



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EFFECTO DE LAS RELACIONES DE AIRE / GAS NATURAL Y LIMPIEZA SUPERFICIAL DEL ACERO A-36 EN EL RECALENTAMIENTO DE PALANQUILLAS, PARA DISMINUIR LA FORMACIÓN DE CASCARILLA.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

ISMAEL LÓPEZ ESTRADA



MÉXICO, D.F. 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

- PRESIDENTE:** **Profesor: Ciro Eliseo Marquez Herrera**
- VOCAL:** **Profesor: Sergio Garcia Galan**
- SECRETARIO:** **Profesor: Agustín Gerardo Ruiz Tamayo**
- 1er. SUPLENTE:** **Profesor: Arturo Alejandro Sanchez Santiago**
- 2° SUPLENTE:** **Profesor: Balbina Ojeda Ramirez**

SITIOS DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

1. Horno de Recalentamiento, Departamento de Laminación de planta productora de acero ubicada en la Ciudad de México.
2. Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica, Facultad de Química, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. en C. Julio Cesar Romo Castañeda

SUSTENTANTE:

Ismael López Estrada

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPITULO 1. MARCO TEORICO	4
1.1 La Industria siderúrgica en México	4
1.2 El acero	5
1.2.1 El acero A-36	5
1.3 Fabricación del acero	6
1.3.1 Residuos siderúrgicos	7
1.4 Laminación en caliente de productos largos	8
1.4.1 Horno de recalentamiento	8
1.4.2 Tren de laminación	9
1.4.3 Enfriamiento	10
1.4.4 Enderezado y cizalla corte en frio	10
1.4.5 Empaquetado y flejado	11
1.4.6 Productos finales	11
1.5 Recalentamiento de palanquillas	12
1.5.1 Carga en frio de las palanquillas	12
1.5.2 Tipos de horno y recalentamiento	14
1.5.2.1 Calentamiento con 1 y 2 zonas	14
1.5.2.2 Calentamiento con 3 zonas	15
1.5.2.3 Limitaciones	16
1.5.3 Horno de Empujadores	16
1.5.3.1 Zonas del horno	17
1.5.4 Deshornamiento	18
1.5.4.1 Deshornado frontal	18
1.5.4.2 Deshornado lateral	18
1.5.5 Combustión	19
1.5.5.1 Tipos de Combustión	19
1.5.5.2 Gas Natural	24

1.5.5.3 Relación aire / gas natural	25
1.5.5.5 Temperatura de la flama	25
1.5.5.6 Temperatura vs razón de flama	26
1.5.5.7 Tipos de flama	27
1.5.5.8 Características de los quemadores	27
1.6 Cascarilla	29
1.6.1 Tipos de cascarilla	29
1.6.2 La Formación de cascarilla de acero	30
1.6.2.1 Mecanismo de formación de cascarilla	31
1.6.2.2 Secciones en palanquillas	32
1.6.3 Espesor y capas	34
1.6.3.1 Estructura de las capas	34
1.6.4 Cascarilla en el horno de recalentamiento	35
1.6.4.1 Posición de las zonas de calentamiento	37
1.6.4.2 Ganancia de energía por la formación de cascarilla	38
1.6.4.3 Carga en caliente	38
1.6.4.4 Cascarilla en el proceso de deformado	39
1.6.5 Cascarilla primaria y secundaria	39
1.6.6 Efectos negativos de la formación de cascarilla	40
1.6.7 Caracterización del recalentamiento (Curvas)	41
1.6.8 Balance: Costo- Beneficio	42
1.6.9 Aire de infiltración en el horno	42
1.6.10 Presión en el interior del horno	43
1.6.11 Costos	43
1.6.12 Aplicaciones de la cascarilla	43
1.7 Diseño de experimentos	44
1.7.1 Diseño factorial 2 ^k	46
CAPITULO 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	47
2.1 Caracterización de infraestructura y materiales	47
2.2 Personal involucrado en campo	49
2.3 Pruebas de recalentamiento y manipulación de parámetros	50

CAPITULO 3 RESULTADOS	55
3.1 Formación de cascarilla en palanquillas con limpieza	55
3.2 Formación de cascarilla en palanquillas sin limpieza	62
CAPITULO 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
4.1 Pruebas de recalentamiento A, B, C, y D en palanquillas con limpieza	69
4.2 Pruebas de recalentamiento E, F, G y H en palanquillas sin limpieza	72
CAPITULO 5 CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	79

INTRODUCCIÓN

Los productos largos de acero, tales como perfiles estructurales y comerciales, comúnmente se laminan en caliente y se fabrican a partir de la deformación de palanquillas cuadradas, estas palanquillas se introducen en hornos de recalentamiento con el objetivo de elevar su temperatura entre 1100 y 1250 °C, durante el proceso de recalentamiento es muy importante controlar los parámetros que afectan directamente la calidad del producto final y el costo de su fabricación.

Estos parámetros que afectan directamente son: el tiempo de permanencia de la palanquilla dentro del horno de recalentamiento, la temperatura del medio, la relación aire – gas, especificación del acero y la limpieza superficial de las palanquillas.

Durante el proceso de recalentamiento ocurre una reacción de oxidación en la palanquilla debido a la combustión del aire – gas dentro del horno, generando un subproducto llamado “cascarilla”, la cual, está compuesta en su mayoría por óxidos de hierro comúnmente llamados wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3).

Esta “cascarilla” es considerada como pérdida metálica, y al incrementarse durante el proceso de recalentamiento disminuye el rendimiento metálico y puede afectar la calidad y costo del producto terminado final.

Con la finalidad de optimizar el proceso de recalentamiento para obtener productos de buena calidad y bajo costo, se analizaron los siguientes parámetros: relaciones de aire / gas natural en la zonas de calentamiento e igualación del horno de recalentamiento, y limpieza superficial de las palanquillas.

Los resultados de los análisis mostrados en el presente trabajo determinan los parámetros ideales en la manipulación de un horno de recalentamiento,

obteniendo así palanquillas para laminar con una menor cantidad de cascarilla posible, lo cual es altamente rentable para un proceso de laminación de palanquillas en cualquier planta productora de acero en México y el mundo.

OBJETIVOS

- 1.- Analizar el efecto de la limpieza superficial de palanquillas de acero ASTM A-36 con respecto a la cantidad de cascarilla formada durante el proceso de recalentamiento.
- 2.- Estudiar el efecto que tienen las relaciones aire / gas en las zonas de calentamiento e igualación del horno de recalentamiento respecto a la formación de cascarilla.
- 3.- Determinar las condiciones óptimas de operación del recalentamiento de palanquillas de acero ASTM A-36 para producir perfiles comerciales largos.

CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 La Industria Siderúrgica en México

La siderurgia mexicana tuvo en el año del 2012 una producción de acero de 18.1 millones de toneladas, lo que representó el 1.2 % del total de la producción mundial ocupando el lugar número 13 en producción lejos aún de grandes potencias como China, Japón ó Estados Unidos como se muestra en la figura 1.1 [1].

MUNDO: RANKING DE PRODUCCIÓN DE ACERO CRUDO				
WORLD: RANKING OF CRUDE STEEL PRODUCTION				
MILLONES DE TONELADAS / MILLION TONS				
País / Country	2012		2011	
	Ranking	Vol.	Ranking	Vol.
China	1	716,5	1	702,0
Japón / Japan	2	107,2	2	107,6
Estados Unidos / United States	3	88,7	3	86,4
India	4	77,6	4	73,5
Rusia / Russia	5	70,4	5	68,9
Corea del Sur / South Korea	6	69,1	6	68,5
Alemania / Germany	7	42,7	7	44,3
Turquía / Turkey	8	35,9	10	34,1
Brasil / Brazil	9	34,5	9	35,2
Ucrania / Ukraine	10	33,0	8	35,3
Italia / Italy	11	27,3	11	28,7
Taiwan - China	12	20,7	12	20,2
México / Mexico	13	18,1	13	18,1
Francia / France	14	15,6	14	15,8
Irán / Iran	15	14,5	16	13,2
España / Spain	16	13,6	15	15,5
Canadá / Canada	17	13,5	17	12,9
Reino Unido / United Kingdom	18	9,6	18	9,5
Polonia / Poland	19	8,4	19	8,8
Austria	20	7,4	22	7,5

Fig. 1.1 Producción mundial de acero. Fuente: Alacero: Asociación latinoamericana del acero.

En este contexto destaca el crecimiento de productos laminados como: planos, largos y tubos sin costura en 4.5 %, así como de los productos básicos: hierro esponja y arrabio en 3.9 %, sin embargo la producción de productos derivados se redujo en 5.1 % [2].

La estructura en producción de bienes siderúrgicos nos muestra una amplia ventaja sobre los productos laminados (47.6%), esto por su gran gama de aplicaciones y usos en la ingeniería y arquitectura, como se puede observar en la figura 1.2.

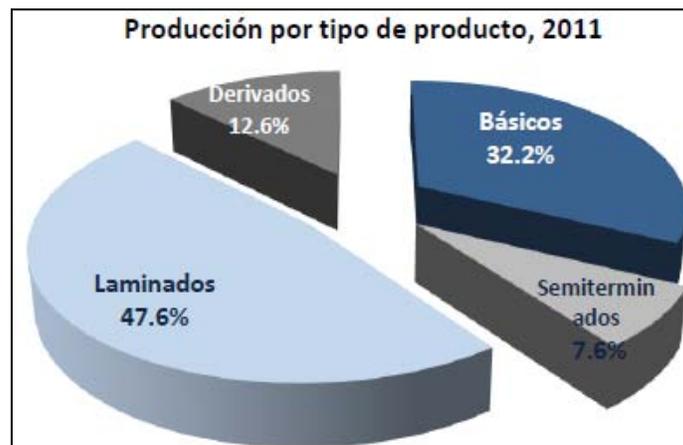


Fig. 1.2 Producción por tipo de producto en México. Fuente: CANACERO.

1.2 El acero

El acero es el más importante, multifuncional y adaptable de los materiales y juega un papel esencial en sectores industriales como: la construcción, el transporte, agricultura, maquinaria pesada, entre otras.

Es una aleación de hierro que contiene entre 0.02 y 2 % de carbón en peso y comúnmente incluye elementos no metálicos como: silicio, fósforo, azufre, además de elementos metálicos como: manganeso, cromo, níquel y molibdeno [3].

1.2.1 El acero A-36

El acero A36 es una aleación de acero al carbono que es muy comúnmente usado en los Estados Unidos y países de Latinoamérica como México, aunque existen

muchos otros aceros, superiores en resistencia como ASTM A529 G50 y el ASTM 572 G50 cuya demanda está creciendo rápidamente [4].

La denominación A36 fue establecida por la ASTM (American Society for Testing and Materials). El acero A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: planchones, palanquillas, perfiles estructurales, tubos, láminas, platinas, entre otros.

La calidad de éste tipo de acero es fundamental en la producción de perfiles comerciales laminados en las plantas siderúrgicas, ya que en los años 2012 y 2013 la producción de acero con esta calidad fue del 48%.

La tabla 1.1 muestra la composición química nominal de este tipo de material.

Norma	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu
ASTM	0.25-0.29	0.15-0.40	0.60-1.20	0.04 Máx.	0.05 Máx.	0.04-0.20

Tabla 1.1 Composición química nominal del acero A-36 para barras y placas [13].

1.3 Fabricación del acero

La producción del acero se efectúa actualmente mediante dos rutas: la convencional de la siderurgia integral, vía horno alto y la ruta del horno eléctrico de arco, siendo este último el actual proceso de fabricación de acero en las siderúrgicas convencionales actuales de la ciudad de México.

La fabricación de acero en la acería al oxígeno representa en la actualidad un 60% de la producción mundial. La fabricación basada en la fusión de la chatarra y en ocasiones de pre reducidos de hierro en horno de arco eléctrico, representa un 33% aproximadamente de dicha producción.

La ruta de fabricación de acero mediante el horno de arco eléctrico se basa en la fusión de chatarras. La energía térmica necesaria para la fusión proviene del arco eléctrico que se produce entre los electrodos del horno [5].

Algunas ventajas de la fabricación de acero en horno de arco eléctrico son, que se pueden emplear todo tipo de cargas (chatarra, hierro de reducción directa, arrabio, etc.), baja inversión comparada con la ruta integral y alta eficiencia del proceso [5]. La fase final de la fabricación del acero, para transformarlo en productos útiles, es la solidificación; la colada continua es actualmente el proceso más utilizado. En la figura 1.3 podemos observar el proceso convencional de una acería.

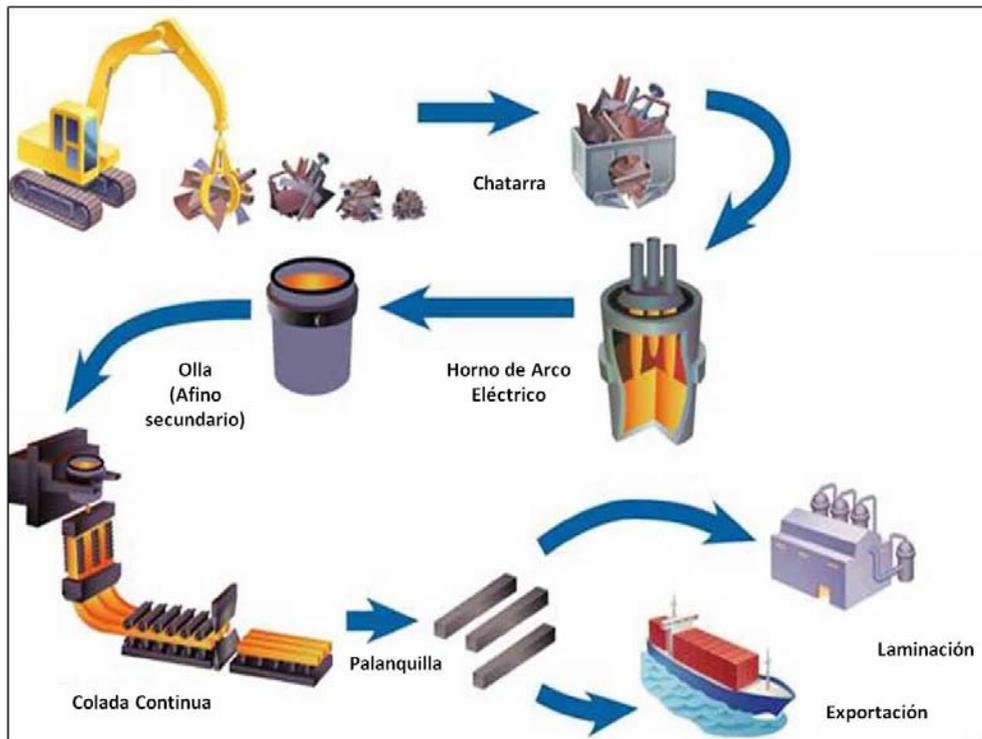


Fig. 1.3 Proceso general de una acería convencional.

1.3.1 Residuos siderúrgicos.

La industria del acero y dentro de su amplia gama de producción genera una gran cantidad de residuos. Los principales residuos producidos son los siguientes [6]:

- Escorias (de horno alto, de acerías y de procesos de desulfuración).
- Lodos (de alto horno, de acerías, de laminación en caliente y de tratamiento de aguas).
- Polvos (de materias primas, de horno alto y de acerías).
- **Cascarilla** (de laminación).
- Refractarios (de horno alto y de acerías).

1.4 Laminación en Caliente de productos largos

El acero después de fundido, afinado y colado no tiene la forma ni las características físicas necesarias para satisfacer las especificaciones correspondientes a cada tipo de acero. Con objeto de obtener las formas, dimensiones y propiedades que éste necesita, el acero se somete a procesos de conformado mecánico y/o acabado [7]. Estos procesos se realizan a partir del producto sólido bruto (palanquillas) y se pueden clasificar en los siguientes:



Fig. 1.4 Representación secuencial del proceso de laminación en caliente

El conjunto de una planta laminadora típica de la Ciudad de México está compuesto por el horno de recalentamiento de laminación propiamente dicho, sistemas de enfriamiento y equipos de empaquetado y flejado. Estos se pueden observar gráficamente en la figura 1.5 [8].

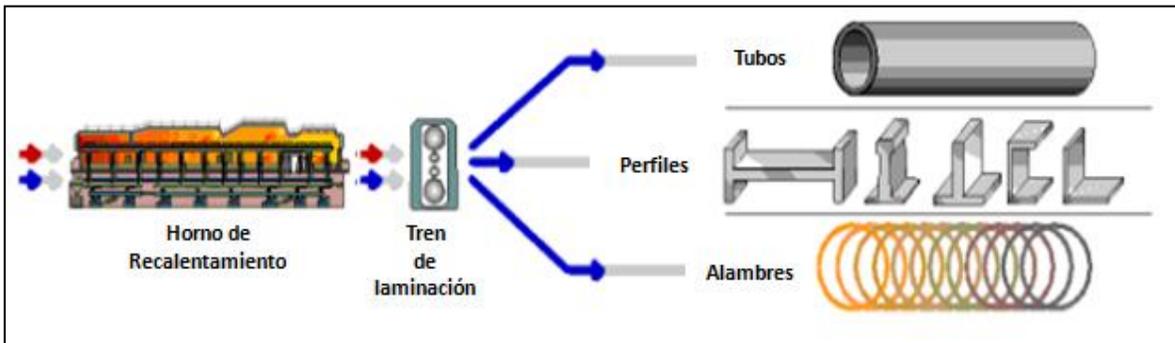


Fig. 1.5 Diagrama representativo del proceso de Laminación en Caliente.

1.4.1 Horno de recalentamiento

Es un horno cuyo interior está cubierto con material refractario base Al_2O_3 (alúmina) y MgO (magnesia), consta de un conjunto de quemadores de aire/gas para ayudar a elevar la temperatura de las palanquillas de acero que son introducidas en él. Tiene una barra empujadora que introduce las palanquillas frías ó pre calentadas por una ventana lateral. Estas empujan a las demás y cuando

son recalentadas son forzadas a salir por otra ventana situada en la pared opuesta.

El proceso de laminación “en caliente” debe ser precedido de un horno de recalentamiento. Incluso en los casos de carga caliente, el acero inicial debe calentarse siempre hasta la temperatura ideal de laminación, que es de 1100 - 1200 °C. [8]

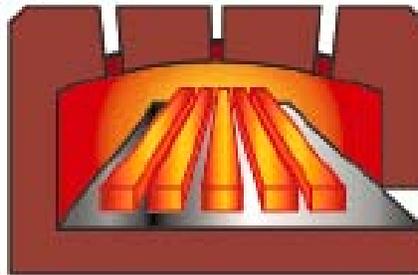


Fig. 1.6 Esquema representativo de un horno de recalentamiento.

1.4.2 Tren de laminación

El tren de laminación propiamente dicho está formado básicamente por tres estaciones:

- a) Grupo desbastador, que es un tren continuo formado por cajas horizontales y una cortadora de palanquillas despuntadora.
- b) Grupo intermedio, dividido en dos: El primero de ellos está formado por cajas como las de un grupo desbastador. El segundo lo forman las “cajas Reynolds” que se caracterizan porque tienen rodillos alternativamente horizontales y verticales. También hay cizallas, carros de bucles y controles. Después del segundo tren intermedio y antes del bloque acabador se tiene el carro de bucles vertical y cizalla [8].
- c) Bloque acabador, compuesto por cajas de laminación que dan la forma angular final al producto.

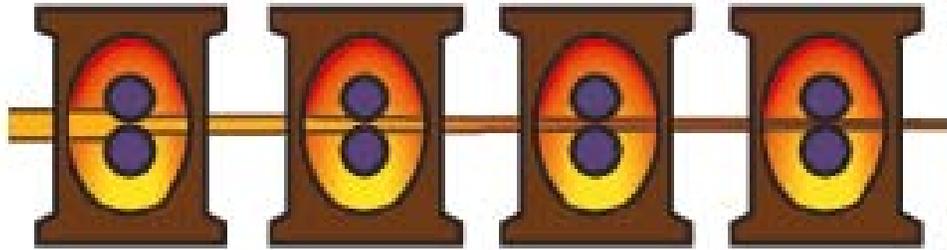


Fig. 1.7 Cajas de un tren de laminación continuo.

1.4.3 Enfriamiento

Los perfiles que salen del bloque acabador a unos 1000°C , son enfriados después. Primero es con agua a presión por toberas y después por aire, mientras se desplaza el perfil hasta lo que es la mesa de enfriamiento. Hay ventiladores que efectúan el enfriamiento por aire [8].



Fig. 1.8 Esquema representativo de una mesa de enfriamiento de una planta laminadora.

1.4.4 Enderezado y cizalla corte en frío

Los procesos consecuentes después del enfriamiento son el enderezado del acero y su posterior corte en la cizalla corte en frío, esta etapa del proceso los perfiles son cortados a las dimensiones del producto final como se muestra a continuación.

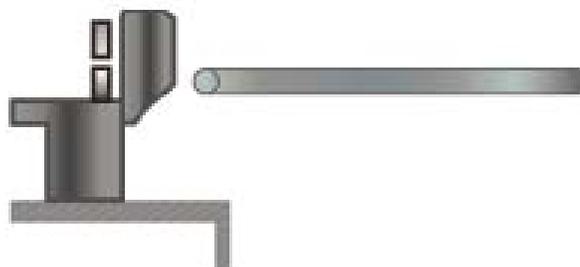


Fig. 1.9 Enderezado de perfiles y Cizalla de corte en frío.

1.4.5 Empaquetado y Flejado.

El empaquetado va de la mano junto con el flejado de los paquetes de perfiles y sirve para embalar el grupo de barras laminadas que será llevado a su posterior envío, como se muestra a continuación:

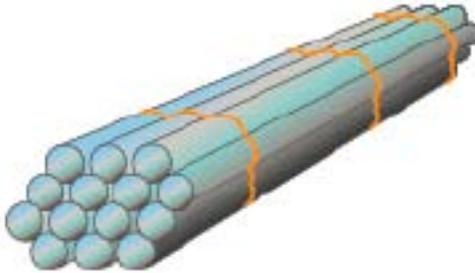


Fig. 1.10 Empaquetado y flejado de perfiles.

1.4.6 Productos finales

Una vez flejado el material, el proceso termina cuando el producto es empaquetado, transportado, pesado y almacenado en las naves de logística. Los productos finales serán comercializados principalmente a la industria de la construcción.

