

24
3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**"ASPECTOS OPERACIONALES DE LA COLADA
CONTINUA Y SU INFLUENCIA EN LA OBSTRUCCION
DE BOQUILLAS DE LOS DISTRIBUIDORES"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

GERARDO CERECEDO DIEGO

- 1 9 8 9 -

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

INDICE

	PAG.
INTRODUCCION.	1
OBJETIVOS.	3
CAPITULO I. Obstrucción de Boquillas.	4
1.1. Flujo de acero a través de las boquillas.	4
1.1.1. Influencia de los desoxidantes.	5
1.1.2. Silicio más Manganeso.	6
1.1.3. Aluminio.	7
1.1.4. Zirconio y Titanio.	9
1.1.5. Tierras Raras.	9
1.1.6. Pruebas adicionales.	11
1.1.7. Comentarios.	13
1.2. Inclusiones no metálicas y la relación Mn/Si en la obstrucción de las boquillas del distribuidor o tundish.	14
1.2.1. Origen de las inclusiones.	14
1.2.2. Termodinámica de la desoxidación.	15
1.3. Mecanismo del bloqueo en aceros desoxidados con aluminio.	24
1.3.1. Pruebas en planta.	25
1.3.2. Resultados.	26
1.4. Influencia del calcio.	33
1.4.1. Resultados.	34
1.4.2. Comentarios.	34
1.4.3. Efecto del magnesio.	40
1.5. El diseño de la boquilla.	40
1.5.1. La boquilla anular.	41
1.5.2. Pruebas en planta.	44
1.6. Control del aluminio, la desoxidación y la desulfuración del acero para colada continua mediante la medición de la <u>activi</u> dad del oxígeno.	49
1.6.1. Control de la desoxidación.	50
1.6.2. Control del análisis.	54
1.6.3. Tratamiento con calcio.	55
1.6.4. Control de la desulfuración.	59
CAPITULO II. Reoxidación del Acero.	64
2.1. Factores que influyen en la reoxidación del acero líquido durante la colada continua.	64
2.1.1. El chorro de vaciado.	64

2.1.2. Posición de la línea con respecto al chorro de acero de la tina.	66
2.1.3. Estudios con modelos de agua.	67
2.2. Control y protección del chorro de acero líquido.	72
2.2.1. Modelos físicos de los patrones de flujo en el molde.	73
2.2.1.1. Modelos de agua.	73
2.2.1.2. La boquilla estriada.	77
2.2.1.3. Aplicación en AUSA.	79
2.2.2. Modelos químicos a temperatura ambiente para la absorción de gas por el acero fundido.	81
2.2.3. Modelos para la absorción de gas con gotas de acero líquido.	83
2.2.4. Desarrollo de laboratorio de diseños para producir envolturas o atmósferas protectoras.	86
2.2.4.1. Modelos de agua y diseños comerciales.	86
2.2.4.2. Aspectos experimentales.	89
2.2.5. Absorción de oxígeno.	90
2.2.6. Absorción de nitrógeno.	90
2.2.7. Recuperación de aluminio.	96
2.2.8. Limpieza de la palanquilla.	96
DISCUSION.	100
CONCLUSIONES.	106
DESCRIPCION DE LAS LOCUCIONES LATINAS.	109
BIBLIOGRAFIA.	110

INTRODUCCION .

Aún cuando la colada continúa vino a revolucionar la productividad del acero trayendo consigo una tecnología más sofisticada, trajo también sus problemas específicos. Estos son de diferente índole. Dos de estos problemas están relacionados con las condiciones de operación y, dada su magnitud, han despertado la inquietud y, en muchos casos la preocupación de empresarios, ingenieros, técnicos, investigadores y de muchas otras personas relacionadas con la siderurgia. Estos son: La obstrucción de boquillas (primordialmente las del distribuidor) y la reoxidación del acero.

La obstrucción de boquillas es un problema que acarrea pérdidas cuantiosas todos los años a la industria siderúrgica ya que al bloquearse los orificios por donde fluye el metal líquido, y mientras se intenta fundir con lanzas de oxígeno estos "tapones" que obstruyen el paso del a acero en el sistema, los minutos pasan; si se tiene éxito al destapar las boquillas, en la gran mayoría de los casos, en pocos segundos el bloqueo se repite convirtiéndose en un problema que concluye con el enfriamiento del acero en los distintos receptáculos de la unidad de colada continua (tinajas y distribuidores), teniendo que tirarse el metal contenido en éstos en los escoriaderos de la planta debido a que el acero ya se ha enfriado siendo imposible continuar con la colada de la carga. Este acero que se tira, y que tiene un alto valor agregado (materias primas, mano de obra, depreciación de los equipos, etc.), se convierte así, de repente, en simple chatarra con un valor mucho menor.

Por otra parte, la reoxidación que también guarda relación con el anterior problema, impacta directamente en la limpieza y la calidad de los productos terminados.

En los últimos años se ha acelerado la investigación en estas áreas, básicamente en los países desarrollados y tradicionalmente aceros, tratando de aportar soluciones.

En México ésta ha sido muy escasa y de hecho se cuenta con relativamente poca información en idioma español sobre estos temas. El presente estudio es el resultado de varios meses de búsqueda de información la --

cual, en su vasta mayoría, sólo aparece reportada en artículos publicados por diferentes instituciones del extranjero, tratando al mismo tiempo de confrontarla con el caso de las acerías en nuestro país.

