	208,68	600
1158	460	209,3	595
1158	455	209,93	590
1158	450	210,57	585
1158	445	211,21	580
1158	440	211,86	575
1158	435	212,51	570
1158	430	213,17	565
1158	425	213,83	560
1158	420	214,5	555
1158	415	215,18	550
1158	410	215,86	545
1158	405	216,55	540
1158	400	217,24	535
1158	395	217,94	530
1158	390	218,65	525
1158	385	219,37	520
1158	380	220,09	515

Anexo 9- Resultados de la Generación de Datos Lanzas arriba (Horno ELEKA).

Especificaciones:

- ✓ Cantidad de capas: 3
- ✓ Variabilidad de Espesor: 5 mm
- ✓ Espesor Mínimo de la Capa Interna: 100 mm
- ✓ Temperatura Ambiente (Externa): 30 °C
- ✓ Temperatura Mínima: 1140 °C
- ✓ Temperatura Máxima: 1158 °C
- ✓ Variabilidad de Temperatura: 2 °C

Formato de salida de Datos:

Ti; Es; Te; Et

Donde:

- ✓ Ti - Temperatura interna (°C)
- ✓ Es - Espesor de la 1ra Capa (mm)
- ✓ Te - Temperatura externa (°C)
- ✓ Et - Espesor Total (mm)

Formato de salida de los datos			
Ti	Es	Te	Et
1158	460	217,53	595
1158	455	218,19	590
1158	450	218,85	585
1158	445	219,53	580
1158	440	220,2	575
1158	435	220,89	570
1158	430	221,58	565
1158	425	222,27	560
1158	420	222,97	555
1158	415	223,68	550
1158	410	224,4	545
1158	405	225,12	540

1158	400	225,85	535
1158	395	226,58	530
1158	390	227,32	525
1158	385	228,07	520
1158	380	228,83	515
1158	375	229,59	510
1158	370	230,36	505
1158	365	231,14	500
1158	360	231,92	495
1158	355	232,72	490
1158	350	233,52	485
1158	345	234,32	480
1158	340	235,14	475
1158	335	235,96	470
1158	330	236,8	465
1158	325	237,64	460
1158	320	238,49	455
1158	315	239,34	450
1158	310	240,21	445
1158	305	241,08	440
1158	300	241,92	435
1158	295	242,82	430
1158	290	243,72	425
1158	285	244,63	420
1158	280	245,55	415
1158	275	246,48	410
1158	270	247,42	405
1158	265	248,37	400

Anexo 10- Resultados de la Generación de Datos de lo Machones (Horno ELEKA).

Especificaciones:

- ✓ Cantidad de capas: 2
- ✓ Variabilidad de Espesor: 5 mm
- ✓ Espesor Mínimo de la Capa Interna: 100 mm
- ✓ Temperatura Ambiente (Externa): 30 °C
- ✓ Temperatura Mínima: 1140 °C
- ✓ Temperatura Máxima: 1158 °C
- ✓ Variabilidad de Temperatura: 2 °C

Formato de salida de Datos:

Ti; Es; Te; Et

Donde:

- ✓ Ti - Temperatura interna (°C)
- ✓ Es - Espesor de la 1ra Capa (mm)
- ✓ Te - Temperatura externa (°C)
- ✓ Et - Espesor Total (mm)

Formato de salida de los datos			
Ti	Es	Te	Et
1158	460	217,72	575
1158	455	218,39	570
1158	450	218,89	565
1158	445	219,56	560
1158	440	220,24	555
1158	435	220,93	550
1158	430	221,62	545
1158	425	222,32	540
1158	420	223,03	535
1158	415	223,74	530
1158	410	224,45	525
1158	405	225,18	520

1158	400	225,91	515
1158	395	226,65	510
1158	390	227,39	505
1158	385	228,15	500
1158	380	228,9	495
1158	375	229,67	490
1158	370	230,44	485
1158	365	231,22	480
1158	360	232,01	475
1158	355	232,81	470
1158	350	233,61	465
1158	345	234,42	460
1158	340	235,24	455
1158	335	236,07	450
1158	330	236,91	445
1158	325	237,75	440
1158	320	238,6	435
1158	315	239,46	430
1158	310	240,33	425
1158	305	241,21	420
1158	300	242,1	415
1158	295	242,99	410
1158	290	243,9	405
1158	285	244,81	400
1158	280	245,74	395
1158	275	246,67	390
1158	270	247,62	385
1158	265	248,57	380