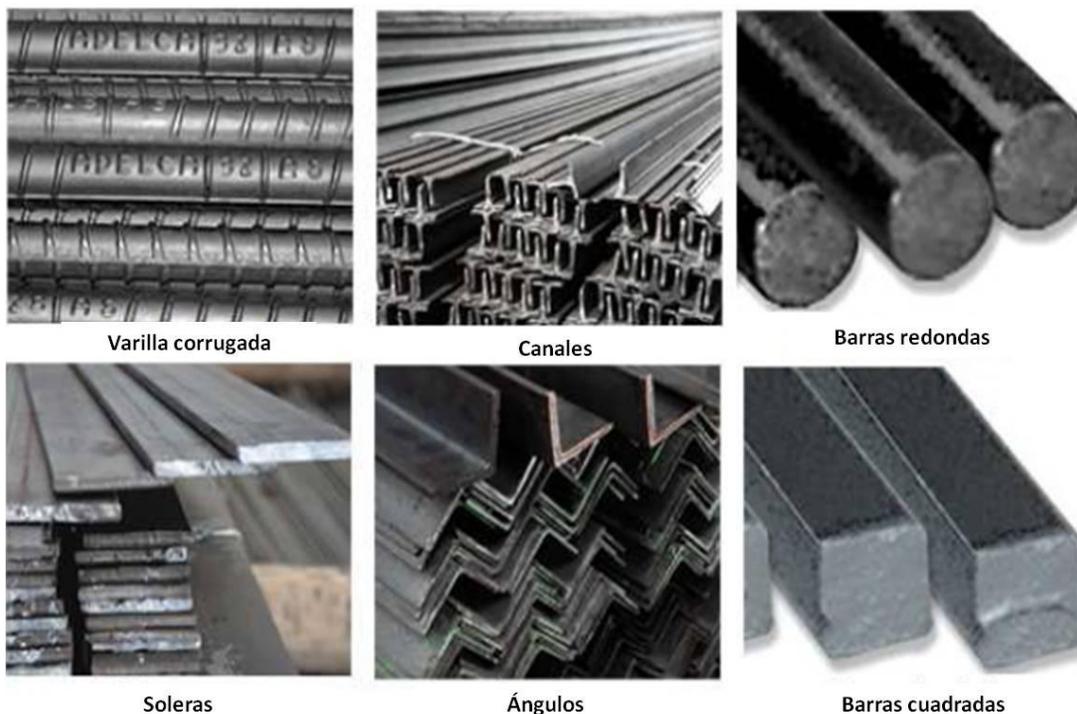


Fig. 1.11 Productos finales típicos de una planta de laminación convencional de la Ciudad de México.

1.5 Recalentamiento de palanquillas

El término recalentamiento indica que el material ya estuvo caliente, o sea, después de la colada continua, se enfrió (parcial o totalmente) y ahora necesita que se caliente nuevamente [15].

La función principal del horno es recalentar estas palanquillas de acero siempre hasta la temperatura ideal de laminación, que oscila entre 1100 y 1200 °C.



Fig. 1.12 Horno de recalentamiento de una unidad siderúrgica convencional.

1.5.1 Carga en frío de las palanquillas

Cuando la carga del horno se hace con la llamada “carga en frío”, la temperatura de la palanquilla o pieza es a temperatura ambiente. Pero más importante que eso es que es homogénea o sea, el núcleo y la superficie externa están a la misma temperatura.



Fig. 1.13 Carga frontal en frío de un horno de recalentamiento.

Durante el recalentamiento el calor es transferido desde la superficie de las palanquillas hasta el interior de las mismas, por tanto el núcleo de las palanquillas será siempre más frío que la superficie. Esta diferencia se caracteriza por el delta "T", el cual representado como un modelo indica que el delta de temperatura (ΔT) es la diferencia entre la temperatura de la cara más caliente y el punto más frío.

Quien define el ΔT requerido es el tren de laminación, o sea el tipo de equipo mecánico que procesará la palanquilla caliente. Este ΔT depende, básicamente, del tiempo de permanencia, por eso nunca será cero, pues eso exigiría un horno de largo infinito [15].

En la figura 1.14 podemos observar el comportamiento de la temperatura en los puntos representativos de las palanquillas (interior y exterior), introducidas a lo largo del horno (%), así como el comportamiento de la temperatura interna del mismo.

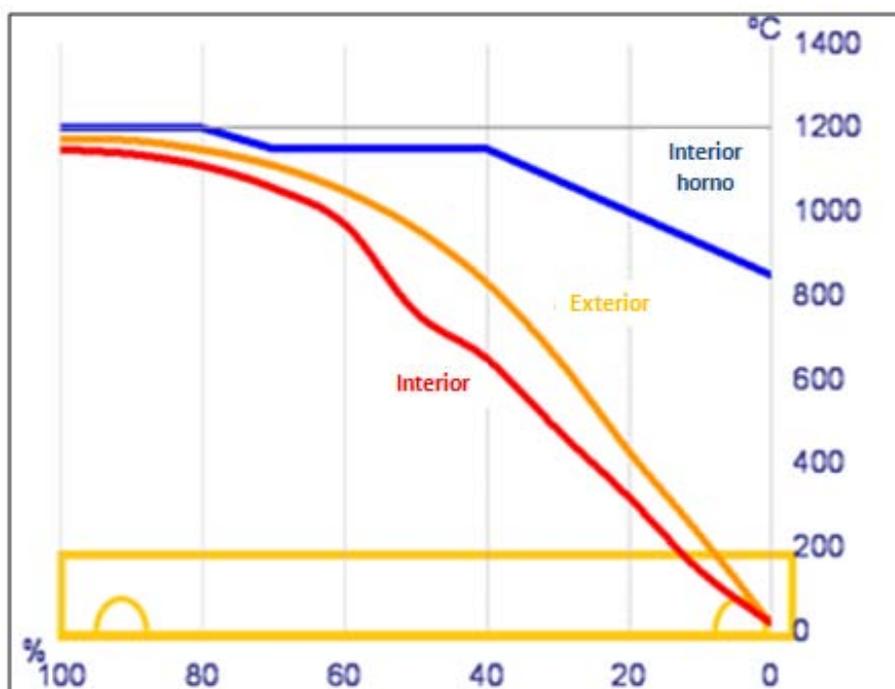


Fig. 1.14 Curvas de calentamiento de zona interior y exterior de las palanquillas (rojo y naranja), así como del interior del horno de recalentamiento (azul) a lo largo del mismo [15].

1.5.2 Tipos de horno y recalentamiento

Los hornos de recalentamiento de palanquillas de laminación son del tipo carga móvil ó continuos, es decir se pueden caracterizar como un cambiador de calor tipo contracorriente donde el material (el acero) se desplaza de la zona de carga (entrada) para la zona de descarga y el calor (la energía) se mueve desde la descarga (salida) hasta la carga. Se componen de tres zonas de calentamiento para las barras de acero: pre calentamiento (zona 1), calentamiento (zona 2) e igualación (zona 3) [16].

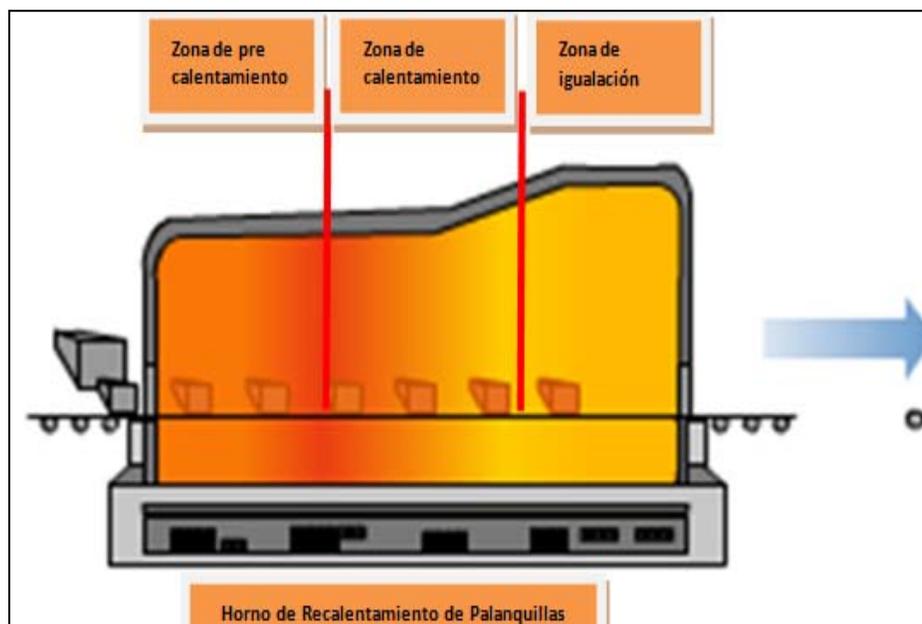


Fig. 1.15 Esquema representativo de un horno de recalentamiento de laminación.

1.5.2.1 Calentamiento con 1 y 2 zonas

El modelo clásico de horno hasta 1945 era el del tipo empujador, inicialmente con una sola zona y solera inclinada. Con la necesidad de más capacidades, una segunda zona se agregó. En este tipo de horno el material se calienta sólo por uno de los lados, el lado superior [16].

La carga puede ser frontal (una gran puerta del ancho del horno), como lateral (una pequeña puerta con ancho de 3 veces el ancho del material inicial).

Lo mismo es válido para la descarga. Existen hornos en las más variadas combinaciones:

- Carga frontal y descarga frontal (los más antiguos).
- Carga frontal y descarga lateral (la mayoría de los hornos en la actualidad).
- Carga lateral y descarga lateral.
- Carga lateral y descarga frontal (muy raros).
- La solera inclinada fue un intento de reducir la fuerza del empujador, pero fue abandonada pocos años después.

1.5.2.2 Calentamiento con 3 zonas

Con la necesidad siempre creciente de tener mayor capacidad, una tercera zona se añadió, pero ahora en la parte inferior de la solera, pues de otra manera el horno quedaría muy largo. Como la carga se empuja por un recorrido de varios metros (hasta 20 ó más) presenta una tendencia de desviarse de la línea de centro y cambiar en dirección a una de las paredes. A esta tendencia se la debe monitorear constantemente, pues lleva a la destrucción de la pared e interrupción de la producción por varios días.

Durante las paradas en el tren de laminación existe el riesgo de que las palanquillas “se peguen” unas con otras dentro del horno. Este fenómeno denominado “pegadura” está siempre asociado a una mala combustión, en el caso con exceso de aire. El material una vez descargado del horno sólo puede tener 2 destinos: o se lamina ó se rechaza para enviar nuevamente a fundir.

Al material rechazado nunca se debe enfriar y recargar para un segundo recalentamiento, aunque eso sea todavía una práctica aceptada y practicada en muchas laminaciones (laminación no sólo es el proceso de deformación sino también la designación al conjunto formado por horno + laminador) [16].

1.5.2.3 Limitaciones

Los hornos de empuje presentan varias limitaciones, tales como:

- Existe un límite entre la distancia por empujar y la altura de la sección del material inicial el cual puede ser mejor entendido en el gráfico de la figura 1.16.
- Arriba del límite “sin problemas” el material se enrolla, forma un amontonamiento y termina destruyendo la bóveda.

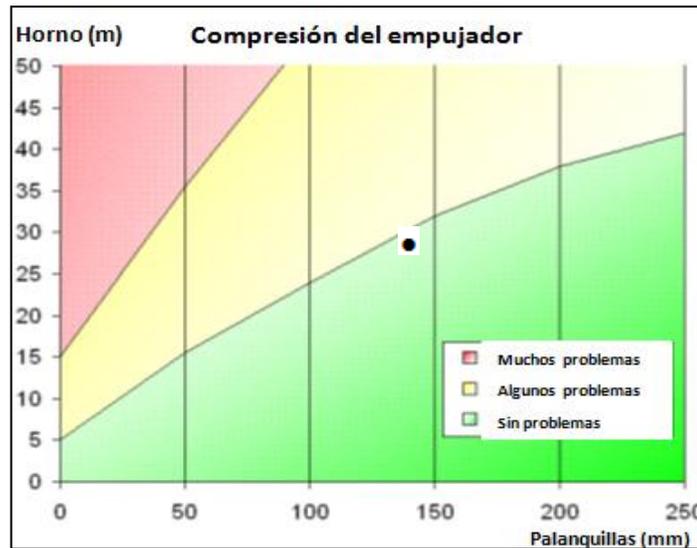


Fig. 1.16 Problemas que se presentan debido a la longitud del horno de acuerdo a la sección de la palanquilla de acero (mm) [16]. • Situación de todos los Hornos convencionales de la Cd. de México.

1.5.3 Horno de empujadores.

El horno de empujadores dispone de una cámara alargada, con una boca de entrada (boca de carga de palanquillas frías) y una boca de salida (por donde salen las palanquillas calientes); construida con ladrillo refractario, modernamente llamada manta aislante, revestida exteriormente de chapa, a lo largo del horno existen varios quemadores de combustible “fuel – oil” repartidos por zonas de calentamiento. El horno de calentamiento de palanquilla típico tiene una capacidad de 50 t/h y su tipo de combustible es de gas natural. La sección de las palanquillas varía desde los 135, 140 y hasta 150 mm de ancho.

La palanquilla es colocada mediante grúas en la mesa de carga, desde donde es empujada al interior del horno a través de pistones hidráulicos, los que pueden empujar hasta tres barras a la vez. Todo el sistema de movimiento de palanquilla es hidráulico y está compuesto por un empujador y un deshornador [9].



Fig. 1.17 Vista interior de un horno de empujadores.

1.5.3.1 Zonas del horno.

El Horno de recalentamiento está constituido físicamente de tres zonas: zona de pre calentamiento, calentamiento e igualación, donde la tubería de aire de combustión alimenta a cada una de dichas zonas. El combustible es distribuido mediante tuberías cuyo elemento de control es la llave de paso, la cual es manipulada por los operadores según el requerimiento de aumento ó disminución de temperatura interna del horno medida por medio de termopares instalados [9].



Fig. 1.18 Tubería de aire de combustión de un horno.

1.5.4 Deshornamiento.

El deshornamiento es referido como el mismo retiro de las palanquillas del interior del horno, estos presentan diferentes tipos ó maneras de descargar ó desenhornar.

1.5.4.1 Deshornado frontal.

Este tipo de deshornado es muy común en los hornos del tipo empujador, que terminan en una rampa. Cada nueva pieza empuja otra pieza que cae en la rampa y es deshornada. Este método está en desuso así como el horno tipo empujador.

La puerta debe tener el ancho del horno, esto representa un área muy grande con puertas enormes; por eso resultan pérdidas de calor, entrada de aire proveniente del medio ambiente (por el efecto chimenea) y la necesidad de rieles refrigerados en la rampa.

Las piezas rechazadas se recogen fuera del horno en un lugar apropiado. La pieza al caer del horno se queda integralmente expuesta al ambiente y empieza a enfriarse.

El accionamiento y la estructura soporte de la puerta del horno deben ser independientes de la estructura del mismo para garantizar una mejor “estanqueidad” lo cual es referido cómo la falta de fugas de calor dentro del horno [16].

1.5.4.2 Desenhornado lateral.

La evolución de este proceso fue la retirada lateral de las piezas, con el auxilio de una barra extractora.

La barra extractora (ó “peel bar”) empuja la pieza, que se fricciona con la solera hasta que 2/3 de su largo esté fuera del horno (cuando entonces un camino de rodillos externo al horno asume la función del movimiento de la pieza).

Esta barra deshornadora entra al horno en balance y se debe refrigerar cuando está fuera del horno.

El operador del horno necesita una cámara de vídeo para visualizar la barra y la pieza que se extraerá, pues en muchos hornos esta operación todavía es manual [16]. En muchos laminadores la primera caja está muy cerca del horno de tal forma que la cabeza de la pieza ya se está laminando y la cola aún está dentro del horno.



Fig. 1.19 Deshornado lateral de un horno convencional.

1.5.5 Combustión

La combustión es la reacción química rápida del oxígeno del aire u oxígeno directo, que se define como comburente, con los distintos elementos que constituyen el combustible principalmente carbono (C) e hidrógeno (H). Estas reacciones químicas liberan energía produciendo aumentos locales de temperatura, lo que origina un flujo de calor hacia el exterior. En este sentido la combustión es primordial y ocurre en el interior del horno para el recalentamiento de las palanquillas.

1.5.5.1 Tipos de Combustión

a) Combustión Perfecta:

Se produce cuando el total del combustible reacciona con el oxígeno. En el caso de una combustión perfecta, los productos de esta combustión son solamente CO_2 , H_2O , O_2 y N_2 . Es decir no quedan residuos de combustible sin quemar. Esto no pasa en los hornos de recalentamiento de laminación.

Los reactivos deben ser mezclados en proporciones adecuadas para que ocurra una combustión eficiente. En caso contrario, el proceso será ineficaz y las reacciones de combustión no pueden ser completadas o pueden no ocurrir continuamente, siendo así un riesgo significativo para el personal, el ambiente, y el equipamiento. Los riesgos potenciales incluyen las emisiones de gases tóxicos de monóxido de carbono, explosiones, incendios, quemaduras y sobrecalentamiento del equipo.

Hablando de **estequiometría** como el estudio de las cantidades relativas de reactivos y productos de una reacción, la razón estequiométrica o ideal describe las reacciones en que los reactivos son perfectamente mezclados en las proporciones teóricas o perfectas necesarias para completar la reacción, sin tener ninguna sobra o reactivos no utilizados en los productos. En las reacciones de combustión en hornos, esto significa que ningún componente de hidrogeno o de carbono en un combustible permanece no oxidado (no quemado) o parcialmente oxidado y que ningún exceso de moléculas de oxidante (oxígeno) permanecen en los productos de la combustión.

La siguiente es una reacción típica de una combustión perfecta donde hay generación de CO₂, H₂O, y N₂ como únicos productos de combustión.



“Reacción de combustión perfecta”

En la práctica es casi imposible obtener una mezcla homogénea y total del combustible con el comburente (aire u oxígeno directo). Esto obliga a emplear una cantidad real de aire mayor a la estequiométrica, **con el propósito de producir una combustión lo más completa posible** en los hornos de recalentamiento.

b) Combustión incompleta

La combustión incompleta acontece cuando no existe un nivel suficiente de oxígeno disponible para oxidar completamente un combustible. El resultado es un combustible que está parcialmente oxidado. Cuando no está disponible un nivel

suficiente de oxígeno, la reacción se llama **“rica” en combustible con llama reductora**. En este caso hay un enfriamiento de la llama por el adicional de combustible introducido en el quemador. El resultado es, no sólo una pérdida de rendimiento y un consecuente aumento del consumo de combustible, sino también la generación de un gas tóxico: el CO ó monóxido de carbono. Pequeñas cantidades ya son nocivas a la salud (40 ppm). Este gas CO ó monóxido de carbono es un gas todavía combustible (pues está sólo parcialmente oxidado) y puede generar una postcombustión en ciertos lugares del horno bajo ciertas condiciones.

La siguiente es una reacción típica de una combustión incompleta donde hay generación de humos, usar menos del 5% de exceso de aire crea compuestos volátiles (CVs), tales como alcoholes (CH₂OH), amoniaco (NH₃), formaldehidos (H₂CO) y metano no quemado (CH₄).



“Reacción de combustión incompleta” (rica ó con deficiencia de aire).

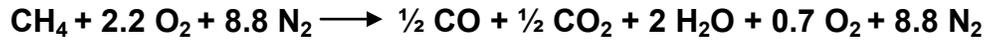
c) **Combustión completa**

Combustión perfecta no es lo mismo que combustión completa. Como se ha descrito anteriormente, perfecto implica que los reactivos estén perfectamente mezclados en las proporciones teóricas necesarias, sin tener ningún combustible no utilizado o resto de oxidante en los productos de la combustión. Por tanto la combustión completa sólo implica que el combustible es quemado completamente. Combustión perfecta es un caso especial de una combustión completa en que no hay ningún combustible extra u oxidante dejado en los productos de la combustión.

Cuando tenemos exceso de aire (el caso más frecuente en hornos de recalentamiento de laminación) se dice que la combustión es completa y la llama resultante es **oxidante o “pobre”**.

En la siguiente es una reacción típica de combustión completa donde hay un exceso de oxígeno (aire), incluso los productos reales de la combustión completa

tienen trazas de CO y algunos compuestos volátiles orgánicos debido a las mezclas imperfectas que se dan en algunos hornos de recalentamiento.



“Reacción de combustión completa (pobre ó con exceso de aire)”

Mientras mayor es el exceso de aire, menor es la probabilidad de una combustión incompleta, pero también disminuye la temperatura de la reacción y la eficiencia térmica del proceso. Por lo tanto, **se debe tratar de emplear el exceso de aire mínimo para que se quemé la totalidad del combustible**; tal y como se muestra en el gráfico de la figura 1.20.

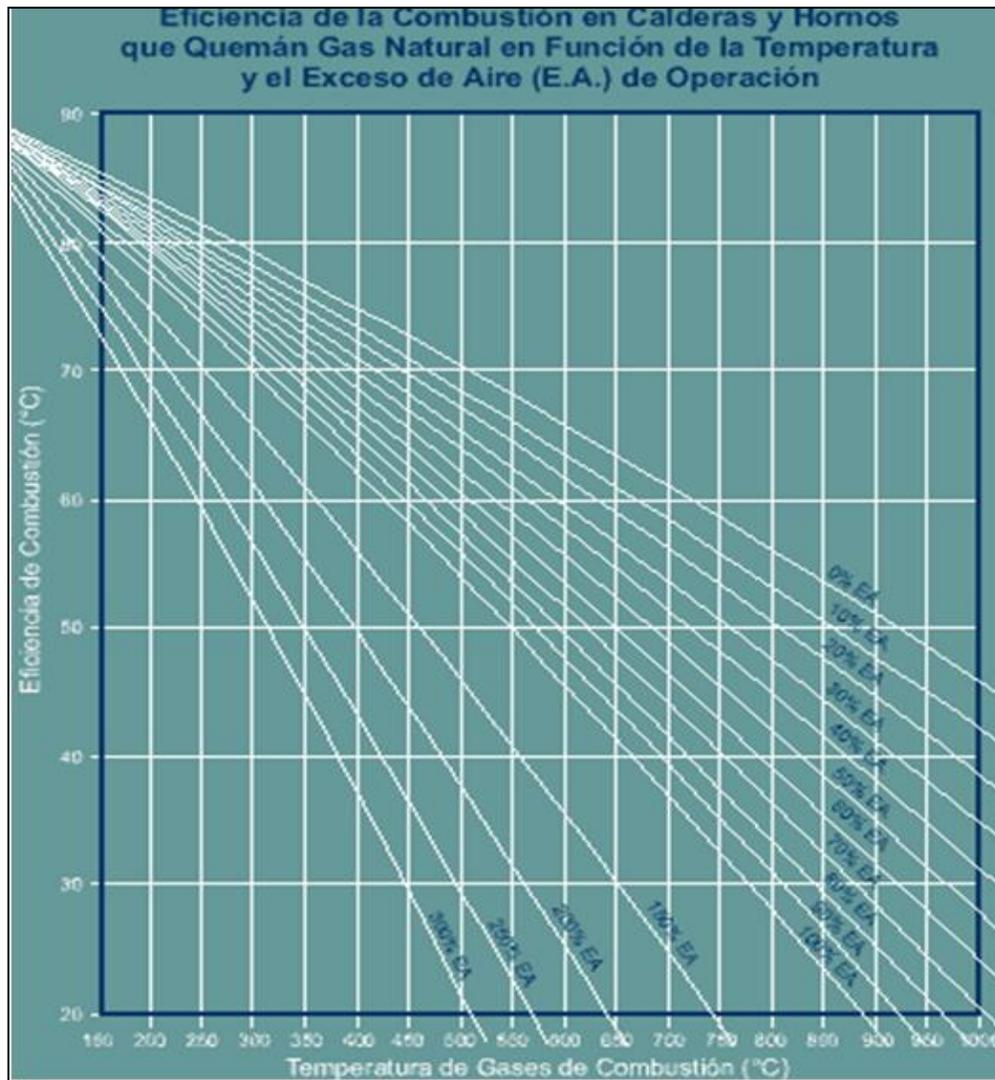


Fig. 1.20 Eficiencia de la combustión con gas natural respecto a la Temperatura a diferentes % de exceso de aire [10].