En el capítulo I se enfatiza que con la llegada de la colada continua crece el problema de la obstrucción de boquillas y se presentan los primeros estudios e hipótesis propuestas al respecto, la influencia de la relación Mn/Si y la influencia de las inclusiones y su origen; se enmarca en forma particular el mecanismo de bloqueo con aluminio (siendo éste el mecanismo de bloqueo más comprobado y aceptado en la actualidad presentándose las diferentes hipótesis generadas al respecto y se le da un tratamiento particular a la influencia del calcio dado que, según lo argumentan algunos investigadores, la colabilidad del acero desoxidado con aluminio o con aluminio se torna muy sensible a los cambios de concentración de ese elemento. Por otro lado, concentrándose en forma de boquilla, se ha buscado una solución práctica al problema que en sí es físico pero de origen químico. La sección 1.6 es una opción interesante para el control eficiente del carácter químico del metal para mejorar su colabilidad y su limpieza, una propuesta tendiente a la modernización de nuestra industria, principalmente la mediana, Las secciones 1.1 a la 1.4 se centran en el estudio del problema y la 1.5 y 1.6 plantean soluciones tentativas.

El capítulo II ratifica a la reoxidación como una de las fuentes más serias de inclusiones. Se estudian los factores que la dominan empleando modelos de agua y pruebas en plantas. Se analiza el empleo de boquillas sumergidas, gases inertes y un diseño específico de boquilla probado ya en México. Se estudian los patrones de flujo en el molde y la absorción de gases a nivel experimental en Laboratorio y Planta centrándose en la absorción de O₂ y N₂, la recuperación de aluminio y la limpieza de la palanquilla,

La última parte consiste en una breve discusión en la que he intentado hacer un análisis de los distintos argumentos que los investigadores presentan cotejándolos entre sí y también con lo que a nivel industrial he podido observar en México. Finalmente presento mis conclusiones.

OBJETIVOS.

1. Demostrar que existe una interrelación entre la fabricación del acero en el horno y las condiciones ambientales y de operación en la unidad de colada con referencia a la buena colabilidad del metal y a la calidad del producto final. 1
2. Efectuar una recopilación de diferentes trabajos realizados en el campo de la obstrucción de boquillas y su relación con la reoxidación para presentarlos en un solo documento que sirva de base a futuras investigaciones en México.
3. Exponer algunas de las ventajas técnicas que ofrecen las distintas soluciones tentativas presentadas a lo largo de este estudio.
4. Discutir algunos aspectos del proceso de asimilación en nuestro medio de las distintas soluciones tentativas generadas por las investigaciones expuestas en esta tesis.
5. Poner en relieve el mecanismo dominante en la obstrucción de boquillas.
6. Tratar de establecer en forma general las condiciones más recomendables de desoxidación y colada para una producción libre de obstrucción de boquillas, manteniendo un bajo nivel de inclusiones en el semielaborado de acero.

CAPITULO I

OBSTRUCCION DE BOQUILLAS

1.1. FLUJO DE ALCERO A TRAVES DE LAS BOQUILLAS

Hasta hace pocos años, los acereros sólo consideraban a los materiales desoxidantes en función de su efecto sobre el contenido de oxígeno y sobre las inclusiones no metálicas formadas en el proceso de desoxidación. Aunque se sabía que influían en el flujo del acero a través de las buzas, tazas o boquillas de los receptáculos que lo contenían, nunca se le tomó se ría consideración a este hecho, hasta la llegada de la colada continua (especialmente la de palanquillas). Los acereros entonces, tuvieron que limitar y hasta eliminar el empleo del aluminio en el control del tamaño de gru no y en la desoxidación debido al temor por la obstrucción de las boquillas del distribuidor.

Los aceros que antes se desoxidaban fuertemente (aceros muertos) para su colada tradicional en lingoteo, se tuvieron que desoxidar en menor grado (aceros calmados) para poder colarse en la colada continua, pues - aquellos no fluían bien en el nuevo sistema.

Ahora bien, la experiencia pronto les indicó que bastaba con "picar" el centro de la boquilla con una lanza o con un tubo de oxígeno en los momentos en que se presentaran los síntomas del bloqueo para mantener siempre flujo de acero a través de aquella. En consecuencia, se acostumbraron a tomar el hecho como un "gaje del oficio" generado por la desoxidación.

No se hizo ningún estudio profundo al respecto, sino hasta después de varios años. Diversas observaciones en el pasado ya habían sugerido las posibles causas del fenómeno. En 1949, Snow y Shea (1) en un estudio sobre los mecanismos de erosión de las boquillas de las cucharas o tinas, reportaron la presencia de alúmina (Al_2O_3) cubriendo los bordes de dichas buras o boquillas empleadas en el vaciado de acero para lingote de grano fino tratado con aluminio. No obstante, ningún estudio sistemático se realizó después de ello.

Con la expansión del sistema de colada continua, en los años sesentas, se agudizaron los problemas resultantes del empleo del aluminio en la desoxidación de los aceros vaciados en estas unidades, en muchos de los cuales se tuvo que emplear vanadio y columbio para el refinamiento del grano.

Tiempo después, los investigadores concentraron toda su atención al estudio y entendimiento de los mecanismos que influían en la colabilidad de los aceros tratados con aluminio, y que se asociaban con la obstrucción de boquillas, con la esperanza de encontrar soluciones al problema. En 1967, Duderstadt et.al. (2), demostraron que el bloqueo de las boquillas durante la colada de un acero 1020, desoxidado con cantidades diversas de aluminio, se debía a la precipitación y aglomeración de alúmina en los bordes de las mismas.

Posteriormente, estudios sobre el problema confirmaron lo anterior; pero además también sugirieron que no sólo se restringe al tratamiento con aluminio, sino que también se presenta con otros elementos gobernantes de la desoxidación y que producen, durante ese proceso, fases de óxidos de alto punto de fusión.