Para tener un nivel de aire adecuado, el exceso de aire es esencial para una combustión completa. Una relación aire-gas estequiométrica, aunque asegura la máxima eficiencia y temperatura de la llama, en la práctica llevará a una combustión incompleta, ya que difícilmente se lograrán las condiciones de mezcla para lograr una combustión completa. En general, debe evitarse la mezcla aire-gas cercana a la estequiométrica, dado que pequeños cambios en los parámetros de operación como pequeñas variaciones en el suministro de aire pueden desbalancear la relación aire-gas, produciéndose un aumento del CO. Para evitar el enfriamiento de la llama causado por un elevado exceso de aire se debe disminuir el mismo (Fig. 1.21), ya que de lo contrario podemos llevar a una combustión incompleta del combustible, produciéndose CO (Fig. 1.22).

Este problema se puede producir en los quemadores que permiten variar el consumo de combustible manteniendo fijo el suministro de aire. Al operar cerca del máximo, funciona eficientemente, pero al disminuir la entrada de combustible aumenta el exceso de aire [10].

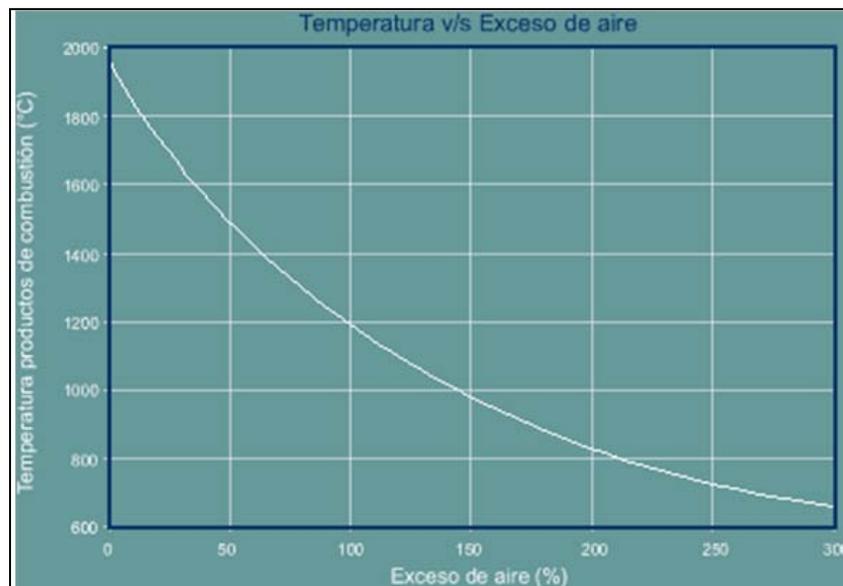


Fig. 1.21 Curva que representa la temperatura alcanzada de acuerdo al exceso de aire (%) utilizado [10].

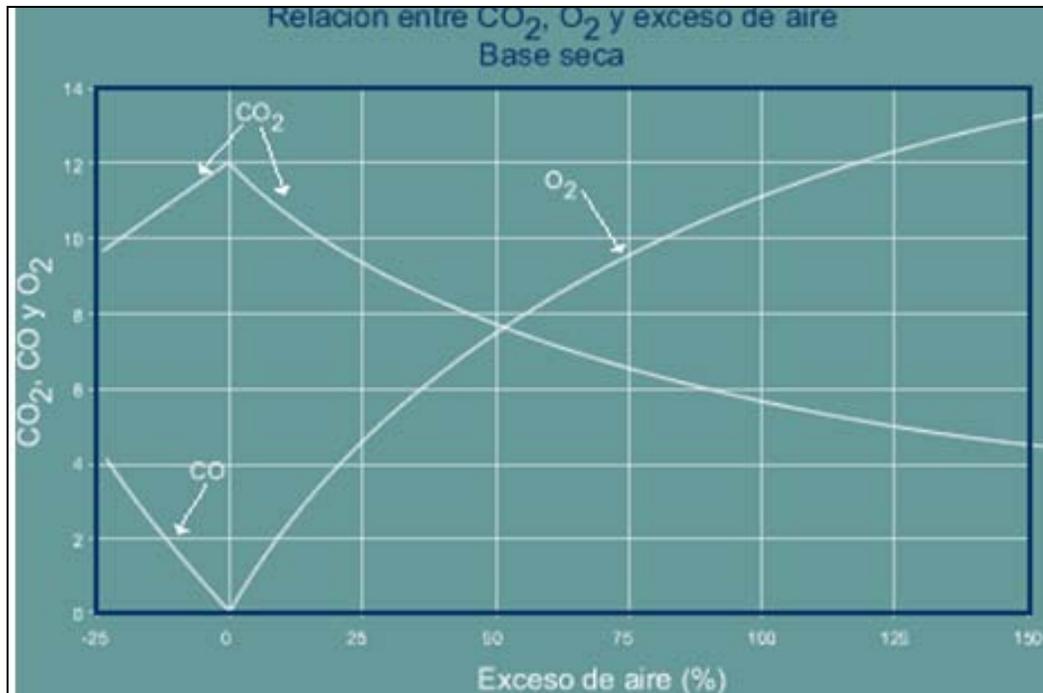


Fig. 1.22 Relación entre CO₂, O₂ y exceso de aire [10].

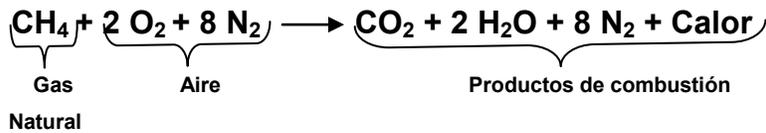
1.5.5.2 Gas Natural

La mayoría de los procesos de calentamiento en plantas siderúrgicas usan el gas natural como combustible. El gas natural es principalmente metano (90% a 96%). Este es el gas más ampliamente usado en el mundo como combustible en hornos de laminación y sus principales características y propiedades son las siguientes:

- Requiere sólo el 5% de exceso de aire para la quema excelente
- Su poder calorífico inferior varía de 8400 a 9100 Kcal/Nm³
- Debido a que es más liviano que el aire tiende a acumularse en las partes altas pero también tiende a disiparse con facilidad
- Con llama rica (falta de aire) deja residuos combustibles y explosivos (compuestos volátiles CV's).
- La temperatura de auto ignición es de 720 °C.
- La supervisión de la llama (su existencia o no) se puede hacer con un electrodo de ionización o por medio de celdas ultravioleta.

1.5.5.3 Relación aire / gas natural

En los hornos de recalentamiento de laminación la combustión perfecta del metano (contenido en el gas natural) en el aire tiene la siguiente reacción química equilibrada:



Reacción de combustión equilibrada en hornos de recalentamiento

En esta reacción, existen 10 partes de aire (2 partes O₂, 8 partes N₂) y 1 parte de combustible (CH₄) en el lado de los reactivos de la ecuación química y 11 partes de residuos de gas en el lado del producto de la ecuación. Así, la regla general para la combustión “perfecta” del metano o gas natural es de 10 partes de aire para 1 parte de combustible ó una relación de aire / gas natural igual a 10. Por tanto la relación de aire / gas natural puede definirse como la razón entre el flujo de masa de aire para alimentar el flujo de masa de gas natural.

En aplicaciones de combustión, la proporción en masa es generalmente expresada como una proporción del volumen normalizado, por lo tanto, la relación aire-gas natural es la relación de volumen de flujo de aire para el flujo de combustible a la temperatura y presión estándar normales.

1.5.5.5 Temperatura de la flama

Este es el parámetro más importante en cualquier combustión pues es él el que definirá el rendimiento de la quema.

GAS a 20°C	COMBURENTE a 20°C	
	Aire rico	O ₂
Metano	1957	2810
Etano	1960	-
Propano	1980	2820
Butano	1970	-
Hidrogenio	2045	2660
Acetileno	2400	3100

Tabla 1.2 Temperatura de flama de cada combustible de acuerdo al comburente utilizado [17].

1.5.5.6 Temperatura vs razón de la flama

Cada combustible presenta una flama con diferentes características y requerirá diferentes proporciones de aire / gas para obtener la quema ideal que es siempre cercana de la flama estequiométrica pero con un leve exceso de aire.

Cada combustible tiene su temperatura de ignición o auto ignición que es la temperatura del horno arriba de la cual el combustible se quema sin la ayuda de un medio externo (tipo chispa ó flama piloto). Este valor es de extrema importancia en la seguridad del horno, pues si alguna zona a cualquier momento está abajo de este valor podrá haber acumulación de gas no quemado y una posible explosión [17].

La temperatura de la flama es afectada por la proporción y el porcentaje de oxígeno en el oxidante. Como se muestra en la figura 1.23, la temperatura de la flama tiene un pico próximo de la relación de aire / gas natural, cuando el oxidante es el aire.

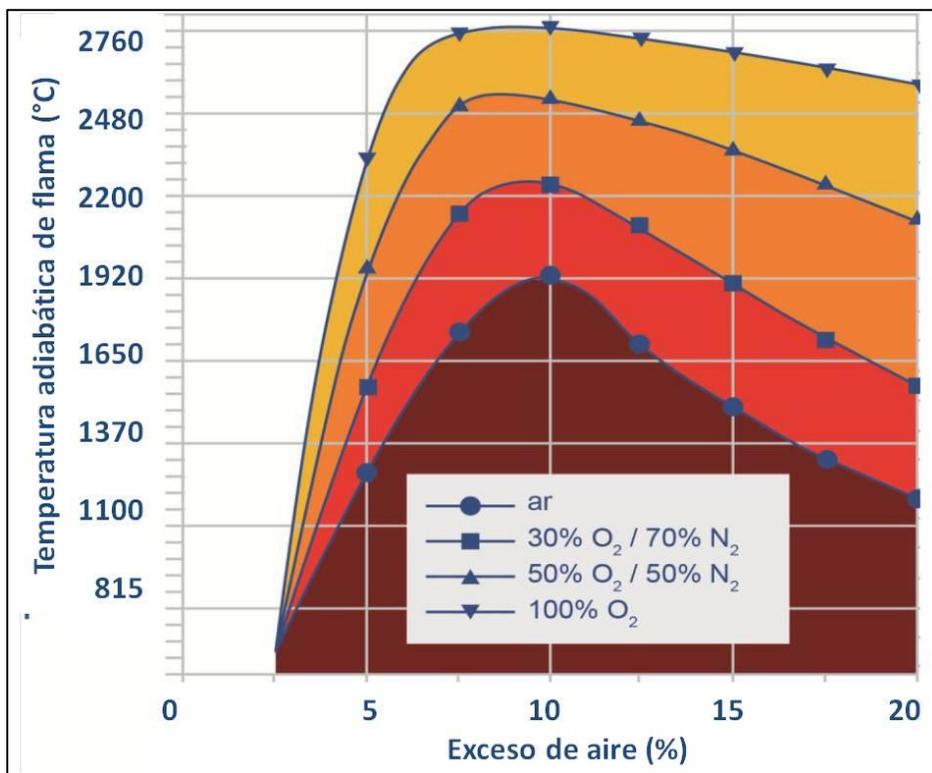


Fig. 1.23 Temperatura adiabática de flama respecto al exceso de aire a distintas relaciones de O₂ y N₂. *ar: aire rico.

1.5.5.7 Tipos de flama

Ya se vio que las flamas pueden ser del tipo rica, correcta y pobre. La determinación si una flama está en una de estas situaciones se puede hacer de 2 maneras: por la visualización y por la medición de su temperatura. La visualización es la forma más fácil e inmediata y cualquier persona con un poco de entrenamiento en el horno de recalentamiento de laminación puede definir el tipo de flama como se describen en las figuras 1.24, 1.25 y 1.26.



Fig. 1.24 Flama oscura, lenta, blanda atmosfera del horno oscura: son características de la llama rica con falta de aire.

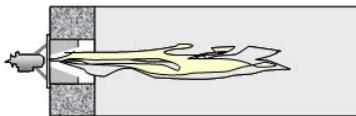


Fig. 1.25 La flama correcta se presenta por el color claro, amarilleado y atmosfera del horno nublada.

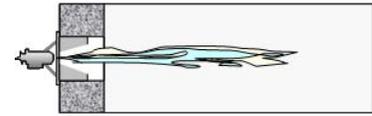


Fig. 1.26 Con exceso de aire la flama es clara, dura, azulada, la atmosfera del horno es clara, transparente.

1.5.5.8 Características de los quemadores.

La flama de un quemador presenta una zona de influencia que se extiende por un largo mayor que la flama visible [17].

En un quemador a gas la flama visible es de $2/3$ de la zona de influencia.

En un quemador a aceite la flama visible es de $1/2$ de la zona de influencia.

Existen quemadores del tipo horizontales (representado en figura 1.28) y verticales; estos últimos proyectan un cono de influencia cuya altura es igual al diámetro de flama como se muestra en la figura 1.27.

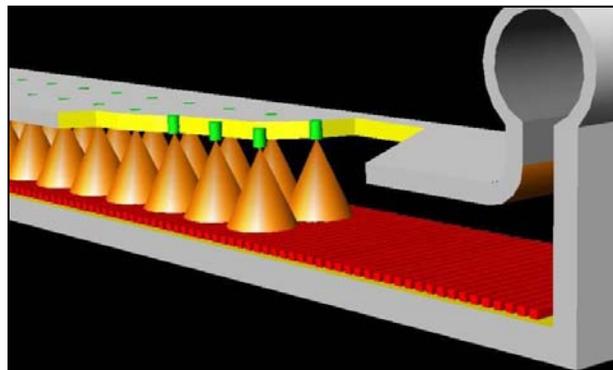


Fig. 1.27 Quemador en sentido vertical que proyecta un cono de influencia de la flama cuya altura es igual al diámetro de la base.

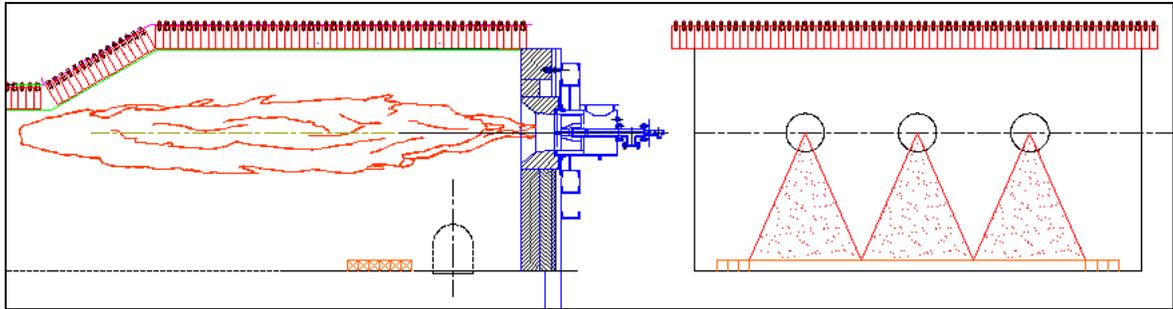


Fig. 1.28 Representación de un quemador con flama horizontal ó quemador de pared.

En los hornos con recuperador de calor los quemadores que reciben aire caliente (hasta 450 °C) deben ser apropiados para estas condiciones: el aire caliente exige dimensiones y una protección interna de material refractario.

Quemadores con aire aducido (o sea, succionado hacia adentro de la cámara de combustión por aberturas en el cuerpo del quemador) no se deben usar pues no hay cómo medir o controlar el volumen de aire y la combustión será siempre de baja eficiencia.

Las consecuencias de usar quemadores laterales en hornos de recalentamiento de laminación son que el horno tiende a enfriarse a medida que la flama se acorta. Esta es sólo una de las razones por las cuales hornos con quemadores laterales son menos eficientes y se les debe evitar [17]. Cabe recordar que los hornos de recalentamiento tienen más que una zona (multizona) y cada zona tiene más de un quemador (multiquemador) como se muestra a continuación en la Fig. 1.29.

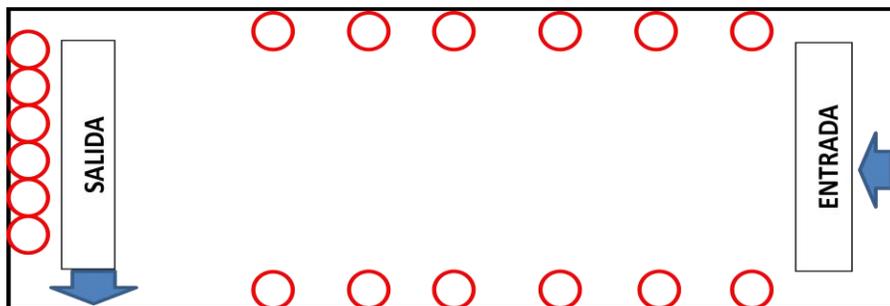


Fig. 1.29 Representación de distribución de quemadores en un horno convencional de la Ciudad de México con 18 quemadores (circuitos rojos). Distribución de 12 quemadores laterales en zona de precalentamiento y calentamiento; así como los 6 quemadores frontales en la zona de igualación. La entrada de las palanquillas es de derecha a izquierda (vía carga frontal).

1.6 Cascarilla.

La cascarilla de laminación son simplemente pequeñas cuchillas o cáscaras formadas en la superficie del acero cuando se calienta en el horno de recalentamiento, que son desprendidas a partir del movimiento mismo de las palanquillas. También en la propia cascarilla de acero es común encontrar grietas dadas en el acero como se puede apreciar en la figura 1.30.

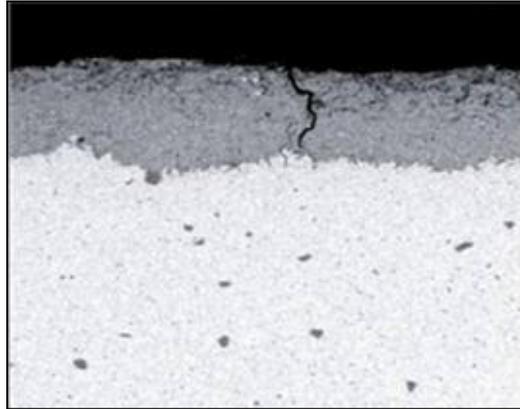


Fig. 1.30 Imagen ampliada de una sección de cascarilla a 650 °C mostrando una grieta en la cascarilla.

En la cascarilla están presentes tres tipos de óxidos de hierro que reciben diferentes nombres: wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3).

Generalmente estos tres compuestos químicos se enumeran en orden decreciente de la participación de oxígeno y hierro en la masa de la molécula ascendente [18].

1.6.1 Tipos de cascarilla

a) Wustita

La wustita (FeO) ó óxido ferroso es un compuesto de óxido de hierro II se encuentra en pocos lugares de la Tierra y lleva el nombre en honor a Fritz Wüst (1860-1938), metalúrgico alemán. Sus características físico-químicas se presentan en la tabla 1.3 la cual describe los otros óxidos para dar secuencia.

b) Magnetita

La magnetita ó óxido ferroso ferrico es un compuesto formado por óxidos de hierro magnético II y III (FeO y Fe_2O_3), cuya fórmula química es Fe_3O_4 . Se trata de un material quebradizo, fuertemente magnético de color negro, brillo metálico, con un

peso específico entre 5158 y 5180 kg/m³. Es un compuesto que se disuelve lentamente en ácido clorhídrico.

La magnetita es el imán más magnético de todos los minerales de la tierra, y la existencia de esta propiedad fue utilizada para la fabricación de brújulas. El nombre proviene de la región de magnetita en el que se encontró una vez, era Magnesia (Grecia), magnesia y significa "lugar de piedras mágicas", porque estas piedras "mágicamente" atraen hacia arriba.

c) Hematita

Conocido también como óxido ferrico, es un compuesto de óxido de hierro de la fórmula III (Fe₂O₃). En su forma mineral en la naturaleza éste contiene a veces pequeñas cantidades de titanio. Cuando se utiliza en adornos a menudo se llama diamante negro. Es un compuesto muy común, de color negro a gris, marrón a rojizo o rojo.

Características de la Cascarilla			
Componentes de óxido de hierro de cascarilla de laminación	FeO (wustita)	Fe ₃ O ₄ (magnetita)	Fe ₂ O ₃ (hematita)
Microdureza Vickers [HV]	270 ~ 350	420 ~ 500	≈ 1000
Coloraciones examinadas metalográficamente después del ataque con Nital	Gris Oscuro	Gris Claro	Blanco Brillante
Composición en masa de hierro y oxígeno [%]	Fe = 77.73 O = 22.27	Fe = 72.36 O = 27.64	Fe = 69.94 O = 30.06
Temperaturas de fusión [°C]	1377	1530	1570
Densidad [kg/m ³]	5700	5180	5240
Composición media en el horno [%]	85	14	1
Composición media en el aire [%]	95	4	1
Densidad en el Horno [kg/m ³]	5623		
Densidad aparente (bulk) [kg/m ³]	2600		
Densidad en el Aire [kg/m ³]	5675		

Tabla 1.3 Características de cada una de las fases de la cascarilla.

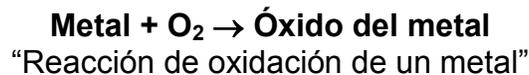
1.6.2 La formación de cascarilla de acero

La formación de cascarilla de acero sigue una secuencia específica de la creación de óxidos. El óxido superior (el que tiene la mayor proporción de oxígeno, ó Hematita: Fe₂O₃) se forma en la superficie ya que está expuesta directamente al

aire (fuente de oxígeno). El óxido inferior (la que tiene la proporción más baja de oxígeno ó wustita: FeO) se forma cerca de la base de metal (fuente de hierro). Sin embargo, el óxido inferior, FeO o wustita, se forma justo por encima de los 570 ° C. Por lo tanto, su presencia indica que la capa de óxido es la misma cascarilla de laminación [18].