1.1.1. INFLUENCIA DE LOS DESOXIDANTES

Como se ha indicado con anterioridad, el aluminio no es el único desoxidante que ha mostrado un marcado efecto sobre la colabilidad de los -

(1) Snow, R.B. and Shea, J.A., Cit. por, Farrell, J.W., and D.C. Hilty, op. cit., p. 110

(2) Duderstadt, G.C., Ivenger, R.K. and Matesa, J.M., cit. por, Farrell, J. W., and Hilty, D.C. op. cit., p. 110

aceros. Estudios colaterales de fluidez de acero por las boquillas se han venido efectuando a nivel laboratorio, con distintas prácticas de desoxidación. Los resultados han proporcionado valiosa información sobre el fenómeno y han servido de base para poner en práctica diversos sistemas innovadores en las unidades de colada, y para profundizar más aún en los estudios sobre desoxidación, reoxidación y otros, así como en el mismo terreno del bloqueo de boquillas que, todavía hoy en día, sigue causando fuertes pérdidas en la industria siderúrgica.

A continuación, se expondrán algunos de estos resultados con las conclusiones obtenidas, por Farrell y Hilty (3) en sus estudios de laboratorio sobre desoxidación y bloqueo de boquillas.

1.1.2. SILICIO MAS MANGANESO

De la figura 1.1 es notorio que la razón de flujo para los primeros 27.3 Kg de un acero 1038 de grano grueso desoxidado con silicio y manganeso, fue constante como lo demuestra la línea recta de la curva (colada experimental con un peso total de 41 Kg). Más aún, la razón de flujo permanece prácticamente constante hasta aproximadamente 3.8 Kg, a pesar de tener ya un descenso de 3.8 cm en la carga ferrostática. Indicando esto relativa insensibilidad a los pequeños cambios en ésta.

El examen metalográfico de los residuos en la boquilla, mostró sólo los restos de un típico acero calmado con silicio. El tipo de inclusiones hallado fueron silicatos pequeños de manganeso distribuidos al azar. Estas mismas inclusiones se encontraron en el lingote. Al encontrar en los diferentes puntos de la boquilla y el lingote el mismo tamaño, tipo y distribución de inclusiones, se deduce que su origen debió ser el mismo: formadas por precipitación de la solución como un líquido inmiscible durante el enfriamiento y la solidificación, es decir, los típicos productos de desoxidación endógenos para aceros 1038 desoxidados con silicio y manganeso.

(3) Vid: Farrell, J.W. and Hilty, D.C. "Steel Flow Through Nozzles" p. 31 -45, op. cit., p. 110

El hecho de que la desoxidación con silicio más manganeso produzca fases de óxido que son líquidas a la temperatura de aceración, explica la pequeña dificultad encontrada al colar aceros tratados de esta manera: Los productos de desoxidación pasan inofensivamente por las boquillas.

1.1.3. ALUMINIO.

La figura 1.2 nos muestra la curva de flujo típica de un acero 1038 desoxidado con 0.22 Kg de Al por tonelada. En contraste con la práctica anterior, no se presenta constante la razón de flujo durante la colada sino que decrece hasta que el acero deja de fluir. Para analizar el mecanismo que opera en este caso, se coló una segunda carga con adición ahora de 0.35 Kg de Al por ton , y la temperatura se mantuvo baja para que la boquilla se cerrara por solidificación del acero (pérdida de calor). Posteriormente se seccionó la boquilla para su macroexamen. Este mostró inclusiones de alúmina aglomeradas alrededor de la entrada de la boquilla. Como un detalle particular se observó que las inclusiones al llegar a los bordes de la boquilla, se extienden hacia arriba para depositarse en el acero remanente en el distribuidor adyacente a la boquilla.

Por otra parte, el examen metalográfico mostró que las inclusiones halladas en el acero remanente en el distribuidor así como en el lingote fueron grupos de pequeña alúmina distribuidas al azar, lo que acaba por confirmar que el aluminio estuvo presente en el control del proceso desoxidante. Las inclusiones precipitaron debido al cambio en el producto de solubilidad del óxido por el descenso de temperatura, en forma análoga a las inclusiones de silicato de manganeso, sólo que aquellas no lo hacen como un líquido inmiscible a las temperaturas de aceración, sino como un sólido.

Un estudio similar de la boquilla indicó la presencia de las mismas inclusiones, sólo que aquí fueron más numerosas.

Se ha postulado que un hecho responsable de la precipitación y acumulación de las inclusiones de alúmina en las boquillas es que, aunque el distribuidor y sus boquillas son precalentadas, están relativamente frías - en relación al acero líquido, además de existir un gradiente de temperatura a través de toda la boquilla desde su interior hasta su exterior, el cual -

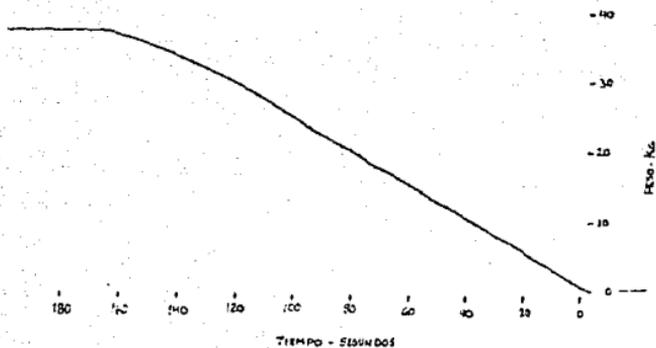


Fig. 11. Carta de flujo de un acero 1038 desoxidado con Silicio y Manganeso.