1.6.2.1 Mecanismo de formación de cascarilla

La oxidación del acero se puede producir a cualquier temperatura, pero es particularmente importante a altas temperaturas en las que es probable que se produzca entre el metal y el aire una reacción más rápida [23]:

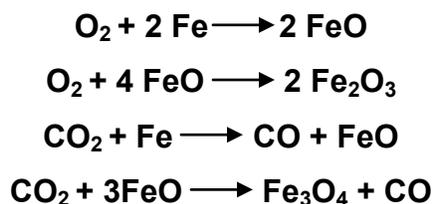


La rapidez de reacción se rige por los siguientes puntos:

1. Rapidez de reacción de metal / óxido.
2. Rapidez de transporte de reactantes a través del óxido.
3. Rapidez de suministro de oxígeno a la superficie exterior del óxido.

La oxidación se produce primero en la superficie del acero y la cascarilla resultante forma una barrera que tiende a restringir aún más la oxidación. Para que prosiga la oxidación, ya sea el hierro debe difundirse a través de la cascarilla a la superficie, o el oxígeno debe difundirse a través de la cascarilla a la subyacente del acero. Ambos producen transferencias, pero la difusión hacia el exterior del hierro es mucho más rápida que la difusión hacia el interior del oxígeno, ya que el ión metálico es apreciablemente menor que la de iones de oxígeno, y por lo tanto tiene una movilidad mucho mayor [23].

Las reacciones típicas implicadas son las siguientes:



A continuación en la figura 1.31 se presenta el mecanismo de formación de cascarilla en un horno de recalentamiento de laminación, donde se pueden apreciar los puntos anteriormente mencionados.

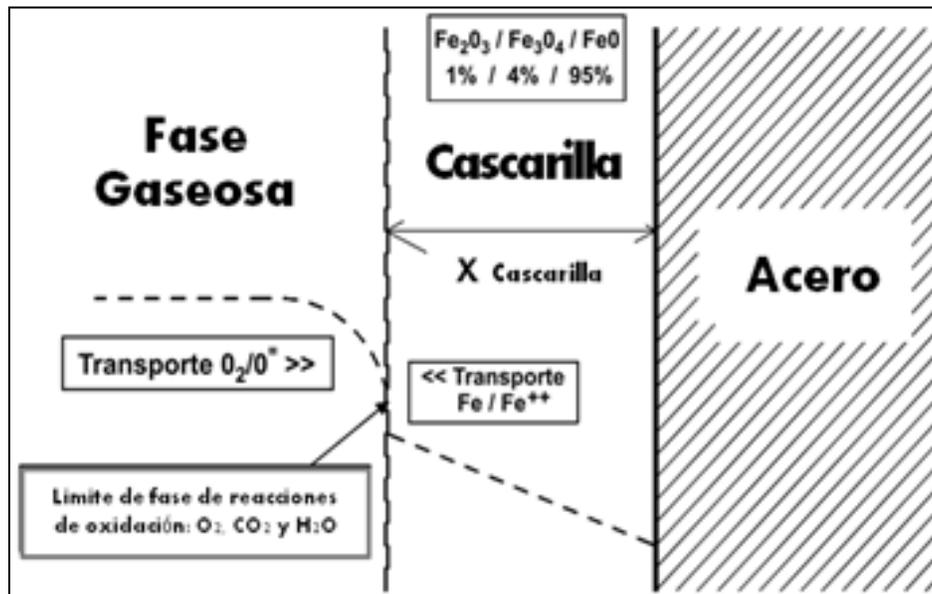


Fig. 1.31 Mecanismo de oxidación del acero a alta temperatura.

1.6.2.2 Secciones en palanquillas

Como la formación de cascarilla de laminación es un proceso dependiente de la zona expuesta o superficie exterior de la palanquilla, cuanto menor sea el área de contacto, menor será la formación de cascarilla por unidad de peso. Por lo tanto, palanquillas redondas tienen, en principio una menor pérdida a comparación de las palanquillas cuadradas o secciones rectangulares de igual peso.

La participación del área frontal ó sección frontal es representada por dos caras de la palanquilla lo que significa que es más pequeño cuanto mayor sea el tocho. Por ejemplo, un tocho de 4 m tiene una mayor pérdida de cascarilla que un tocho de 15 metros.

Considerando que la formación de cascarilla de acero depende de la superficie expuesta al entorno del horno, el área de superficie expuesta en realidad depende

de la rugosidad o área específica. Los picos y los valles provocados por la rugosidad aumenta el área específica, por lo tanto la formación de cascarilla.

La calidad del corte de sección influye también, suponiendo una palanquilla con sección 120 x 120 mm proporciona un área adicional de 14400 mm² en cada extremo que, en una palanquilla de 4 metros, representa el 1.5% de la superficie lateral, pero con la rugosidad del corte, pueden aumentar en un 3% ó más. La siguiente figura 1.32 muestra un conjunto de palanquillas donde podemos observar el tipo de sección cuadradas de las mismas.



Fig. 1.32 Área transversal de palanquillas antes de recalentar [14].

Otro factor importante es que en cada una de estas caras de la palanquilla recibe calor radiante de la atmósfera del horno durante el proceso de recalentamiento. Esto conduce, en la mayoría de los hornos, el sobrecalentamiento de los extremos. Así que esas dos caras que ya tienen una gran superficie específica se recalientan y forman una gruesa capa de cascarilla de laminación. Esta capa es fácilmente visible al momento del deshornamiento tal y como se puede observar en la figura 1.33 [21].



Fig. 1.33 Area transversal de palanquilla despues de recalentar.

1.6.3 Espesor y capas

El espesor de las capas de óxido dependerá algo del entorno en el cual se formaron los óxidos. El óxido formado en el mismo orden; wustita es la capa más gruesa con 85% cuando se forma en el horno y se formó con 95% de aire. La capa intermedia de la magnetita puede variar de 14% a 4%. La última capa, la hematita, es casi invisible y siempre está en el rango de 1%. Ver figura 1.34.

Estos porcentajes son en peso, pero teniendo en cuenta que los tres óxidos tienen aproximadamente la misma densidad, vale la pena considerar que el volumen de distribución (y el espesor) se repite.

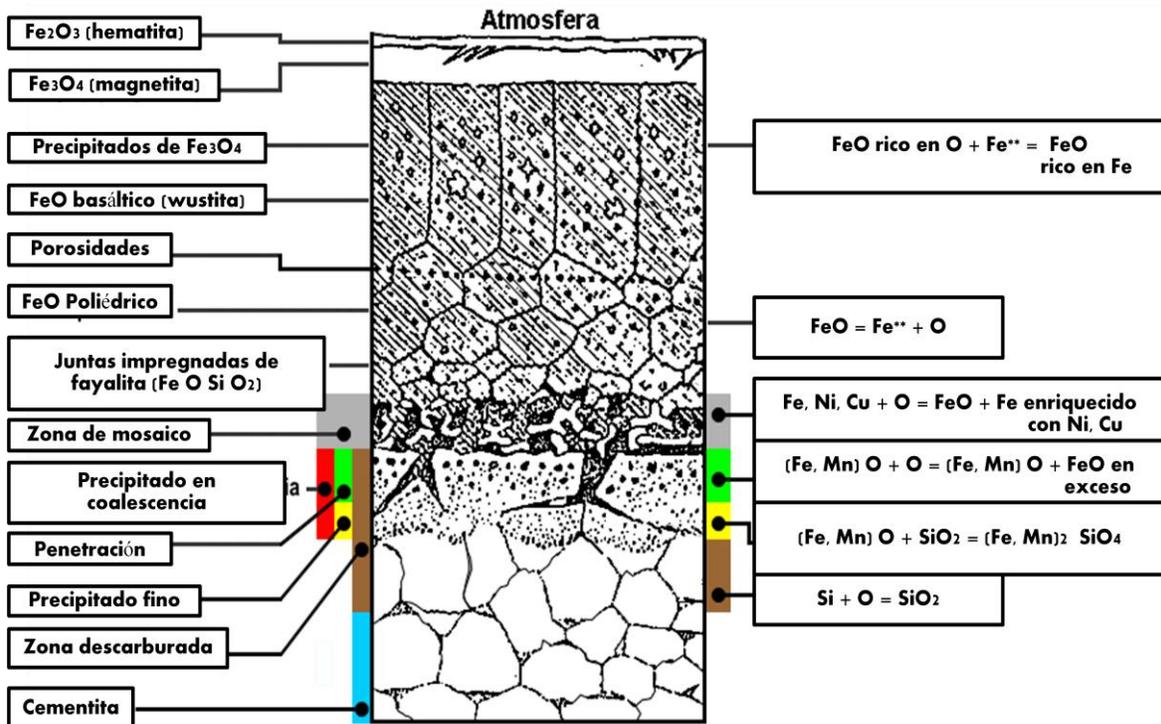


Fig. 1.34 Capas representativas de óxidos.

1.6.3.1 Estructura de las capas.

Las palanquillas provenientes directamente del proceso de colado continuo son enfriadas al aire libre con un enfriamiento lento por debajo de 500 °C, el FeO (wustita) se convierte en Fe₂O₃ (hematita) y Fe₃O₄ (magnetita), y ésta domina en la cascarilla al final de enfriamiento.

Se recomienda que esta cascarilla de acero no sea removida, más allá de que, naturalmente con el movimiento pueda desprenderse, ya que actúa como una capa protectora en el horno de recalentamiento. Cabe mencionar que aun hay plantas ubicadas en la ciudad de México que en la actualidad remueven esta cascarilla con fines unicamente de limpieza superficial de cascarilla. Por lo tanto eliminar esta capa de oxido sería sólo ofrecer una superficie de acero oxidado y acelerar la reoxidación. Esta capa protectora ó cascarilla se le conoce como "pátina" en alguno países de Latinoamerica [18].

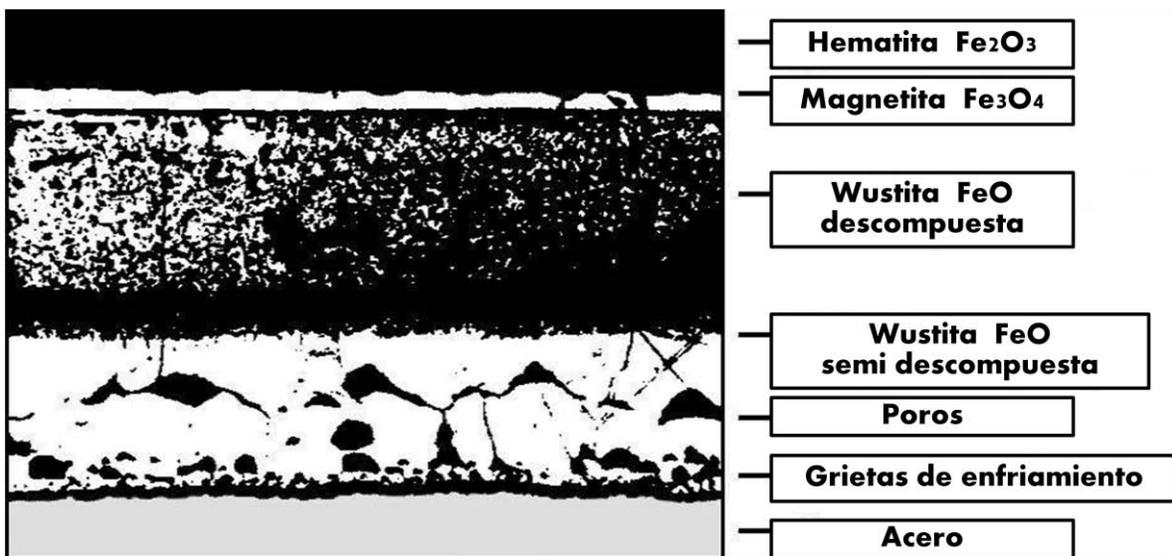


Fig. 1.35 Estructura de las 3 capas.

1.6.4 Cascarilla en el horno de recalentamiento

El proceso de laminación en caliente requiere de un horno de recalentamiento. Recordando así que la palanquilla siempre formará cascarilla. Esto quiere decir que se tiene una pérdida por ignición la cual es inherente y es independiente del proceso de conformado en caliente. El tiempo de residencia en el horno es absolutamente necesario para permitir la transferencia de calor desde el medio ambiente al acero. Sin embargo, la formación de cascarilla se inicia cuando se alcanzan 850 °C en la superficie del material. En el siguiente gráfico (Fig. 1.36) se puede deducir que la temperatura en función del tiempo define la cantidad de cascarilla formada.

En los hornos de recalentamiento de la ciudad de México, el tiempo de residencia tradicional de una sección de palanquilla de 140 mm x 140 mm varía, ya que el tiempo es una de las razones por las que no es posible tener un control total del proceso de recalentamiento y la formación de cascarilla de acero. Sin embargo, el perfil de calentamiento muestra que siempre que el material se encuentre por encima de los 850 °C presentará cascarilla en la superficie. También se puede ver que a los minutos finales, el mismo material que ha pasado a la zona de 850 °C, se somete ahora a una temperatura superficial de 1150 °C. Es decir, el proceso de formación de cascarilla es acumulativo y es conocido como de crecimiento parabólico [21].

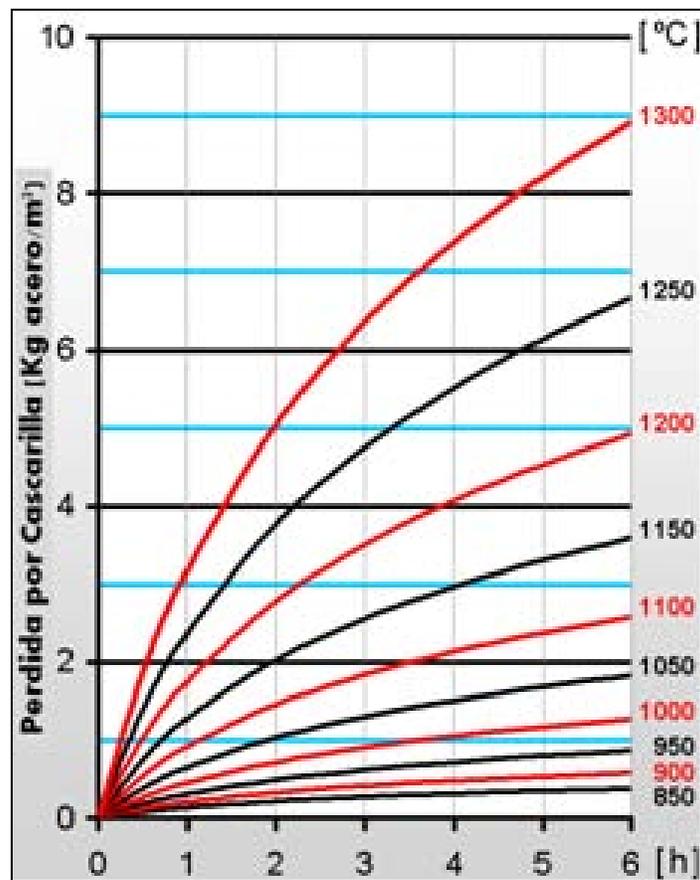


Fig. 1.36 Pérdida de cascarilla en función del tiempo a determinadas temperaturas.

En general, la rapidez de oxidación a alta temperatura disminuye con el tiempo (comportamiento parabólico) debido a un aumento en el grosor del óxido que actúa como una fuerte barrera a la difusión. Sin embargo, debido a la formación de

óxidos porosos o agrietados ligeramente adherentes, la velocidad de corrosión puede permanecer lineal.

La fracción molar (%) de cada óxido a través de la temperatura esta dada por el siguiente gráfico (Fig. 1.37).

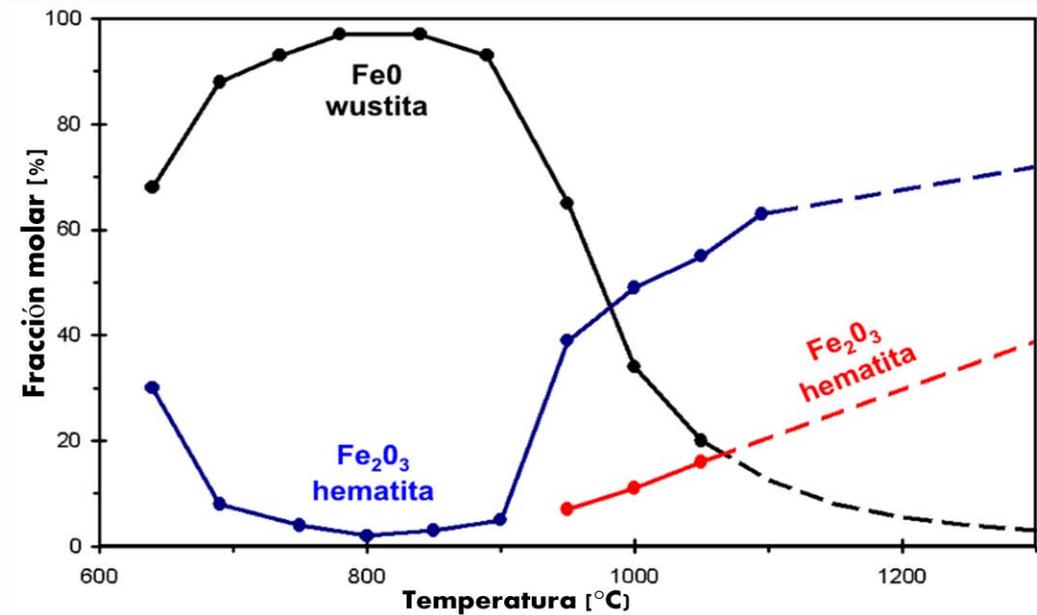


Fig. 1.37 Fracción molar de las capas de cascarilla en función de la temperatura.

1.6.4.1 Posición de las zonas de calentamiento

Un horno puede tener de una a tres zonas de calentamiento en la dirección longitudinal que se denominan zona de precalentamiento, calentamiento e igualación. Estas zonas funcionan a temperaturas crecientes, tales como 800 °C en la zona de precalentamiento, 1100 °C en la zona de calentamiento y 1200 °C en la zona de igualación. En consecuencia, la mayor parte de la cascarilla se genera en las zonas más calientes. Usualmente la cascarilla aparece ó se detecta en la zona de igualación por lo tanto se puede decir que hay una tendencia a clasificar esta área como responsable de la generación de cascarilla. Sin embargo dependerá mucho del tiempo de permanencia del acero en cada zona; cada vez que hay una excesiva formación de cascarilla, el área responsable son las zonas de calentamiento e igualación ya que cualquier temperatura por encima del

mínimo requerido conduce a la formación excesiva de cascarilla hasta el 0.5% fuera de lo normal. Por ello es que en este análisis se toman en cuenta únicamente las dos zonas más calientes: zona de calentamiento y zona de igualación.

1.6.4.2 Ganancia de energía por la formación de cascarilla.

La oxidación del acero es una reacción exotérmica, por lo tanto el acero podría ser considerado como un combustible, se quema en presencia de oxígeno y alta temperatura. De hecho, la formación de cascarilla, y la pérdida de la misma en su exposición al calor, puede ser calculada con un balance de energía detallado de un horno de recalentamiento de laminación.

El poder calorífico del acero ó su energía de oxidación es de 990 kcal / kg de acero. La formación del 0.5% de cascarilla en el horno significa 0.005 kg de acero quemado por cada kg de palanquilla recalentada. La liberación de calor es del orden de 4.9 kcal / kg de acero recalentado. Dado que el salto de entalpía que tiene el acero de 20 °C a 1200 °C es de 200 kcal / kg, la contribución de energía de la formación de cascarilla es del orden del 2.5%.

1.6.4.3 Carga en caliente.

Las palanquillas recalentadas en caliente requieren un tiempo de residencia mucho más corto que las recalentadas en frío. Debido a que los hornos siempre están dimensionados para el peor de los casos (recalentamiento en frío), es posible reducir el tiempo de residencia en el horno, pero así mismo siempre es posible reducir los puntos de ajuste para las zonas de temperatura. Por lo tanto, es posible reducir la formación de cascarilla.

El problema surge cuando las palanquillas se mezclan en frío y caliente dentro del horno. En este caso, los puntos de ajuste de temperatura de la zona no pueden ser reducidos y la formación de cascarilla en el interior del horno de recalentamiento se incrementa.

1.6.4.4 Cascarilla en el proceso de deformado.

A medida que el proceso de laminación se realiza en un entorno abierto, la barra se calienta en contacto permanente con el aire atmosférico (21% de oxígeno) y por tanto forma escamas de laminación (cascarilla) todo el tiempo. A diferencia del horno donde la barra puede permanecer horas y en la barra del rodillo sigue siendo de unos 90 segundos, y luego la formación de cascarilla es más pequeña. En contraste, el área expuesta al oxígeno y el contenido de este es mucho más alto. Queda por examinar los diferentes tipos de tren de laminación, por ejemplo, laminación continua con una mayor exposición [21].

1.6.5 Cascarilla primaria y secundaria

a) Cascarilla primaria – (Horno):

La formación de cascarilla en el horno de recalentamiento se le llama cascarilla ó escoria primaria y fue ampliamente descrita anteriormente. Para un horno que funciona muy bien puede generar hasta un 0.5% de pérdida por ignición o 5 kg por tonelada de acero recalentado.

Esto no incluye la cascarilla de acero formada durante el enfriamiento de la palanquilla después de colada continua que puede alcanzar 1%.

b) Cascarilla secundaria – (Tren de laminación):

La cascarilla secundaria se genera durante el proceso de laminación se limita a la formación de wustita y se genera un 0.15% de cascarilla ó mejor dicho en otras palabras 1.5 kg de cascarilla por tonelada de palanquilla de acero laminada.

La formación de cascarilla se da en la superficie de las piezas de metal, en este caso, las palanquillas que están dentro del horno. Este parámetro es una variable independiente y en el que un operador de horno no puede hacer nada.

La temperatura es otra variable independiente en la que el operador del horno de recalentamiento poco o nada puede hacer para evitar formación de cacarilla puesto que lo que se requiere es una palanquilla recalentada.

En este momento la clásica pregunta que siempre surge es: ¿Cuál es la temperatura ideal para recalentar una palanquilla de acero? Y la respuesta es simple: lo más bajo posible, respetando el límite de temperatura para cada zona del horno.

Cuando el laminador por cualquier razón (y las razones son muchas) reducen en gran medida las temperaturas porque los tiempos son mayores, Por ejemplo, cuando se trata de las demoras por parte de operadores y/o por controles automáticos: no se reduce suficientemente la temperatura de los puntos de ajuste en estas paradas. La aparición de una cantidad significativa de cascarilla de laminación es la primera manifestación visible de este fenómeno [21].



Fig. 1.38 Almacén con cascarilla.

1.6.6 Efectos negativos de la formación de cascarilla

La presencia de cascarilla tiene un efecto negativo sobre la calidad del acero. Durante el proceso de recalentamiento la cascarilla es adherida a la superficie de las palanquillas y es extremadamente difícil de quitar, incluso con el uso de una variedad de técnicas de descascarilladores utilizados por la industria. Esta cascarilla luego se mete en el producto y los resultados más comunes son dados en los defectos del material laminado y en ocasiones en propiedades físicas inaceptables [23].