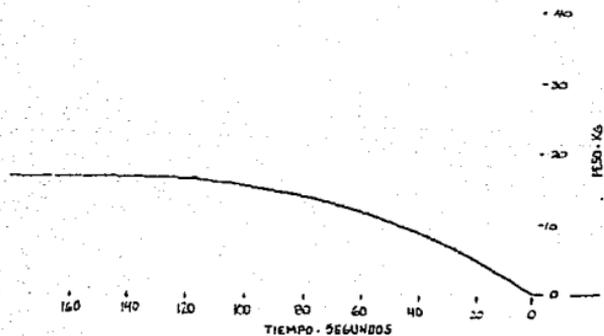


Fig. 12. Carta de flujo de un acero 1038 desoxidado con 227 g de Aluminio por ton.

en realidad está siendo enfriado en forma constante por el aire ambiental. De modo pues que cuando el acero entra en contacto con la boquilla, el resultado neto de la caída de temperatura en aquel, es la precipitación de alúmina para satisfacer un nuevo producto de solubilidad y, una vez iniciado, el proceso es "autoacelerable" como lo muestra la carta de flujo. Con ello el flujo decae, dando como resultado un incremento en el tiempo de residencia del acero en la boquilla, causando más su enfriamiento y reiniciando el ciclo hasta el bloqueo total.

1.1.4. ZIRCONIO Y TITANIO

Ambos elementos de desoxidación producen fases sólidas (óxidos) a las temperaturas de aceración. Así, si uno o ambos se encuentran presentes en concentración suficiente para generar el equilibrio con el oxígeno, puede anticiparse el bloqueo de las boquillas por la precipitación de los óxidos refractarios.

La carta de flujo de la Fig. No. 1.3. ilustra el comportamiento de un acero 1038 desoxidado con 0.35 Kg de Zr por ton. En general, la tendencia es la misma que la obtenida con el tratamiento de aluminio, aunque en el caso del zirconio el peso del lingote obtenido es considerablemente menor.

Exámenes de la boquilla muestran el mismo tipo de crecimiento dendrítico de las inclusiones y de bloqueo observado en los aceros tratados con aluminio, aunque en el caso del zirconio el precipitado resulta ser mucho más fino (ZrO_2). Resultados similares se observan al tratar el acero con 0.45 Kg de titanio por ton. La carta de flujo se presenta en la fig. 1.4. Las inclusiones encontradas fueron del tipo Ti_3O_5 .

1.1.5. TIERRAS RARAS

Si el contenido residual de tierras raras en una carga determinada es bastante grande como para transformar los silicatos de manganeso a silicatos de tierras raras, o sea, si las tierras raras gobiernan la desoxidación, los productos endógenos serán sólidos a las temperaturas de aceración y el comportamiento del sistema en relación al bloqueo de boquillas será el mismo que se aprecia en los tratamientos con Al, Zr y Ti.

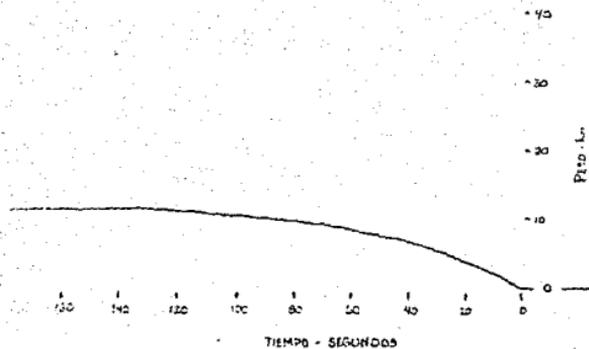


Fig. 1.3. Carta de flujo de un acero 1038 desoxidado con 340 g de Zirconio por ton.

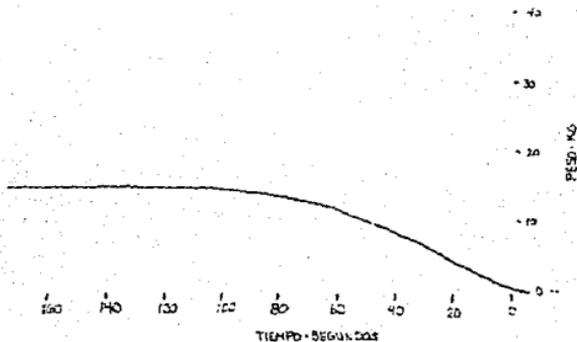


Fig. 1.4. Carta de flujo de un acero 1038 desoxidado con 454 g de Titanio por ton.

La carta de flujo para este caso aparece en la fig. 1.5 representando la desoxidación de un acero 1038 con 0.45 Kg de tierras raras por ton. en forma de silisuros de tierras raras para el control del proceso. Como se aprecia el acero fluye en un corto tiempo y sólo en forma constantemente decreciente. El análisis microscópico muestra que, a diferencia del tratamiento con Al, Ti y Zr, la acumulación de inclusiones en la boquilla es del tipo duplex. Esta observación no resulta demasiado sorprendente desde el momento en que se sabe que las tierras raras son potentes formadores de sulfuros así como desoxidantes. Los sulfuros también son bastante refractarios a las temperaturas de aceración.

1.1.6. PRUEBAS ADICIONALES.

Desoxidación del acero con la adición de 2% de silicio en forma de Si metálico de alta pureza. En ausencia de manganeso, el producto de desoxidación es sílice la cual precipita como un sólido a las temperaturas de colada bloqueando la boquilla en forma similar a como lo hace el Al, Zr, Ti o las tierras raras. La carta de flujo aparece en la fig. 1.6 y muestra las características inherentes a la precipitación de óxidos refractarios, producto de la desoxidación. El examen mostró la típica acumulación de óxidos en la entrada de la boquilla.

Los autores (4) reconocen que existe la posibilidad de que los productos de reoxidación formados durante el vaciado del chorro de acero, pudieran acumularse en la boquilla impidiendo el flujo del acero (ver capítulo II), - pues pequeñas cantidades de productos de reoxidación se han observado en posición interdendrítica en los precipitados de las boquillas, pudiendo de alguna manera afectar cualquiera de las curvas de flujo.

Sin embargo, estos investigadores indican que el factor a dominar para evitar el bloqueo de las boquillas es el control de los productos de desoxidación (4).

(4) Farrell, J.W. and Hilty, D.C., op. cit., p. 110

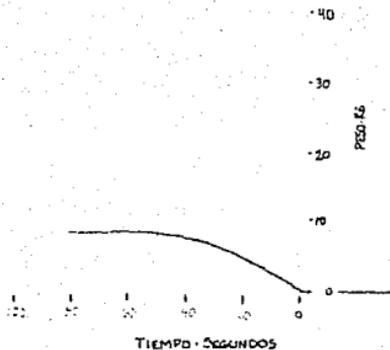


FIG.15. Carta de flujo de un acero 1038 desoxidado con 454 g de Tierras Raras por ton. 0.022% S.

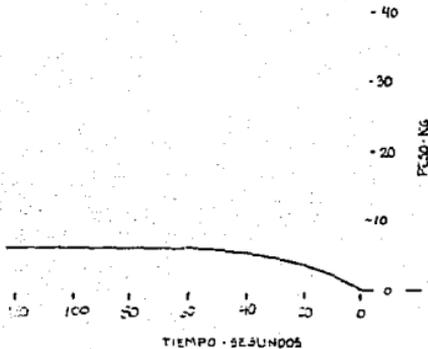


FIG.16. Carta de flujo de un acero 1038 desoxidado con Silicio.

1.1.7. COMENTARIOS

Aún no se logra entender qué fuerzas existen entre los precipitados y el material de las boquillas ni por qué, los relativamente frágiles brazos dendríticos de acumulación de precipitados siguen creciendo a pesar de la acción de lavado del flujo de acero. A pesar de que muchos de los exámenes metalográficos no muestran ninguna clase de reacción, la unión es muy fuerte. Empero, ya se han asentado las bases para futuros estudios al respecto.

Otros trabajos (5) han mostrado una disminución en la cantidad de precipitados mediante el empleo de la desoxidación con carbono en vacío previa a la desoxidación con aluminio. También han indicado que las reacciones entre el aluminio del acero y el material de los revestimientos del distribuidor (en especial los hechos a base de mezclas de FeO y MgO), pueden contribuir al bloqueo de las boquillas pero, a nivel comercial, este efecto es mínimo como lo muestran los resultados en planta.

Afortunadamente se emplea el aluminio como desoxidante de aceros destinados a la producción de palanquillas y planchones de gran calibre, colados en las máquinas a través de boquillas de tamaño relativamente grande en las que el problema del bloqueo se reduce, así como también para la desoxidación de aceros para lingoteo en donde el incipiente bloqueo de la taza o boquilla de la cuchara se elimina en forma simple con el empleo de una lanza de oxígeno para limpiar sus bordes a intervalos durante la operación de vaciado.

Se ha propuesto el empleo de boquillas de refractario poroso purgadas con un gas inerte durante la operación, para evitar la acumulación de alúmina. Otra solución mencionada es el no permitir de algún modo pérdidas de temperatura en el acero desde el horno hasta el molde, principalmente en su paso por las boquillas. Ambas propuestas están aún muy lejos de ponerse en práctica y actualmente se consideran utópicas.

Algunos productores de billet de pequeño calibre han subsanado en parte el problema, y para disminuir el contenido de oxígeno del acero -

(5) Schwaerzferfer, K. and Schreier, H. op. cit., Farrell, J. and Hill, D. op. cit., p. 110

y evitar al mismo tiempo el bloqueo alimentando alambre de aluminio al chorro que cae al molde. Esta técnica puede proveer suficiente aluminio para el control del tamaño de grano, pero no brinda la máxima reducción del contenido de oxígeno pues los productos de desoxidación así formados no alcanzan a ser renovados, dejando mucho que desear con respecto a la limpieza del acero.

1.2. INCLUSIONES NO METÁLICAS Y LA RELACION Mn/Si EN LA OBSTRUCCION DE LAS BOQUILLAS DEL DISTRIBUIDOR O TUNDISH.

Como se ha podido ver, en el proceso de la colada continua se tienen problemas con la presencia de inclusiones no metálicas en el acero líquido que afectan su colabilidad. La presencia de alúmina en el acero líquido es muy nociva pues bloquea las boquillas del distribuidor. Algunos autores (6) dicen que la relación Mn/Si tiene también influencia en la colabilidad y calidad del producto.

1.2.1. ORIGEN DE LAS INCLUSIONES.

Las inclusiones no metálicas se pueden formar de las reacciones que se realizan en el acero líquido y durante su solidificación. Este tipo de inclusiones son inherentes al acero, siendo por lo general óxidos y sulfuros.

Podemos encontrar otro tipo de inclusiones que se forman por la presencia de escoria, refractario y otros materiales que entran en contacto con el acero. Las características de éste tipo de inclusiones son:

- 1) Su gran tamaño.
- 2) Localización preferencial.
- 3) Forma irregular y estructura compleja.

La forma y posición en el producto nos pueden dar una idea de en donde se origina la inclusión.

(6) Vid: Rodiles D.M., op. cit., p. 111

Las fuentes en el horno que originan las inclusiones son:

- a) Las escorias.
- b) Refractarios.
- c) Ferroaleaciones.
- d) En el vaciado del horno por el desprendimiento de refractario y por la reoxidación.
- e) En la cuchara, las puede causar la desoxidación, la escoria y el recubrimiento de la misma.