La cascarilla es un problema básico encontrado en el proceso de laminación en caliente, los efectos nocivos principales son los siguientes:

- Pérdida de material .
- Calidad superficie deteriorada de los productos laminados .
- Trabajo improductivo en la eliminación de la cascarilla.

1.6.7 Caracterización del recalentamiento (Curvas)

La caracterización del recalentamiento de palanquillas en un horno puede hacerse de dos maneras:

a) Con un perfil de temperaturas:

Este tipo de gráfico nos muestra el perfil de temperatura a lo largo de un horno longitudinal y a un determinado ritmo. Para cada ritmo tendríamos un perfil diferente.

La figura 1.14 es un ejemplo de este tipo de perfiles, puede representar la temperatura de cada zona del horno, la temperatura en la parte superior, parte inferior de la palanquilla e interior del horno de recalentamiento.

b) Con curvas de recalentamiento:

En el siguiente gráfico podemos representar la temperatura de cada zona del horno para cada ritmo. Como cada ritmo corresponde a un tiempo de residencia la abscisa puede tener una escala doble en palanquillas calentadas por hora.

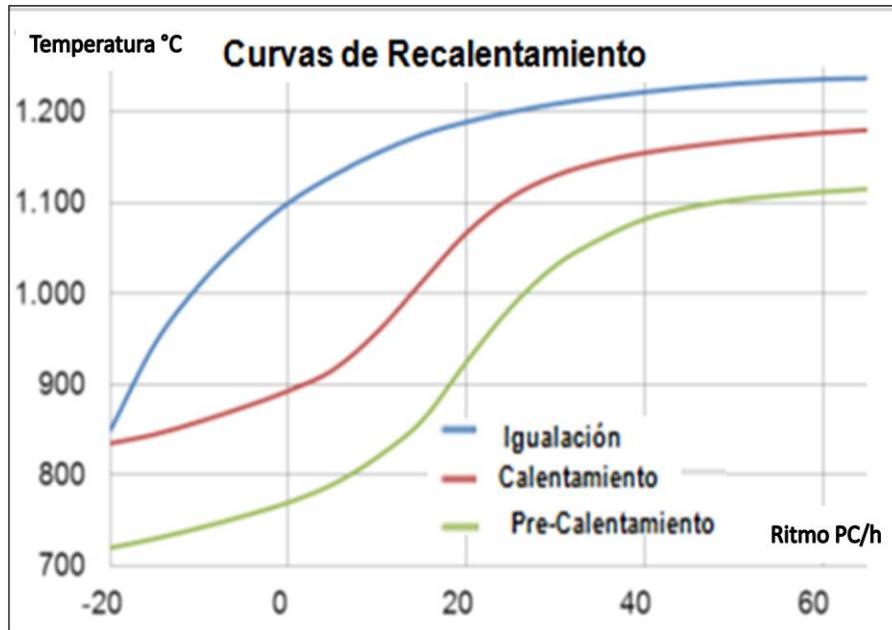


Fig. 1.39 Curvas de recalentamiento de palanquillas en las distintas zonas del horno. *PC/h: Palanquillas Calentadas por hora.

1.6.8 Balance: Costo- Beneficio

Reducir la formación de cascarilla es siempre una ventaja. Sin embargo, esta reducción está estrechamente relacionada con la reducción del consumo de combustible. Es decir, todos los métodos y procedimientos para su reducción se traducirán inevitablemente en la reducción de la formación de cascarilla.

La cuantificación del beneficio en la reducción de combustible es fácil y sencilla. En el caso de la cascarilla, depende del tipo de producto que se lamina.

En resumen, el punto de funcionamiento de un horno con el menor consumo de combustible es el mismo punto con la formación más baja de cascarilla, la descarburación más baja, menor costo y mayor calidad.

1.6.9 Aire de infiltración en el horno

La infiltración de aire (para puertas y otras aberturas o respiraderos) siempre es aire atmosférico, ósea 21% de oxígeno. Esta infiltración de aire va a generar una

cascarilla situada cerca del sitio de la infiltración. Como la formación de cascarilla todavía depende de la temperatura, las áreas de infiltración en las zonas calientes del horno (por encima de 850 ° C) son siempre las más dañinas. Las otras infiltraciones no forman cascarilla, pero causan un aumento en el consumo de combustible, así como enfriar el horno.

1.6.10 Presión en el interior del horno

Todos los hornos están equipados con un bucle de control de presión interna para garantizar la evacuación completa de todos los humos. La cantidad de vapores generados dentro del horno es bastante variable, ya que depende de la tasa de producción de la fábrica. El sistema de control debe mantener esta presión interna igual a la presión atmosférica para evitar la entrada de aire y así evitar filtraciones o fugas de gases calientes a través de los puertos y las aberturas. La técnica adecuada es quemar todos los días un guante de cuero (usado) en el puerto de descarga de la palanquilla y las llamas ajustan la presión del set-point [18].

1.6.11 Costos

La cascarilla de laminación es un costo final, ya que tiene que ser retirada y tratada, también porque representa un menor peso.

El destino final de la cascarilla de la planta también tiene un costo, incluso cuando se vende a la industria del cemento, por ejemplo. Reunirla en su contenedor, eliminarla de la fosa, el transporte, el almacenamiento intermedio y los costos de logística se asignan en un centro de costos.

1.6.12 Aplicaciones de la cascarilla

La cascarilla por su alto contenido en hierro metálico y bajo contenido en metales no ferrosos y compuestos alcalinos, es un residuo idóneo para su reciclado directamente al alto horno ó incluso el horno de arco eléctrico. Aproximadamente el 90 % de la cascarilla se recicla directamente en la propia industria siderúrgica y

pequeñas cantidades se utilizan para ferroaleaciones, en plantas cementeras y en la industria petroquímica [6].

La cascarilla gruesa se recicla prácticamente al 100 % vía planta de sinterización y la cascarilla más fina o lodo de cascarilla, que está más contaminada de aceites, acaba en el vertederos.

Se considera reutilizable al sinter sin pretratamiento la cascarilla con tamaño de partícula entre 0,5 y 5 mm y un contenido en aceites menor del 1 %. La cascarilla con un contenido en aceites mayor del 3 % debe de ser tratada previamente, ya que este contenido de aceites puede producir incremento de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y problemas en los sistemas de purificación de gases residuales [6].

1.7 Diseño de experimentos

Los modelos de diseño de experimentos también conocidos como DOE's son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar que factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia.

La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación. Es sabido que si se repite un experimento, en condiciones indistinguibles, los resultados presentan una cierta variabilidad. Si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento. Pero si se experimenta en procesos industriales o administrativos la variabilidad será mayor en la mayoría de los casos.

El objetivo del diseño de experimentos es estudiar si cuando se utiliza un determinado tratamiento se produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar aplicando el tratamiento y no aplicándolo. Si la variabilidad

experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación.

La metodología del diseño de experimentos estudia cómo variar las condiciones habituales de realización de un proceso empírico para aumentar la probabilidad de detectar cambios significativos en la respuesta; de esta forma se obtiene un mayor conocimiento del comportamiento del proceso de interés.

Para que la metodología de diseño de experimentos sea eficaz es fundamental que el experimento esté bien diseñado.

Un experimento se realiza por alguno de los siguientes motivos:

- Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta.
- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

La utilización de los modelos de diseño de experimentos se basa en la experimentación y en el análisis estadístico de los resultados que se obtienen en un experimento bien planificado [22]. Por tanto, la experimentación y el análisis para este proyecto son fundamentales en la búsqueda de determinar las relaciones de aire / gas natural para las zonas de calentamiento e ignición idóneas, así como limpieza superficial del acero y obtener así una menor formación de escoria en un proceso normal de una planta productora de acero de la Ciudad de México.

1.7.1 Diseño factorial 2^k

Al experimentar en un proceso industrial tal como el del proceso siderúrgico en cuestión, claro está la importancia de diseñar la experimentación de modo que proporcione la información buscada con el menor número de experimentos. Cuando el objetivo es medir cómo influyen k factores en un proceso y descubrir si interaccionan entre ellos, el diseño factorial completo 2^k es una estrategia experimental aplicable.

Este diseño permite explorar una zona escogida del dominio experimental y encontrar una dirección prometedora para la optimización. Por su sencillez, una matriz de experimentos factorial completa 2^k no requiere un software especializado para construirla ni para analizar sus resultados. En estos diseños, cada factor se estudia a sólo dos niveles y sus experimentos contemplan todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores [22].

Los análisis de estas pruebas de recalentamiento se harán en base al efecto de las relaciones de aire/gas utilizadas en las zonas del horno y así mismo a la limpieza de las palanquillas; ésto para obtener la menor formación posible de cascarilla en el horno de recalentamiento de una planta productora de acero, lo cual es nuestra salida en el proceso por analizar.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Caracterización de infraestructura y materiales.

Los siguientes puntos son datos del Horno de recalentamiento.

Tipo:	Pusher (Empujador)
Capacidad:	50 t/h
Combustible:	Gas natural
No. de zonas:	3 (Pre-calentamiento, calentamiento e igualación)
No. de quemadores:	18 (6 en cada zona – quemadores de pared)
Presión de gas:	70 – 80 mbar
Dimensiones de solera:	27 x 6m
Instalación:	1999
Última reforma:	2011



Fig. 2.1 Horno de recalentamiento de una planta productora de la Cd. de México.

Para el recalentamiento de palanquillas en el horno también fue necesaria la contribución de distintos equipamientos para trasladar la palanquilla a la entrada y salida del mismo los cuales se mencionan a continuación:

- Montacargas: Sirve para llevar las palanquillas desde el patio de palanquillas hasta la zona del horno y viceversa.
- Grúa semiportico: Es una grúa localizada en la entrada del horno de recalentamiento tiene una capacidad de 10 toneladas; cuenta con una báscula que registrar el peso de las palanquillas y sirve para llevarlas hacia la zona de carga en el horno.
- Camino de rodillos: Dirige las palanquillas de acero hacia los empujadores laterales.
- Empujadores frontales: Empujan las palanquillas hacia la zona de pre-calentamiento del horno.
- Deshornador: Por medio de una barra de acero empuja la palanquilla de forma lateral en la zona de igualación y la dirige hasta el transferidor donde se encuentran las cunetas.
- Transferidor: Dirige las palanquillas hacia el tren de laminación, excepto que el operador envíe hacia las cunetas para sacar la palanquilla.
- Cunetas: Por medio de un movimiento radial el transferidor empuja hacia estos retenedores de palanquillas.
- Grúa de Nave: Puente rodante localizado en la nave de laminación, tiene una capacidad de 15 ton, cuenta con un balancín de carga y una bascula para pesar las palanquillas; sirvió para retirar las palanquillas de las cunetas y dirigirlas hasta la zona de retiro de cascarilla.
- Separador de cascarilla: Dispositivo con el cual es posible retirar la cascarilla formada en las palanquillas.
- Tela de asbesto: Retiene toda la cascarilla formada sin posibilidad de dejar fuera masa de la misma.

- Balanza analítica: Verificar el peso de la cascarilla formada en las palanquillas es su uso.

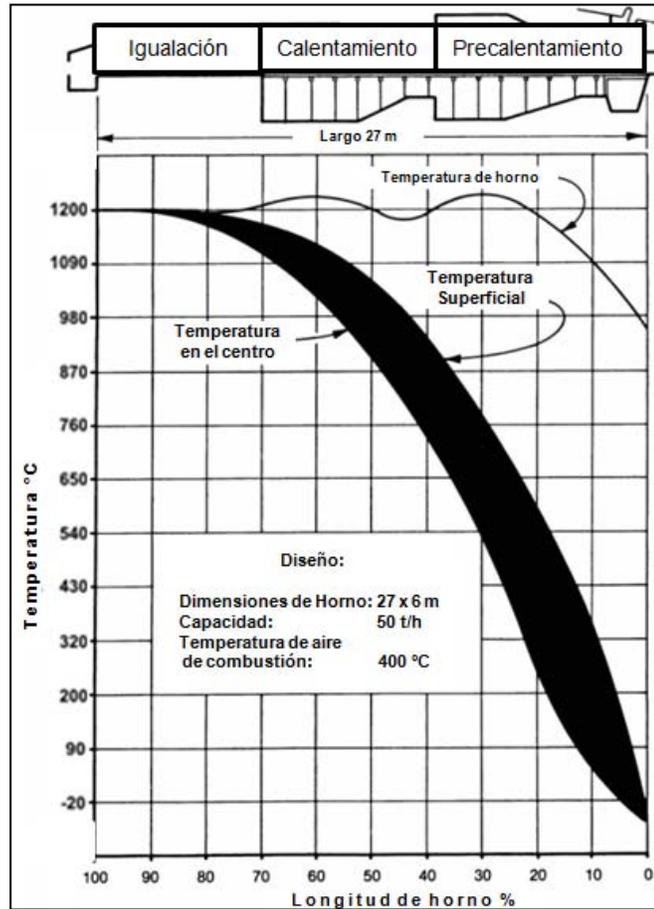


Fig. 2.2 Diagrama representativo del horno de recalentamiento de laminación donde podemos ver la temperatura de la palanquilla a lo largo del horno en cada una de las distintas zonas.

El material utilizado para las pruebas fueron palanquillas de acero calidad A-36.

2.2 Personal involucrado en campo

Para la realización de las pruebas se contó con la participación de los siguientes colaboradores:

- Montacarguista: Es la persona responsable por traer las palanquillas desde el patio de palanquillas hasta la zona del horno de acuerdo a la calidad y numero de colada que se requiera.

- Operador de carga de horno: Es el responsable por manipular la grúa semiportico y dirigir las palanquillas hacia la zona de carga, también apoyo en el registro del peso de las palanquillas.
- Hornero: Es la persona responsable por manipular las relaciones de aire /gas en el horno, así como el rastreo de las palanquillas de principio a fin, con ayuda de la grúa de nave coloca las palanquillas hasta la zona de retiro de cascarilla.
- Contratista: Es la persona contratada externamente que se encarga del retiro de cascarilla por medio del separador de cascarilla.

2.3 Pruebas de recalentamiento y manipulación de parámetros.

Las palanquillas fueron seleccionadas de acuerdo a la producción de planta y son apartadas de tal manera que no interfieran con el proceso. Se meterán 12 palanquillas calidad A-36 con limpieza superficial (retiro de cascarilla) después del proceso de colado continuo y 12 palanquillas calidad A-36 sin limpieza superficial (sin retiro de cascarilla).



Fig. 2.3 Patio de palanquillas.



Fig. 2.4 Palanquillas apartadas.

Se pesan las palanquillas en la grúa semiportico, se registra su peso y se meten al horno considerando este el $t=0$ desde el instante en el que entran a la zona de precalentamiento del horno. El tiempo de recalentamiento final es considerado hasta que la palanquilla alcanza una temperatura de 1200°C y sale de la zona de igualación del horno. Ver figuras 2.5 y 2.6.



Fig. 2.5 Pesado de palanquilla.



Fig. 2.6 Introducción de palanquillas al Horno.

Se manipulan las relaciones de aire /gas natural en los paneles del horno de inicio a fin en el proceso de recalentamiento de las palanquillas; Esto aplica para las zonas de calentamiento e igualación del horno. Posteriormente son retiradas las palanquillas. Ver figuras 2.7 y 2.8.



Fig. 2.7 Control de temperatura y Relación Aire/Gas.



Fig. 2.8 Salida de palanquillas del horno.

Las palanquillas son destinadas hacia la zona de retiro de cascarilla, donde el personal contratista efectúa la separación de la misma. La cascarilla recolectada es pesada y registrada. Ver figura 2.9.



Fig. 2.9 Cascarilla recolectada.

Para el aseguramiento de la temperatura se recurrió un análisis termográfico del Horno de Recalentamiento con modelo de cámara FLIR T400, esto para verificar la ausencia de fugas importantes de calor. Ver figuras 2.10 y 2.11.

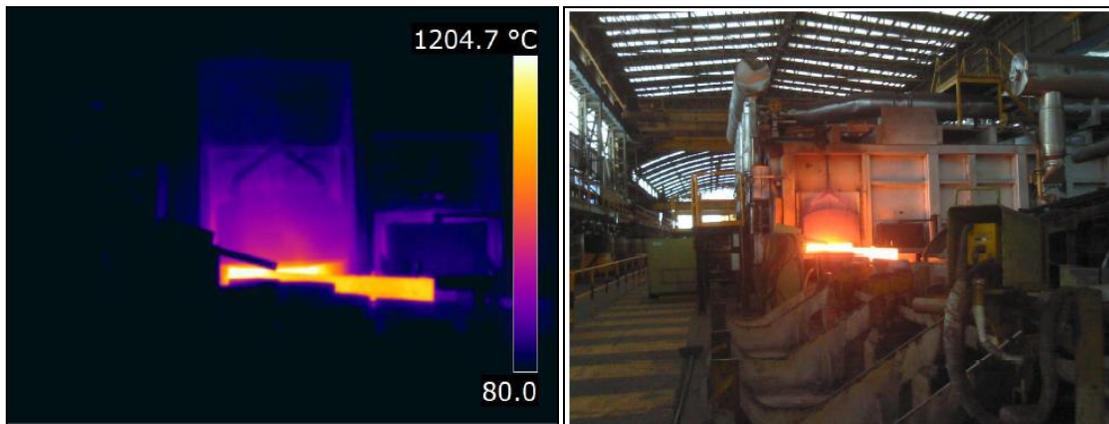


Fig. 2.10 y 2.11 Análisis termográfico del Horno de Recalentamiento.

Se determinó la introducción de palanquillas al horno mediante una metodología experimental de acuerdo al siguiente diseño de experimentos (DOE), por lo que se asegura la experimentación por triplicado de cada una de las palanquillas mediante el diseño factorial 2^k como se muestra a continuación:

La siguiente figura muestra la matriz para el estudio de 3 factores ($k=3$) en nuestra experimentación, los cuales son:

- Relaciones de aire/ gas natural en la zona de calentamiento
- Relación de aire / gas natural en la zona de igualación
- Limpieza superficial de las palanquillas de acero calidad A-36

De acuerdo a la matriz de experimentos son 8 experimentos, por triplicado cada uno (24 palanquillas se meterán al horno).

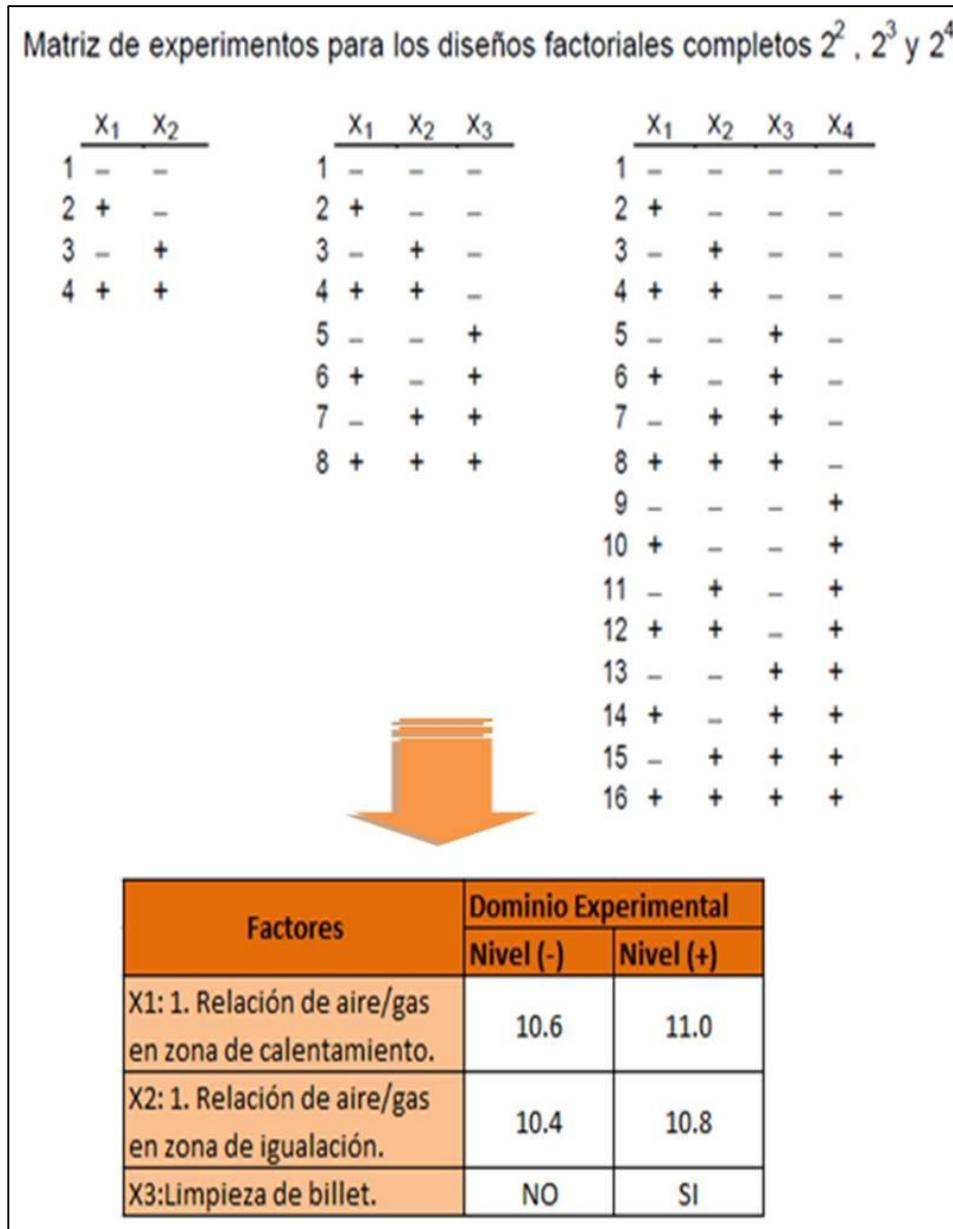


Fig. 2.11 Matriz de experimentos 2^k , donde $k=3$, para encontrar el efecto que tienen las relaciones de aire/gas y la limpieza superficial de las palanquillas en el recalentamiento de palanquillas para obtener una menor formación de cascarilla.

Las relaciones de aire/gas en nuestro experimento fueron definidas en aprobación con horneros y el consultor de mejoras del área de laminación, ya que son estas

las que constantemente y actualmente son usadas de acuerdo a datos históricos de la planta productora de acero, así mismo son las que dan mejores resultados respecto a menor formación de cascarilla y forma de la llama se refiere. Por tanto se buscará saber cual es la mejor combinación para generar una menor formación de cascarilla de acero al plan de experimentación siguiente. Ver figura 2.12.

Matriz de experimentos				Plan de Experimentación		
	X1	X2	X3	Relación de aire/gas en zona de calentamiento.	Relación de aire/gas en zona de igualación.	Limpieza del billet
1	-	-	-	10.6	10.4	NO
2	+	-	-	11.0	10.4	NO
3	-	+	-	10.6	10.8	NO
4	+	+	-	11.0	10.8	NO
5	-	-	+	10.6	10.4	SI
6	+	-	+	11.0	10.4	SI
7	-	+	+	10.6	10.8	SI
8	+	+	+	11.0	10.8	SI

Fig. 2.12 Matriz / Plan de experimentos.

*Billet: Palanquilla de acero.

CAPITULO 3. RESULTADOS

3.1 Formación de cascarilla en palanquillas con limpieza

La tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos del recalentamiento de las palanquillas de acuerdo al diseño de experimentos propuesto. Los resultados de cada combinación (con los parámetros X_1 , X_2 y X_3) fueron nombrados con las letras: A, B, C y D.

El peso de la cascarilla primaria formada por el proceso de colada continua en acería fue adicionado en el peso de cascarilla final.

Experimento (Palanquilla)	Relación de Aire/Gas			Limpieza Superficial [X3]	Peso inicial (kg)	Peso de cascarilla retirada de acería (Kg)	Peso de cascarilla horno (Kg)	Tiempo dentro del horno (hh:mm:ss)	% cascarilla [Y]
	Zona de Pre calentamiento	Zona de Calentamiento [X1]	Zona de Iguación [X2]						
1	11.0	11.0	10.8	Si	792	2.14	4.27	03:50:00	0.539
2	11.0	11.0	10.4	Si	796	2.12	7.40	07:25:00	0.930
3	11.0	10.6	10.8	Si	794	2.36	5.24	05:38:00	0.660
4	11.0	10.6	10.4	Si	794	2.15	5.53	08:38:00	0.696
5	11.0	11.0	10.8	Si	794	2.14	6.98	05:43:00	0.879
6	11.0	11.0	10.4	Si	794	2.15	6.00	05:40:00	0.756
7	11.0	10.6	10.8	Si	794	2.15	7.15	08:14:00	0.900
8	11.0	10.6	10.4	Si	800	2.17	5.08	06:25:00	0.635
9	11.0	11.0	10.8	Si	796	2.15	9.79	08:30:00	1.231
10	11.0	11.0	10.4	Si	796	2.14	3.94	03:04:00	0.495
11	11.0	10.6	10.8	Si	798	2.14	3.70	03:32:00	0.464
12	11.0	10.6	10.4	Si	794	2.01	3.85	03:01:00	0.485

Tabla 3.1 Datos obtenidos del recalentamiento de las palanquillas. Los resultados de las combinaciones de los parámetros (X_1 , X_2 y X_3) fueron identificados con los siguientes colores respectivamente:

A (verde): + + +, B (rojo): + - +, C (amarillo): - + + y D (azul): - - +

Se verificó el recalentamiento de las palanquillas con las combinaciones posibles de relaciones de aire-gas y limpieza superficial del acero. Los gráficos siguientes muestran los resultados de % de formación de cascarilla de acuerdo al tipo de

combinación posible (A, B, C ó D). Todas las combinaciones fueron realizadas por triplicado.

La figura 3.1 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 1, 5 y 9, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

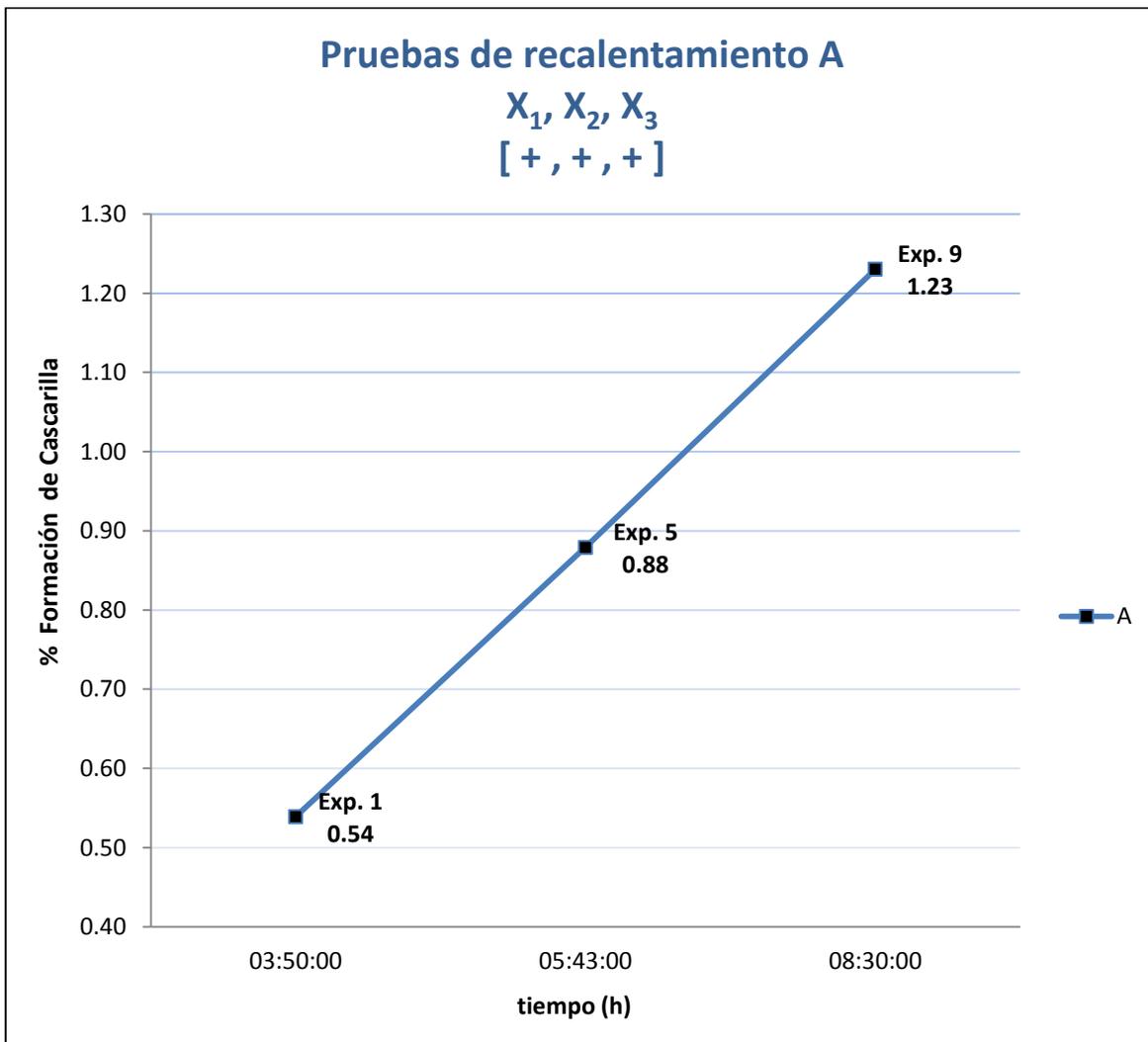


Fig. 3.1 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento "A": Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 11.0, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y con limpieza superficial del acero.

La figura 3.2 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 10, 6 y 2, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

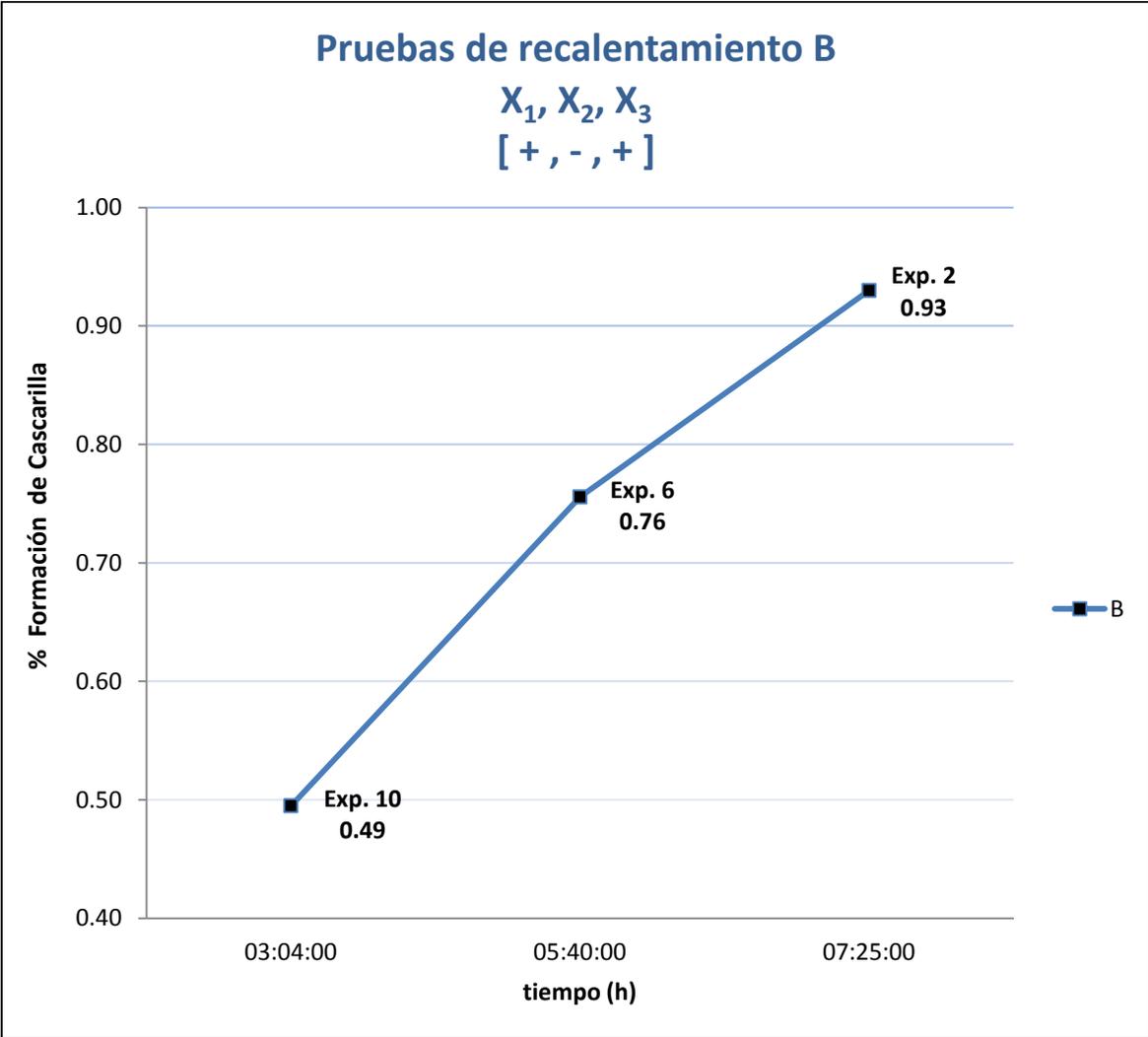


Fig. 3.2 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “B”: Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 11.0, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y con limpieza superficial del acero.

La figura 3.3 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 11, 3 y 7, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

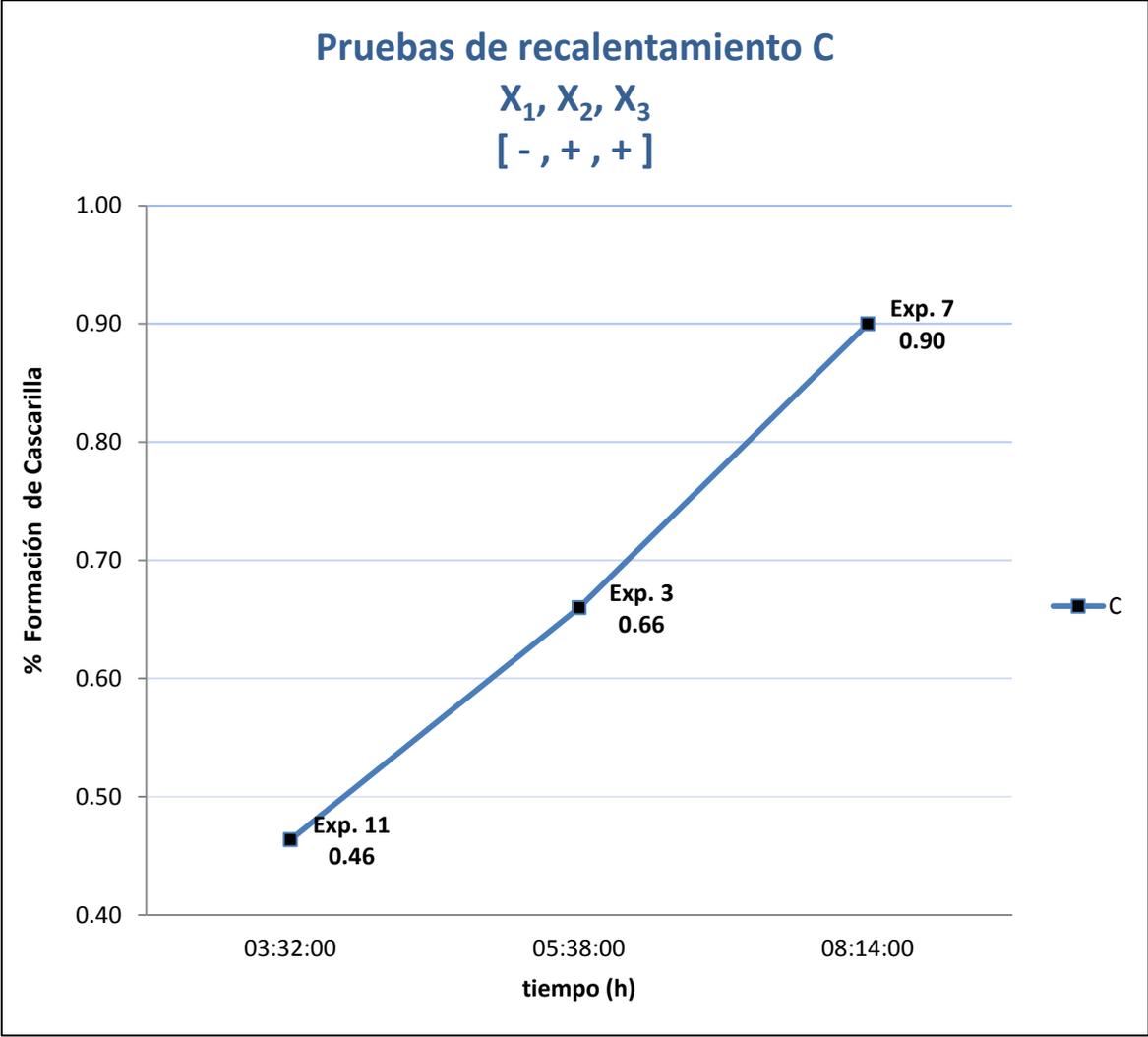


Fig. 3.3 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “C”: Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y con limpieza superficial del acero.

La figura 3.4 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 12, 8 y 4, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

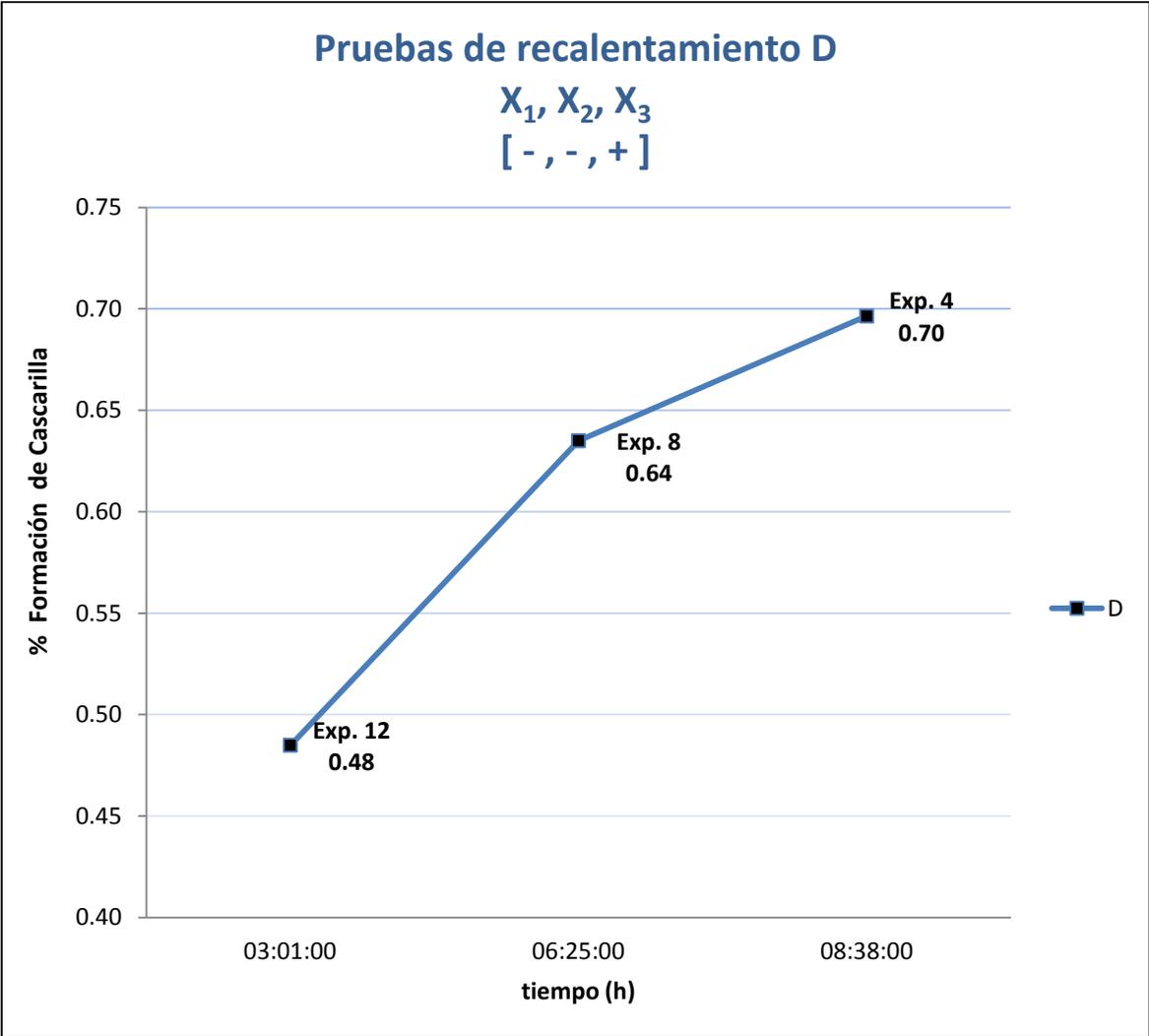


Fig. 3.4 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “D”: Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y con limpieza superficial del acero.

En la figura 3.5 se puede observar cada una de las tendencias de formación de cascarilla para cada una de las combinaciones posibles A, B, C y D de acuerdo a las relaciones de aire gas en zona de calentamiento e igualación del horno y la limpieza superficial de las palanquillas de acero.

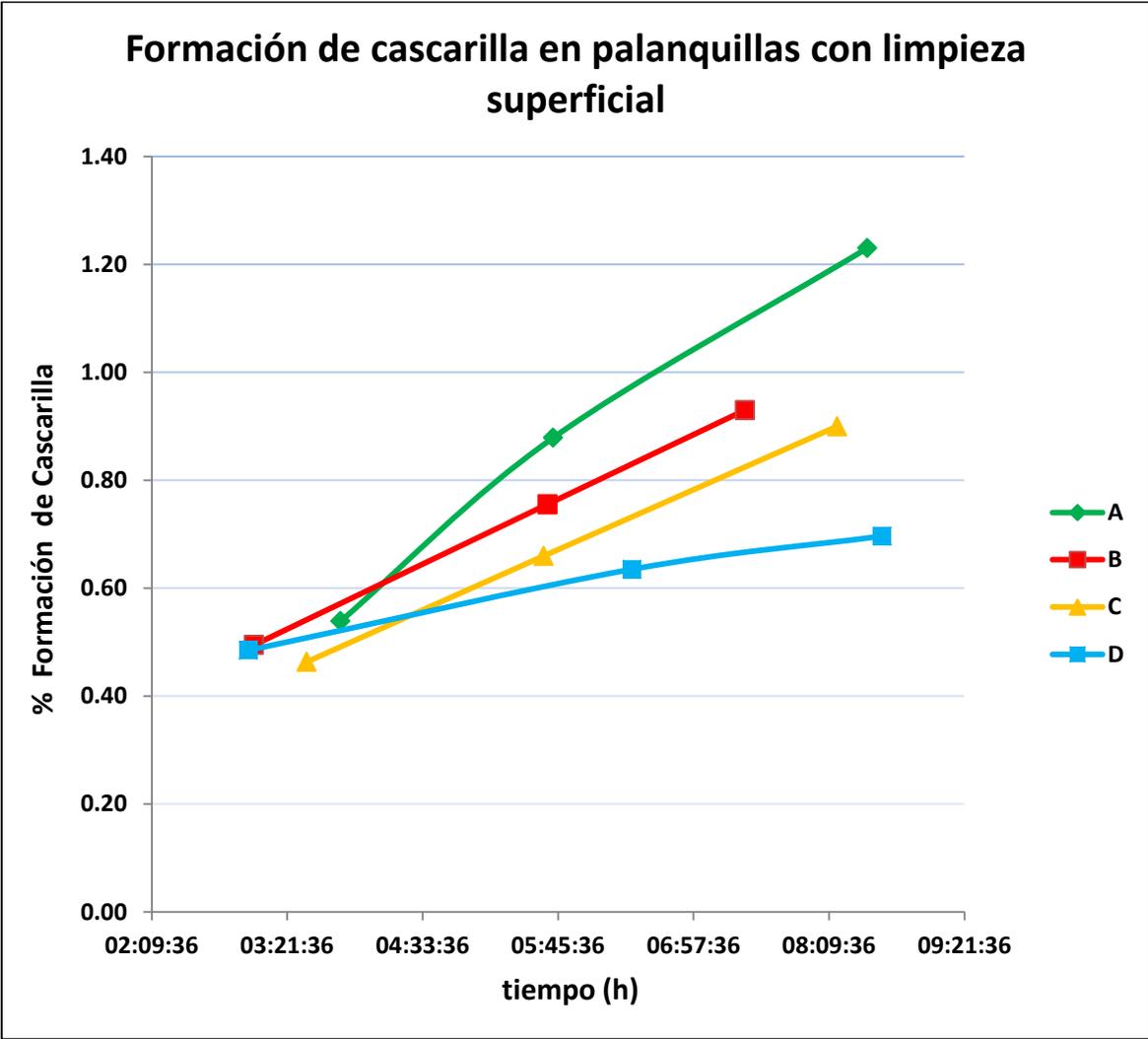


Fig. 3.5 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento "A, B, C y D".