Fuentes en la colada continua:

1. En el distribuidor, el origen puede ser:
 - a) La placa aislante.
 - b) El refractario del distribuidor y el de la boquilla, así como por reoxidación.
2. En el molde por reoxidación.

1.2.2. TERMODINAMICA DE LA DESOXIDACION.

El objetivo de la etapa de desoxidación en aceración es el de disminuir la cantidad de oxígeno presente en el acero líquido. Para ello se adicionan el mismo elementos que tengan más afinidad por el oxígeno que el hierro. Podemos considerar dos mecanismos de desoxidación:

- 1) Desoxidación por precipitación, causada principalmente por la adición de los elementos desoxidantes al baño y por los aleantes mismos (elementos contenidos en la chatarra).
- 2) Desoxidación por difusión, básicamente transferencia de FeO desde el baño de acero a la escoria.

La precipitación es la que influye fuertemente en la formación de inclusiones.

Las reacciones desoxidantes dependen fundamentalmente del potencial de oxígeno en el líquido, estando en función del contenido de carbono y de la temperatura, (fig. 1.7.).

Además de los dos mecanismos de desoxidación mencionados, se han establecido dos tipos de desoxidación en función de su importancia:

1. Desoxidación primaria, producida por la acción de los elementos desoxidantes adicionados al baño metálico (e.g.: ferro - aleaciones, etc.)
2. Desoxidación secundaria, originada por los elementos de aleación y por la disminución de la solubilidad del oxígeno (e.g.: evitando el contacto del líquido con corrientes de aire, etc.)

Los productos de la desoxidación primaria escapan más fácilmente que los productos de la desoxidación secundaria debido a la caída de temperatura. Las inclusiones encontradas en el acero son producto de las reacciones de éstos dos tipos de desoxidación (endógenas) y del atrapamiento de escoria y de productos de erosión de los refractarios (exógenas).

El manganeso es un desoxidante muy débil que da origen a inclusiones del tipo MnO/FeO ; la composición y morfología de ellas depende del contenido de manganeso en el acero (fig. 1.8.).

El silicio es un desoxidante más fuerte que el manganeso y, por lo general, se usan los dos combinados. Los productos de la desoxidación con silicio son silicatos complejos que pueden estar en forma líquida a la temperatura del baño, o sólida en forma de SiO_2 .

La desoxidación con silicio y manganeso combinados originan productos de desoxidación que se encuentran en el sistema $MnO-SiO_2$; su composición depende de la relación %Si/%Mn en el acero (fig. 1.9.).

De la figura es posible predecir los productos de la desoxidación y, por lo tanto, el tipo de inclusión formada. Si para una temperatu-

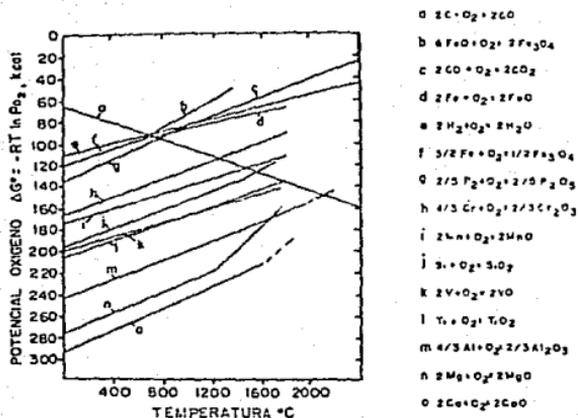


Fig. No.1.7. Potencial de oxígeno para diferentes tipos de óxidos de acuerdo Richardson y Jefeess.

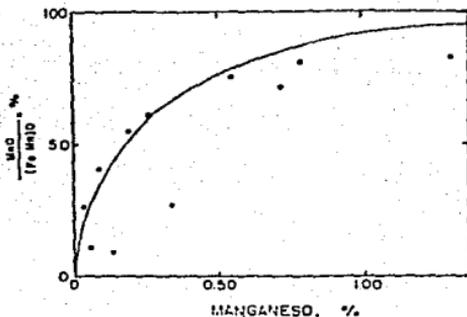


Fig. No.1.8. Porcentaje de inclusiones de tipo MnO, (Fe, Mn)O en un acero desoxidado en función de porcentaje de Mn.

ra determinada, la composición del acero está por arriba de la curva, el manganeso no participa en la reacción y se forma sílice. Si la composición está por debajo de la curva, los productos de desoxidación son líquidos y pertenecen al sistema $MnO-SiO_2$; su composición la determinará la relación $\%Mn/\%Si$.

(7) Las adiciones de Mn y Si al acero deben ajustarse para que al final de la primera etapa de desoxidación a $1650^\circ C$ la concentración de Mn y Si estén por debajo de los valores correspondientes a la isoterma de $1500^\circ C$.

El aluminio es un desoxidante muy fuerte y se usa con el fin de disminuir el contenido de O_2 del acero a niveles mínimos.

De acuerdo al diagrama de fases $FeO-Al_2O_3$ pueden formarse tres productos como resultado de la desoxidación con aluminio, estos productos son:

- a) Hercynita ($FeO-Al_2O_3$), líquida.
- b) Hercynita ($FeO-Al_2O_3$), sólida.
- c) Alúmina, sólida.

El primer producto no se forma cuando la cantidad de oxígeno presente en el acero no es alta. De los otros dos, el más común es la alúmina. En la Fig. 1.10, se muestran las reacciones que tienen lugar en la formación de alúmina y hercynita, indicándose la relación entre el aluminio y el oxígeno en acero fundido entre 1550 y $1700^\circ C$.