En la tabla 3.2 se observan los resultados iniciales del diseño experimental tomando en cuenta la desviación estándar y media de los datos.

Experimento	Relación de aire/gas Calentamiento X_1	Relación de aire/gas Igualeación X_2	Limpieza del acero X_3	% de Cascarilla (Replicas)			Resultados	
				Y_1	Y_2	Y_3	Desviación	Media
A	11.0	10.8	SI	0.5391	0.8791	1.2305	0.346	0.8829
B	11.0	10.4	SI	0.4950	0.7557	0.9300	0.219	0.7269
C	10.6	10.8	SI	0.4637	0.6599	0.9000	0.219	0.6745
D	10.6	10.4	SI	0.4849	0.6350	0.6965	0.109	0.6055

Tabla 3.2 Resultados del diseño de experimentos para palanquillas con limpieza.

3.2 Formación de cascarilla en palanquillas sin limpieza.

La tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos del recalentamiento de las palanquillas de acuerdo al diseño de experimentos propuesto. Los resultados de cada combinación (los parámetros X_1 , X_2 y X_3) fueron nombrados con las letras siguientes: E, F, G y H.

Experimento (Palanquilla)	Relación de Aire/Gas			Limpieza [X3]	Peso inicial (kg)	Peso de cascarilla horno (Kg)	Tiempo dentro del horno (hh:mm:ss)	% cascarilla [Y]
	Zona de Precalentamiento	Zona de Calentamiento [X1]	Zona de Iguación [X2]					
13	11.0	11.0	10.8	No	804	6.00	05:25:00	0.746
14	11.0	10.6	10.8	No	794	4.38	05:20:00	0.552
15	11.0	11.0	10.4	No	800	4.62	05:03:00	0.578
16	11.0	10.6	10.4	No	794	1.92	02:57:00	0.242
17	11.0	11.0	10.8	No	804	2.44	02:43:00	0.303
18	11.0	10.6	10.8	No	796	2.18	02:47:00	0.274
19	11.0	11.0	10.4	No	794	2.42	03:08:00	0.305
20	11.0	10.6	10.4	No	798	1.87	02:53:00	0.234
21	11.0	11.0	10.8	No	794	4.47	04:13:00	0.563
22	11.0	10.6	10.8	No	798	3.03	03:40:00	0.380
23	11.0	11.0	10.4	No	794	5.10	05:36:00	0.642
24	11.0	10.6	10.4	No	798	2.77	04:26:00	0.347

Tabla 3.3 Datos obtenidos del recalentamiento de las palanquillas. Los resultados de las combinaciones de los parámetros (X_1 , X_2 y X_3) fueron identificados con los siguientes colores respectivamente:

E (verde): + + +, F (rojo): + - +, G (amarillo): - + + y H (azul): - - +

Se verificó el recalentamiento de las palanquillas con las combinaciones posibles de relaciones de aire-gas y sin limpieza superficial del acero. Los gráficos siguientes nos muestran los resultados de % de formación de cascarilla de

acuerdo al tipo de combinación posible (E, F, G ó H). Todas las combinaciones fueron realizadas por triplicado.

La figura 3.6 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 17, 21 y 13, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

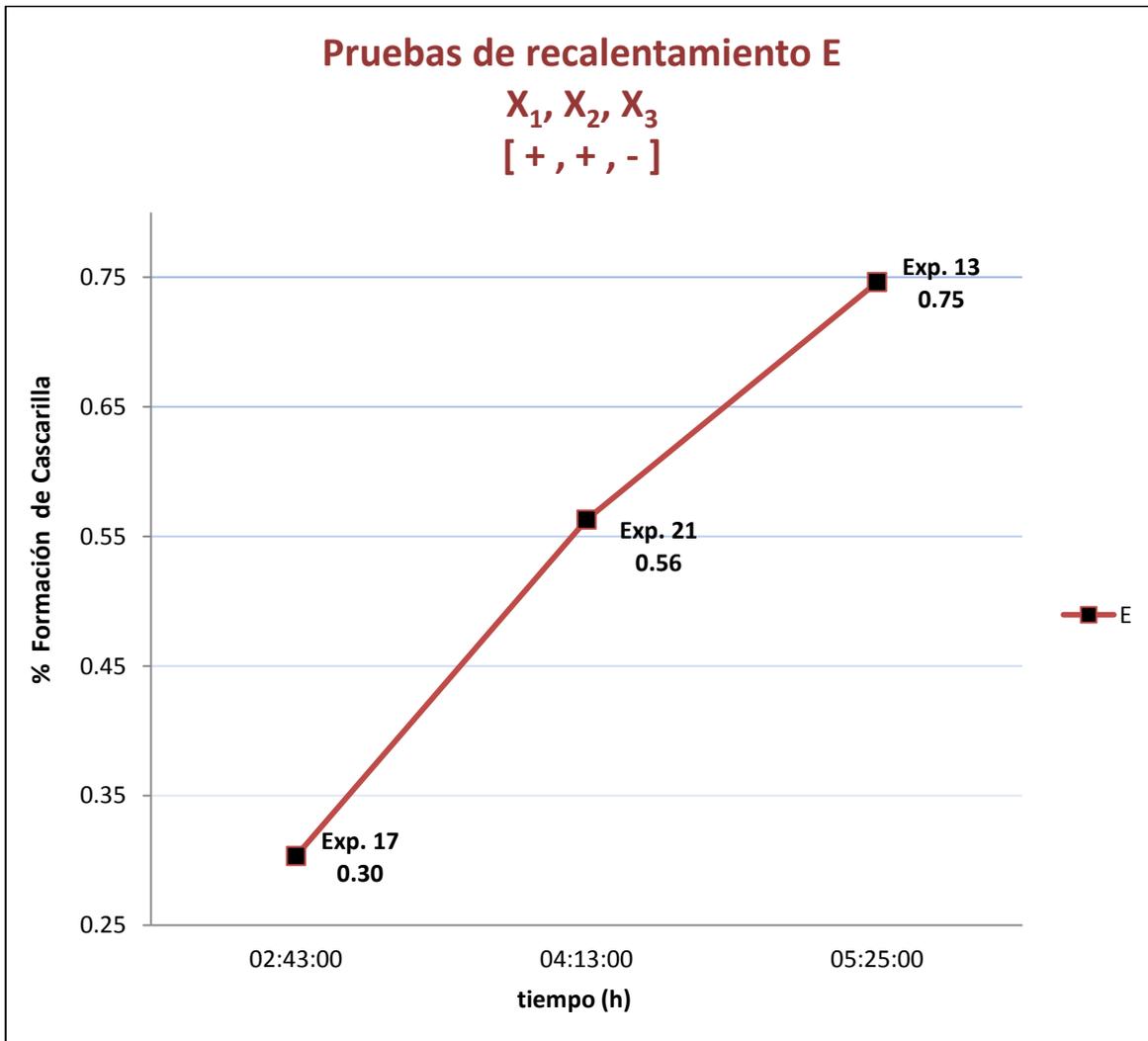


Fig. 3.6 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “E”: Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 11.0, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y sin limpieza superficial del acero.

La figura 3.7 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 19, 15 y 23, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

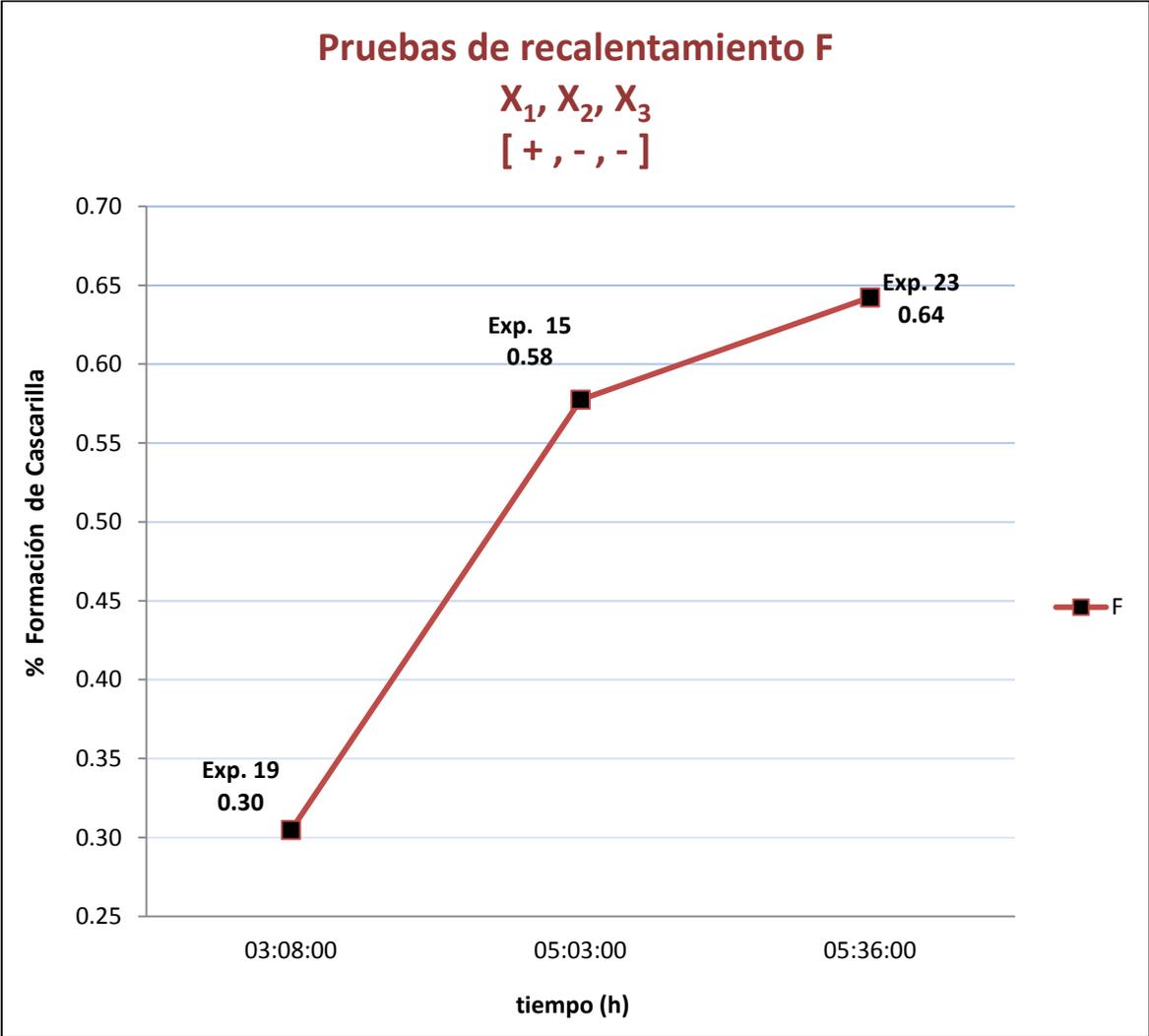


Fig. 3.7 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “F”: Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 11.0, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y sin limpieza superficial del acero.

La figura 3.8 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 18, 22 y 14, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

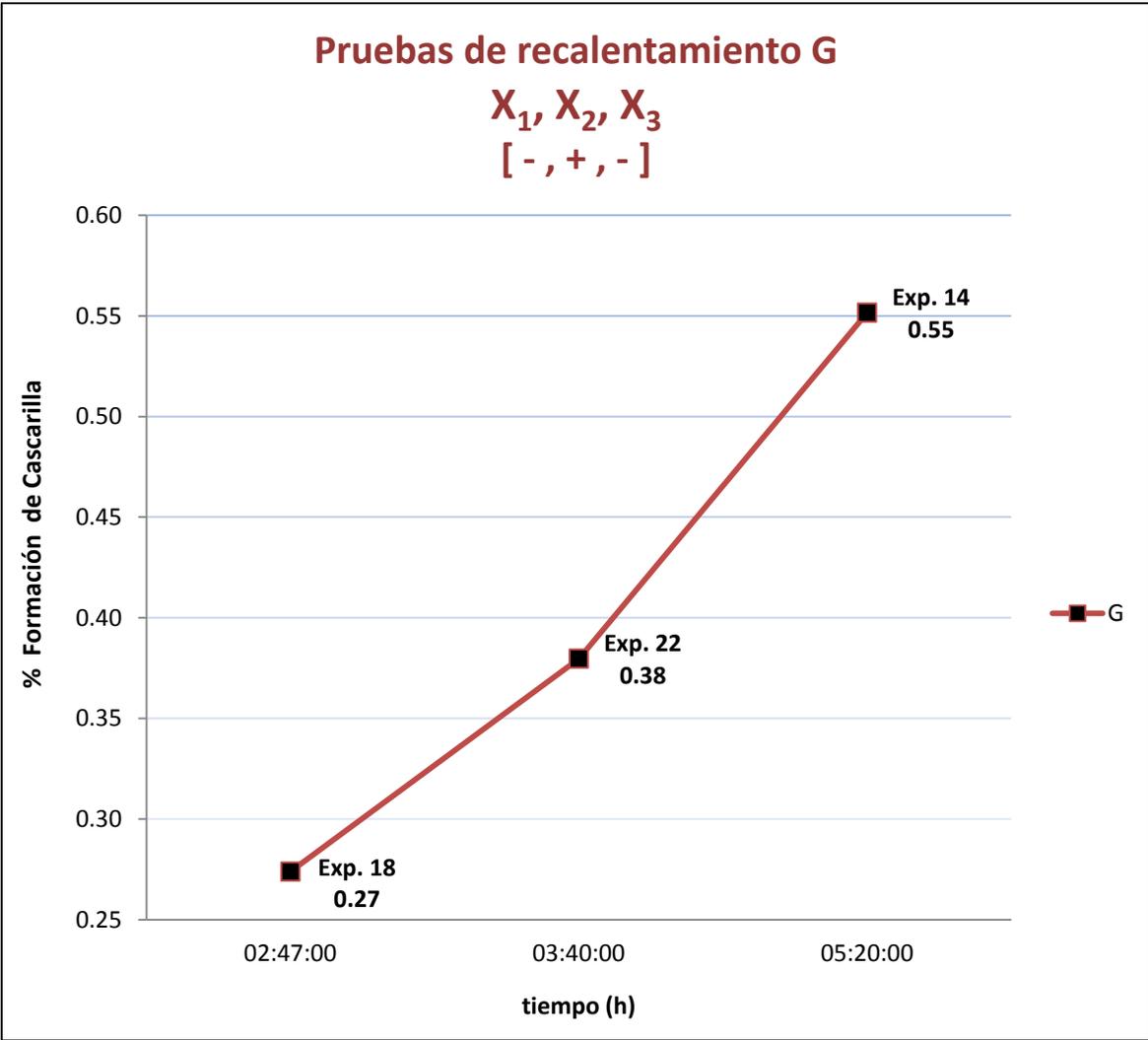


Fig. 3.8 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “G”: Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y sin limpieza superficial del acero.

La figura 3.9 nos muestra la tendencia de % de cascarilla formada con los parámetros utilizados, conseguido gracias a la combinación de los experimentos 20, 16 y 24, se puede visualizar que a mayor tiempo en el horno conseguimos un mayor % de formación de cascarilla de acero.

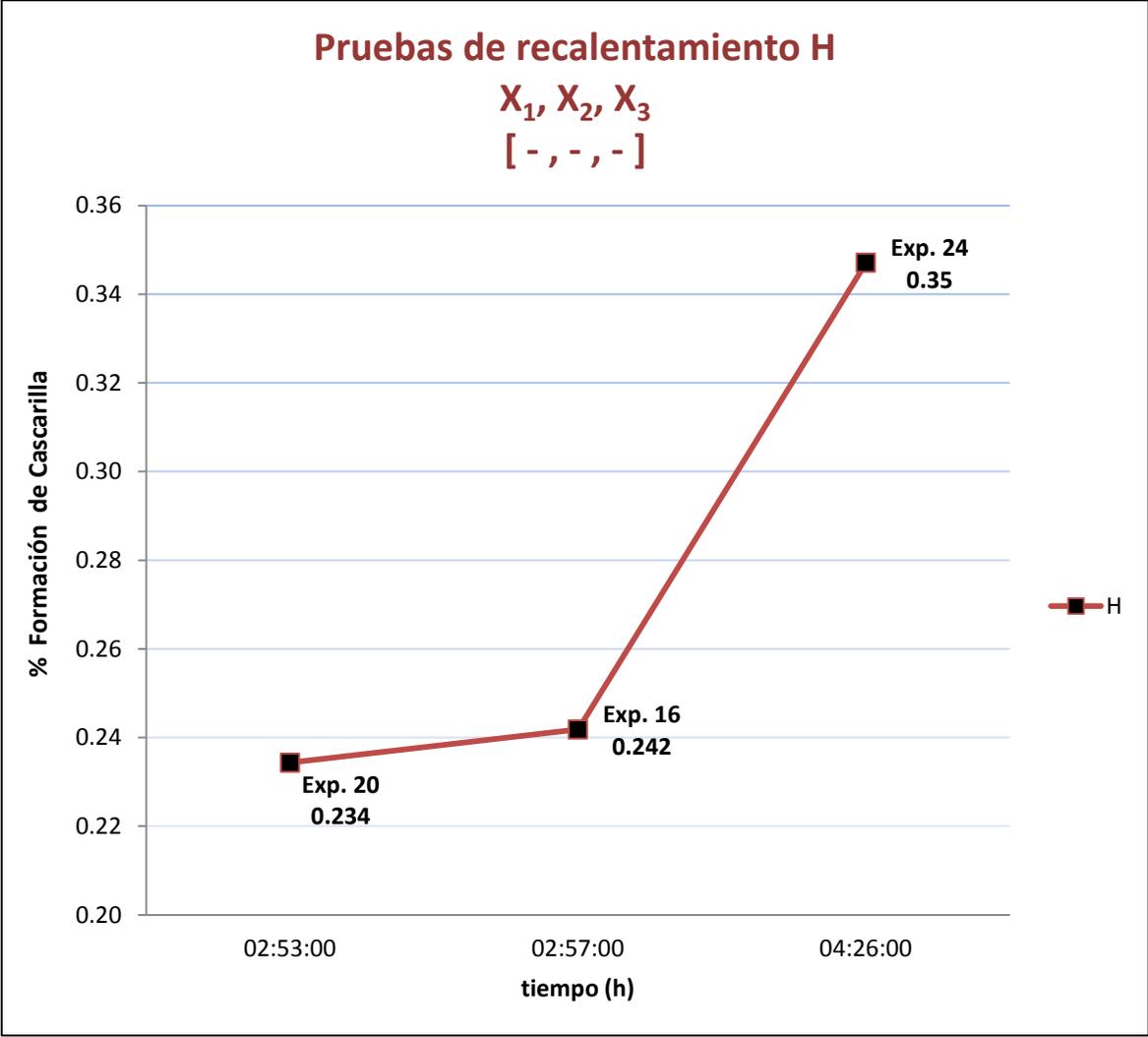


Fig. 3.9 Porcentaje de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “H”: Relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y sin limpieza superficial del acero.

En la figura 3.10 se puede observar cada una de las tendencias de formación de cascarilla para cada una de las combinaciones posibles E, F, G y H de acuerdo a las relaciones de aire gas en zona de calentamiento e igualación del horno y la nula limpieza superficial de las palanquillas de acero.

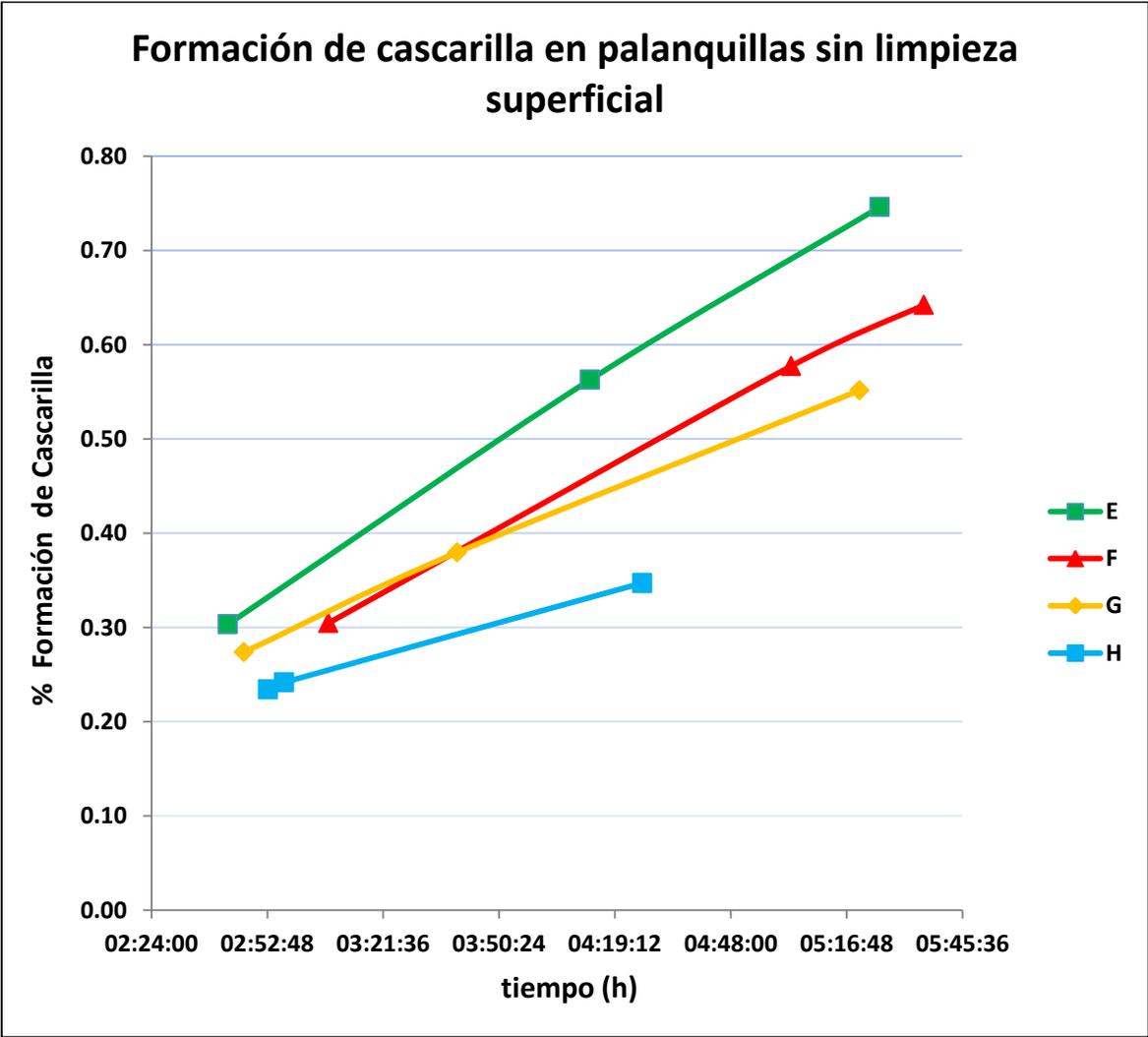


Fig. 3.10 Resultado de formación de cascarilla, efecto de la combinación de resultados de recalentamiento "E, F, G y H".