De esta figura, a cualquier temperatura, el comportamiento de la desoxidación con aluminio está representado por dos líneas, una de las cuales representa el equilibrio de la alúmina y la otra el equilibrio de la hercynita ($FeO:Al_2O_3$). Donde se unen o cortan, están los puntos críticos e indican la cantidad de oxígeno en equilibrio con ambos productos. e. q. a $1600^\circ C$, el contenido crítico de O_2 es 0.058% .

Se agrega aluminio al acero cuando éste contiene cantidades de oxígeno arriba del valor crítico, siendo el primer producto de desoxida--

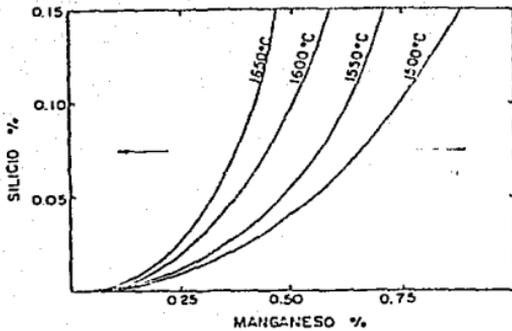


Fig. No. 19. Valores críticos de silicio y manganeso en equilibrio con silicatos de manganeso saturados con sílice a varias temperaturas.

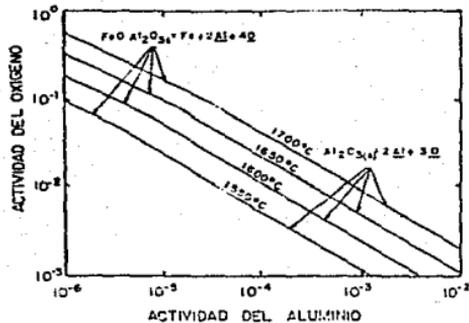


Fig. No. 110. Diagrama de desoxidación con aluminio de acero líquido.

ción la hercynita, la cual se seguirá presentando hasta que el contenido de O_2 llegue al punto crítico; en ese momento se formará la alúmina.

Si el aluminio se agrega en el momento de tener un contenido de O_2 menor del valor crítico, el producto de la desoxidación será la alúmina.

Ahora bien, cuando se usa el aluminio para controlar el contenido de O_2 , y como el manganeso siempre se encuentra presente de una u otra forma en el acero, los aluminatos formados frecuentemente contienen cantidades significativas de manganeso.

En la figura 1.11, el contenido de O_2 en el baño en equilibrio con alúmina y aluminatos a $1600^\circ C$, se ha dibujado en función de la concentración de manganeso: e.g.: con un contenido de 0.3% de Mn el comportamiento fisicoquímico del sistema se ve alterado y el contenido crítico de O_2 , y el contenido mismo de O_2 en la solución, se reduce de 0.058 a 0.021%. Se puede decir que la formación de aluminatos se incrementará por la presencia de manganeso.

En la figura 1.12, se representa el efecto del manganeso sobre el comportamiento de la desoxidación con aluminio a $1600^\circ C$. La línea No. 1 representa la relación entre el oxígeno y el aluminio en ausencia de manganeso. La línea No. 2 y la No. 3 representan la relación con 0.3% y 1.5% de Mn, respectivamente.

Cuando el producto de desoxidación es alúmina (adición de aluminio con bajos contenidos de O_2), el manganeso no influye en la desoxidación la influencia de la temperatura sobre las reacciones es similar a la que ocurre sobre las reacciones para el sistema Fe-Al-O (Fig. 1.10) e.g. para un contenido de 0.3% Mn, el contenido crítico de oxígeno a $1600^\circ C$ cae de 0.021% a 0.015% a $1565^\circ C$. Estos efectos son similares a la influencia que tiene el manganeso sobre el comportamiento de la desoxidación con silicio.

(8) La formación de aluminatos durante la desoxidación será -

(8) McLean, A., Ward, R.G., cit. por, Rodiles, D.M. op. cit. p. 111

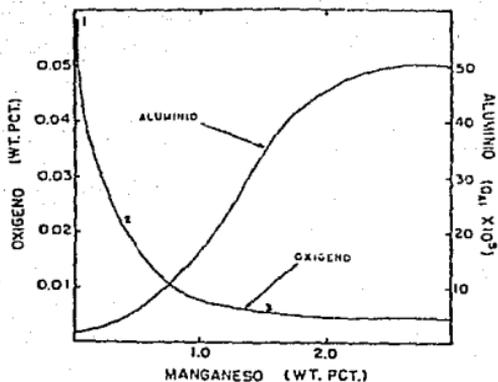


Fig. No. 11. Efecto del manganeso sobre los contenidos de aluminio y oxígeno en el acero líquido en equilibrio con alúmina y aluminatos a 1600°C.

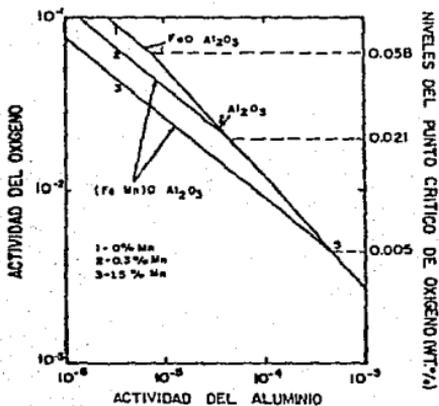


Fig. No. 12. Efecto del manganeso sobre el comportamiento de la desoxidación con aluminio (1500°C)

mínima si el acero está en turbulencia y se agita al tiempo de adicionar el aluminio.