En la tabla 3.4 se observan los resultados finales del diseño experimental tomando en cuenta la desviación estándar y media de los datos.

Experimento	Relación de aire/gas Calentamiento X_1	Relación de aire/gas Igualación X_2	Limpieza del acero X_3	% de Cascarilla (Replicas)			Resultados	
				Y_1	Y_2	Y_3	Desviación	Media
E	11.0	10.8	NO	0.3035	0.5630	0.7463	0.222	0.5376
F	11.0	10.4	NO	0.3048	0.5775	0.6423	0.179	0.5082
G	10.6	10.8	NO	0.2739	0.3797	0.5516	0.140	0.4017
H	10.6	10.4	NO	0.2343	0.2418	0.3471	0.063	0.2744

Tabla 3.4 Resultados del diseño de experimentos para palanquillas sin limpieza.

CAPITULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Pruebas de recalentamiento A, B, C, y D en palanquillas con limpieza.

En los resultados obtenidos de formación de cascarilla en las palanquillas con limpieza se observa que los datos arrojan una tendencia lineal en cada una de las combinaciones de relaciones de aire/gas y limpieza superficial del acero utilizado, es decir a mayor tiempo de recalentamiento obtenemos una mayor formación de cascarilla como nos muestran las pruebas de recalentamiento en las experimentaciones A, B, C y D.

En la Tabla 3.1 se visualizan los primeros 12 experimentos realizados y las relaciones de aire/gas en las zonas de precalentamiento, calentamiento e igualación utilizados para cada una de estas pruebas respectivamente, así mismo se muestra que las primeras 12 palanquillas de acero calidad A-36 introducidas al horno adquieren limpieza superficial en ellas previamente.

En las pruebas de recalentamiento A (Fig. 3.1, Dominio experimental: +++) se muestran los resultados de un experimento por triplicado con las mismas condiciones donde los parámetros establecidos son: relación de aire / gas en zona de calentamiento igual a 11, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y limpieza superficial del acero efectuada. Se puede ver que en esta prueba los dominios experimentales usados fueron los mayores respecto a las demás pruebas ya que se usa la combinación con las pruebas positivas en los tres parámetros. Se verifica que en el experimento 9 se tiene un porcentaje de formación de cascarilla de 1.23 %, el cual fue el mayor porcentaje de cascarilla generado con limpieza superficial (Experimento A, Replica Y₃; ver Tabla 3.2), esto es debido a que se utilizó una mayor relación de aire gas en ambas zonas de calentamiento del horno, así mismo junto con el experimento 4 (Fig. 3.4) son las pruebas que tuvieron un calentamiento de más de 8 horas y media.

En las pruebas de recalentamiento B (Fig. 3.2, Dominio experimental: +-+) se muestran los resultados de un experimento por triplicado con igualdad de condiciones donde los parámetros establecidos son: relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 11, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y limpieza superficial del acero efectuada. Se puede ver que en esta prueba los dominios experimentales usados fueron dos mayores (relación de aire gas en zona de calentamiento y limpieza superficial del acero) ya que se usa la combinación con las pruebas positivas en ambos parámetros y una menor (relación de aire/gas en zona de igualación), ya que se emplea la combinación con las prueba negativa en este parámetro. Se verifica que en el experimento 10 se tiene un porcentaje de formación de cascarilla de 0.49%, el cual es de los menores porcentajes de cascarilla generada (Experimento B, Replica Y₁; ver Tabla 3.2), junto con el experimento 12 (Fig. 3.4) son las pruebas que tienen un calentamiento menor de 3 horas y media. La tendencia mostrada de estas pruebas de recalentamiento B indica una menor generación de cascarilla respecto a la tendencia mostrada por las pruebas de recalentamiento A en tiempos similares de recalentamiento del acero con limpieza superficial.

En las pruebas de recalentamiento C (Fig. 3.3, dominio experimental: -++) se muestran los resultados de una experimentación con igualdad de condiciones, los parámetros establecidos son: relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y limpieza superficial del acero efectuada. Se puede ver que en esta prueba los dominios experimentales usados fueron dos mayores (relación de aire gas en zona de igualación y limpieza superficial del acero) ya que se usa la combinación con las pruebas positivas en ambos parámetros y una menor (relación de aire/gas en zona de calentamiento) ya que se emplea la combinación con la prueba negativa en este parámetro. Se verifica que en el experimento 11 tenemos un porcentaje de formación de cascarilla de 0.46 %, el cual fue el menor porcentaje de cascarilla generado (Experimento C, Replica Y₁, ver Tabla 3.2), junto con el experimento 12 (Fig. 3.4) son las pruebas que tuvieron un calentamiento menor de 3 horas y media. La tendencia mostrada de estas pruebas de recalentamiento C indica una

menor formación de cascarilla respecto a la tendencia mostrada por las pruebas de recalentamiento B a tiempos similares de recalentamiento del acero con limpieza superficial.

En las pruebas de recalentamiento D (Fig. 3.4, dominio experimental: --+) se muestran los resultados de un experimento por triplicado con igualdad de condiciones, los parámetros establecidos son: relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y limpieza superficial del acero efectuada. Se observa que en esta prueba los dominios experimentales usados fueron dos menores (relaciones de aire gas en zona de calentamiento e igualación) ya que se usa la combinación con las pruebas negativas en ambos parámetros y uno mayor (limpieza superficial del acero) ya que se emplea la combinación con la prueba positiva en este parámetro. Se verifica que en los experimentos 12, 8 y 4 tenemos un porcentaje de formación de cascarilla representado de forma lineal e indica que estas pruebas de recalentamiento D brindan una menor formación de cascarilla respecto a la tendencia mostrada por las pruebas de recalentamiento C a tiempos similares de recalentamiento del acero con limpieza superficial, excepto por el experimento 11 (Experimento C, Replica Y₁; Ver Tabla 3.2), que muestra una formación menor de cascarilla a un tiempo similar del ensayo 12 (Experimento D, Replica Y₁; ver Tabla 3.2).

De acuerdo a la Fig. 3.5 es posible comparar cada una de estas pruebas con los parámetros efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “experimentos A, B, C y D”. Se aprecia claramente que cuando se utiliza una relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, una relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y se efectúa una limpieza superficial del acero, se obtiene a lo largo del tiempo de recalentamiento en un proceso normal una menor formación de cascarilla de acero “experimento D”, caso contrario al “experimento A” el cual muestra una tendencia de mayor porcentaje de formación de cascarilla por cada palanquilla recalentada en el horno y con los parámetros más altos de relación aire/ gas en zona de calentamiento igual a 11,

relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y con limpieza superficial del acero. Esto se debe a que a mayor relación de aire /gas se inyecta una mayor cantidad de exceso de aire el cual proporciona una mayor cantidad de oxígeno a la combustión generada en el interior del horno, lo cual ocasiona la formación de óxido de hierro en mayor cantidad, representada en términos científicos como la difusión del oxígeno en el acero y la formación de wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3) formando una capa protectora en el acero. Así mismo pero en menor cantidad ocurre el fenómeno de descarburización superficial en el acero el cual es decir ocurre una disminución en el contenido de carbono en el acero debido a la reacción con los gases presentes en la atmósfera del horno (O_2 , CO_2 y H_2O).

De acuerdo a los resultados del diseño experimental propuesto 2^k , el experimento ó pruebas de recalentamiento D es la mejor opción para recalentar las palanquillas “con limpieza efectuada en las mismas” ya que se obtiene un menor porcentaje de formación de cascarilla y la desviación estándar y la media obtenida son menores respecto a las demás pruebas (0.109 y 0.6055 respectivamente) por tanto los parámetros a utilizar son los menores (Dominio experimental --+), relación de aire gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y limpieza superficial del acero efectuada.

4.2 Pruebas de recalentamiento E, F, G y H en palanquillas sin limpieza.

En los resultados obtenidos de formación de cascarilla en las palanquillas sin limpieza se observa que los datos obtenidos muestran una tendencia lineal en cada una de las combinaciones de relaciones de aire/gas y limpieza superficial del acero utilizados al igual que las pruebas iniciales, es decir a mayor tiempo de recalentamiento obtenemos una mayor formación de cascarilla en las pruebas de recalentamiento de los experimentos E, F, G y H.

En la Tabla 3.3 se visualizan los 12 experimentos finales realizados y las relaciones de aire/gas en las zonas de precalentamiento, calentamiento e igualación utilizados para cada una de estas pruebas respectivamente, así mismo muestran que las 12 palanquillas de acero calidad A-36 introducidas al horno no adquieren limpieza superficial en ellas.

En las pruebas de recalentamiento E (Fig. 3.6, Dominio experimental: ++-) se muestran los resultados de un experimento por triplicado con las mismas condiciones, donde los parámetros establecidos son: relación de aire / gas en zona de calentamiento igual a 11, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y limpieza superficial del acero no efectuada. Se observa que en esta prueba los dominios experimentales usados fueron dos mayores (relaciones de aire gas en zona de calentamiento e igualación) ya que se usa la combinación con las pruebas positivas en ambos parámetros y uno menor (limpieza superficial del acero) ya que se emplea la combinación con la prueba negativa en este parámetro. Se verifica que en los experimentos 17, 21 y 13 se tiene un porcentaje de formación de cascarilla representado en una tendencia lineal, lo cual indica que estas pruebas de recalentamiento E brindan una mayor formación de cascarilla respecto a la tendencia mostrada por las pruebas de recalentamiento F, G y H a tiempos similares de recalentamiento del acero con limpieza superficial (Fig. 3.10). El experimento 13 muestra el mayor porcentaje de formación de cascarilla con 0.746 % (Experimento E, Replica Y₃ ; ver Tabla 3.4) en estas pruebas con limpieza de acero, que a diferencia de las pruebas sin limpieza sigue siendo menor la formación de oxido ya que al contar con una capa protectora de oxido de hierro proveniente de la colada continua del proceso de Acería (cascarilla primaria), el oxigeno proveniente del exceso de aire en el interior del horno difunde en menor cantidad hacia la zona expuesta a la oxidación del acero.

En las pruebas de recalentamiento F (Fig. 3.7, Dominio experimental: +--) se muestran los resultados de un experimento por triplicado con igualdad de condiciones al igual que las pruebas anteriores, los parámetros establecidos son: relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 11.0, relación de aire/gas en

zona de igualación igual a 10.4 y limpieza superficial del acero no efectuada. Se observa que en esta prueba los dominios experimentales usados fueron dos menores (relación de aire gas en zona de igualación y limpieza superficial del acero) ya que se usa la combinación con las pruebas negativas en ambos parámetros y uno mayor (relación de aire/gas en zona de calentamiento) ya que se emplea la combinación con la prueba positiva en este parámetro. Se verifica que en los experimentos 19, 15 y 23 se tiene un porcentaje de formación de cascarilla representado de forma lineal, así mismo muestra que estas pruebas de recalentamiento F brindan una menor formación de cascarilla respecto a la tendencia mostrada por las pruebas de recalentamiento E y mayor respecto a las pruebas de recalentamiento G y H a tiempos similares de recalentamiento del acero con limpieza superficial (Fig. 3.10).

En las pruebas de recalentamiento G (Fig. 3.8, Dominio experimental: -+-) se muestran los resultados de un experimento por triplicado con igualdad de condiciones, donde los parámetros establecidos son: relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y limpieza superficial del acero no efectuada. Se observa que en esta prueba los dominios experimentales usados fueron dos menores (relación de aire gas en zona de calentamiento y limpieza superficial del acero) ya que se usa la combinación con las pruebas negativas en ambos parámetros y uno mayor (relación de aire/gas en zona de igualación) ya que se emplea la combinación con la prueba positiva en este parámetro. Se verifica que en los experimentos 18, 22 y 14 se tiene un porcentaje de formación de cascarilla representado en una tendencia lineal e indica que estas pruebas de recalentamiento G brindan una menor formación de cascarilla respecto a la tendencia mostrada por las pruebas de recalentamiento E, F y mayor respecto a la mostrada por la prueba de recalentamiento H a tiempos similares de recalentamiento del acero con limpieza superficial (Fig. 3.10).

En las pruebas de recalentamiento H (Fig. 3.9, Dominio experimental: ---) se muestran los resultados de un experimento por triplicado con las mismas

condiciones, donde los parámetros establecidos son: relación de aire / gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y limpieza superficial del acero no efectuada. Se observa que en esta prueba los dominios experimentales usados son los menores respecto a las demás pruebas ya que se usa la combinación con las pruebas negativas en los tres parámetros. Se verifica que en el experimento 20 se tiene un porcentaje de formación de cascarilla de 0.234 %, el cual fue el menor porcentaje de cascarilla generado sin limpieza superficial (Experimento H, Replica Y₁ ; ver Tabla 3.4), esto es debido a que se utilizó una menor relación de aire gas en ambas zonas de calentamiento del horno y el acero recalentado no fue limpiado a la entrada del horno, este mismo óxido representa una capa protectora de óxido de hierro proveniente de la colada continua del proceso de Acería (cascarilla primaria), el oxígeno proveniente del exceso de aire en el interior del horno difunde en menor cantidad hacia la zona expuesta a la oxidación del acero. Así mismo se confirma que en los experimentos 20, 16 y 24 se tiene un porcentaje de formación de cascarilla representado en una tendencia lineal e indica que estas pruebas de recalentamiento H brindan una menor formación de cascarilla respecto a la tendencia mostrada por las pruebas de recalentamiento E, F y G a tiempos similares de recalentamiento del acero con limpieza superficial (Fig. 3.10).

De acuerdo a la Fig. 3.10 es posible comparar cada una de estas pruebas de recalentamiento con los parámetros efecto de la combinación de resultados de recalentamiento “experimentos E, F, G y H”. Se aprecia claramente que cuando se usa una relación de aire/gas en la zona de calentamiento igual a 10.6, una relación de aire/gas en la zona de igualación igual a 10.4 y no se efectúa limpieza superficial del acero, se obtiene a lo largo del tiempo de recalentamiento en un proceso normal una menor formación de cascarilla de acero “experimento H”, caso contrario al “experimento E”, el cual muestra una tendencia de mayor porcentaje de formación de cascarilla por cada palanquilla recalentada en el horno y con los parámetros más altos de relación aire/ gas en zona de calentamiento igual a 11, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.8 y sin limpieza del acero. Esto se debe a que a mayor relación de aire /gas estamos inyectando una mayor

cantidad de exceso de aire el cual proporciona una mayor cantidad de oxígeno a la combustión generada en el interior del horno, lo cual ocasiona la formación de óxido de hierro en mayor cantidad, representada en términos científicos como la difusión del oxígeno en el acero y la formación de wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3) formando una capa protectora en el acero. Así mismo pero en menor cantidad ocurre el fenómeno de descarburación superficial en el acero el cual es decir ocurre una disminución en el contenido de carbono en el acero debido a la reacción con los gases presentes en la atmósfera del horno (O_2 , CO_2 y H_2O).

De acuerdo a los resultados del diseño experimental propuesto 2^k, el experimento ó pruebas de recalentamiento H es la mejor opción para recalentar las palanquillas “sin limpieza superficial”, ya que se obtiene un menor porcentaje de formación de cascarilla posible, así como desviación estándar y media menores respecto a las demás pruebas (0.063 y 0.2744 respectivamente), por tanto los parámetros a utilizar son los menores (Dominio experimental ---); relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire/gas en zona de igualación igual a 10.4 y limpieza superficial del acero no efectuada.

A diferencia de los mejores resultados de las pruebas iniciales de recalentamiento de palanquillas que se obtuvieron con limpieza superficial A, B, C y D, al no tener esta limpieza del acero la cascarilla primaria proveniente de colada continua ayuda a proteger el acero en el interior del horno como se muestra en los resultados experimentales de las pruebas E, F, G y H. Se considera que la mejor opción para recalentar las palanquillas en un horno de recalentamiento de laminación es la que resultó en este último estudio, “la prueba H” (Dominio experimental ---); relación de aire/gas en zona de calentamiento igual a 10.6, relación de aire / gas en zona de igualación igual a 10.4 y limpieza superficial del acero no efectuada, ya que al verificar los resultados obtenidos fue la prueba que menor porcentaje de formación de cascarilla presentó a lo largo del proceso de recalentamiento de las palanquillas de acero calidad A-36.

No obstante y con igual sentido de importancia cabe destacar que la disminución de formación de cascarilla no es únicamente dada por el control en la atmosfera del horno de recalentamiento (exceso de aire en la combustión), existen fuertes e importantes razones para que se busque minimizar la formación de cascarilla tales como el costo, capacidad de emisividad, daños a la solera del horno y limpieza de las áreas externas, entre otras.

La fundamentación del trabajo aquí plasmado es dada por el estudio en el efecto de las relaciones de aire / gas natural en las zonas de calentamiento e igualación del horno de recalentamiento y limpieza superficial del acero, mismos que revelan la mejor combinación para contribuir con una menor formación de cascarilla (Experimento H), sin embargo cabe mencionar que la cantidad de óxidos o cascarilla formada en los hornos de recalentamiento es influenciada también por otros factores tales como: La temperatura y el tiempo de recalentamiento.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

La limpieza superficial del acero tiene una gran importancia en el recalentamiento de las palanquillas de acero calidad A-36, ya que las palanquillas con previa limpieza efectuada presentan una mayor oxidación durante el proceso de recalentamiento de las mismas, por otra parte las palanquillas sin limpieza superficial efectuada previamente presentan una menor formación de cascarilla durante el recalentamiento ya que el oxido proveniente de colada continua (cascarilla primaria) actúa como una capa protectora evitando la rápida difusión del oxígeno proveniente del aire en exceso hacia la superficie oxidante del acero durante la combustión.

El control de la relación de aire / gas natural en la zona de calentamiento es primordial para la formación de cascarilla ya que es el trecho intermediario del horno de recalentamiento y es donde hay una gran transición de calor para las palanquillas, al mantener esa relación baja dentro de la operación se asegura una menor formación de oxido de hierro durante el recalentamiento en la zona intermedia del horno en un proceso normal de producción.

El control de la relación de aire / gas natural en la zona de igualación del horno es crítico para la formación de cascarilla ya que es el trecho final del horno y donde se sitúa la descarga de las palanquillas calentadas, es además donde existe una mayor generación de cascarilla, mantener esa relación baja asegura una menor formación de cascarilla durante el recalentamiento en la zona final del horno en un proceso normal de producción.

Las relaciones ideales de aire / gas natural en zonas de calentamiento e igualación de un horno de recalentamiento de laminación para el calentamiento de palanquillas son 10.6 y 10.4 respectivamente, así mismo introducir palanquillas sin limpieza superficial previa del acero es indispensable junto con el control de la atmosfera dentro del horno ya mencionado para evitar la formación excesiva de cascarilla de acero dentro del horno de recalentamiento en un proceso normal de producción de una planta productora de acero de la Cd. de México.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alacero: Asociación Latinoamericana del Acero; “América Latina en Cifras 2013”; Benjamín 2944 - 5to piso - Las Condes Santiago de Chile; PP (8).
- [2] Dirección General de Industrias Pesadas y de alta Tecnología, “Monografía del sector siderúrgico en México, 2011”, Dirección de industria metalmeccánica. Febrero del 2011. PP (8, 14-15).
- [3] Mikell P. Groover; “Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, procesos y sistemas.” 1a. Ed. Editorial Pearson Prentice Hall Inc. a Simon & Schuster. 1997. Edición en español publicada por Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. Impreso en México. PP (123-125).
- [4] Steel Construction Manual, 8th Edition, second revised edition, American Institute of Steel Construction, 1986, ch. 1 PP (1-5).
- [5] H. W. Beaty ; "Manual Estándar para Ingenieros Eléctricos, 11va. Ed."; McGraw Hill, New York 1978.
- [6] Maria Isabel Martin Hernandez; “Aplicación tecnológica de un residuo de la industria del acero en la eliminación de metales contaminantes” Tesis Doctoral; Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica; Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, Madrid 2003.
- [7] J.M. Palacios, J.L. Arana et al.; “La Fabricación del Acero”; UNESID, Madrid, España, 1998.
- [8] José Luis Enríquez Berciano, Enrique Tremps Guerra, Susana de Elío de Bengy, Daniel Fernández Segovia; “Laminación”; Monografías sobre tecnología del acero Parte IV, Madrid 2010, PP (54-58).
- [9] Ana Carolina Jirón, Miguel Jirón Proaño; “Tesis: Implementación de un sistema de control mediante PLC para un horno de una fábrica de acero”, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, 2007.
- [10] Enrique Borrás Brucart; “Gas Natural, características, distribución y aplicaciones industriales”; Editores técnicos asociados; Barcelona 1987; PP (16 – 36)
- [11] Mesografía: http://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html (fecha de consulta: 13 de agosto del 2013)

[12] Mesografía: http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1 (fecha de consulta: 13 de agosto del 2013)

[13] ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2008. A36/A36M Standard specification for Carbon Structural Steel 1. Table 3 Chemical Requirements.

[14] Siderúrgica Sevillana, S.A.; “El Proceso”; Ed. Riva; Autovía A92 Km.6 - 41500 – Alcalá de Guadaíra (Sevilla). Información legal - diseño y programación Elmec.; www.siderurgicasevillana.com

[15] William L. Roberts; “Hot Rolling of Steel”; Editorial Marcel Dekker Inc., New York US 1978.

[16] W. Trinks; “Industrial Furnaces -Volumen 1”; 6th Edition; Editorial Wiley; 2000.

[17] W. Trinks; “Hornos Industriales -Volumen 2”; Editora Urmo.

[18] Richard James Reed; “North American Combustion Handbook: A basic reference on the art and science of industrial heating with gaseous and liquid fuels.” Volume 1, 3rd edition Cleveland, OH, 1986.

[19] Vulkan-Verlag; “Pocket Manual for Thermprocess Technology”; 5th Edition; Essen – 1999

[20] Kleinewefer; “Waermetechnisches Taschenbuch “; Industrie-Companie GmbH. BiBTeX EndNote RefMan; 1971.

[21]Rafael Lecuona Alarcon; “Hornos de Recalentamiento para instalaciones de laminación”; Editorial URMO, 1987.

[22] Joan Ferré; “El diseño factorial completo 2k”; Grupo de Quimiometría y Cualimetría Departamento de Química Analítica y Química Orgánica; Universidad Rovira i Virgili, Tarragona España.

[23] S.P.Shenoy; “Preventing scale-loss in a rolling mill”; Steel Plant Specialities, 211, Raikar Chambers, Govandi East, Mumbai 400 088 pp(2,3)

[24] Dr. Arvind C. Thekdi; “Development of Next Generation Heating System For Scale Free Steel Reheating”; Recipient Organization: E3M, Inc. 15216 Gravenstein Way North Potomac, MD 20878.