La clase de inclusiones formadas depende de la práctica de desoxidación. Las inclusiones de alumina aparecen como grupos o "clusters" pequeños, de forma irregular o parcialmente aglomeradas de apariencia grisácea, duros y a veces vítreos atrapados entre las dendritas ó extendidos en la matriz. Si el aluminio se adiciona acero desoxidante inicial, las inclusiones serán del tipo $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ que en su mayoría logran salir del baño produciendo una mínima cantidad de grupos o clusters.

Al desoxidar en la cuchara con elementos diversos (Mn, Al, Si, etc.), se llegan a formar silicatos líquidos de manganeso y aluminio más estables y con mayor tendencia a quedar como inclusiones.

En la colada continua, cuando el acero tiene una caída de temperatura entre la cuchara y el molde de alrededor de 100°C (e.g.: $1625\text{-}1525^\circ\text{C}$), la cantidad de O_2 disuelto en equilibrio con Mn y Si se reduce bruscamente como se ejemplifica en la tabla 1.1.

Ahora bien, el O_2 en exceso podrá reaccionar más adelante con el Mn y el Si para formar escoria o con el carbono para formar sopladuras o "pinholes".

Para disminuir los efectos nocivos de la reoxidación (efecto del oxígeno del aire sobre el acero líquido desde el vaciado del horno hasta su salida del molde en colada continua) es recomendable que la diferencia de temperatura del acero en la cuchara y el acero del molde, sea lo menor posible; ello también disminuye la formación de otros defectos, tales como grietas por esfuerzo, segregaciones y porosidades en el núcleo de la pa--lanquilla. Sin embargo, la temperatura del acero en la cuchara está determinada por la capacidad de las instalaciones de la colada continua y muchas veces se requieren tiempos largos de colada y, por lo tanto, alta temperatura del acero en la cuchara aumentando así el gradiente mencionado; por lo tanto, en estos casos, se recomienda utilizar distribuidores fríos con buenas características de aislamiento o distribuidores muy calientes.

	OXIGENO EN EQUILIBRIO, %e			ESCORIA (MnO + SiO ₂) CORRESPONDIENTE A ΔO Kg/Tn. ACERO
	1625 °C (OLLA)	1525 °C (HOLDE)	A 0%	
ACERO FUNDIDO CON				
0.10% Si + 0.40% Mn	0.0118	0.0080	0.0038	0.25
0.25% Si + 0.50% Mn	0.0090	0.0048	0.0045	0.20

Tabla No.11 Oxígeno en equilibrio con el manganeso y silicio como función de la temperatura.

(9) Pruebas de operación han demostrado que una baja relación Mn/Si (escaso manganeso), produce precipitados que se acumulan en las boquillas del distribuidor bloqueándolas y obligando a suspender las coladas(10).

(11) La relación Mn/Si incide directamente en la relación MnO/SiO₂ en la escoria producida: al disminuir aquélla en el acero, aumenta el silicio en la escoria, así como su punto de fusión, tensión superficial y viscosidad. Así, los silicatos de Mn saturados con sílice o silicatos sólidos pueden tapar las boquillas del distribuidor en forma análoga a la ocasionada por la alúmina.

Los resultados indicaron que una relación entre 3:1 y 4:1 es adecuada, aunque el valor específico en ese rango dependerá del contenido de Mn para cada caso, además de la especificación química para Si y Mn en el acero producido.

1.3. MECANISMO DEL BLOQUEO EN ACEROS DESOXIDADOS CON ALUMINIO.

Como se ha indicado, y como se revisará posteriormente, cuando un acero desoxidado con aluminio es colado a través de una boquilla en la unidad de colada continua, la velocidad de operación decrece considerablemente debido a la acumulación de óxidos de aluminio en los bordes de la boquilla. También se ha mencionado que en el vaciado de lingotes (lingoteo), la acumulación es menos problemática pues el diámetro de la buza es mayor y se puede efectuar la limpieza de ésta con el empleo de una lanza de oxígeno mientras que en la colada continua gran parte de las veces conduce a la paralización total del sistema, por lo que la solución total del problema, -- conduciría a evitar grandes pérdidas en la industria acerera.

Diversos trabajos publicados en la década de los 60's, proponían varias hipótesis con respecto al posible mecanismo imperante en el fenómeno del bloqueo al colar aceros con aluminio, las cuales podrían ser resumidas en los siguientes puntos (12):

(9) Holden, C., et.al. cit. por, Rodiles. D.M. op.cit. p. 111

(10) Cfr., Rodiles, D.M., op. cit., p. 111

(11) Elsgner, E., et.al. cit. por., Rodiles D.M., op.cit. p. 111

(12) Vid: SAKENA, S.K. et.al. "Mechanism of Clogging..." op.cit. p. 111

- 1) Las partículas de óxido que aparecen en el material que obstruye la boquilla son, de hecho, productos de desoxidación que permanecieron en suspensión en el acero en la cuchara y fueron a depositarse en la boquilla durante el paso del líquido a través de ella.
- 2) La obstrucción de las boquillas ocurre debido a las reacciones químicas entre el aluminio disuelto en el acero y los componentes reducibles del refractario de la boquilla (en especial SiO_2 y óxidos de Fe), cuando el fluido hace contacto con ella.
- 3) La acumulación se presenta por la reoxidación del acero en contacto con el aire produciendo Al_2O_3 .
- 4) El bloqueo de las boquillas se produce por la precipitación de Al_2O_3 sobre la boquilla debido a la saturación del acero.

1.3.1. PRUEBAS EN PLANTA.

Diversas pruebas a nivel industrial (13), han sido hechas para investigar cuál de los fenómenos mencionados juega un papel dominante en la obstrucción de boquillas. Los experimentos de laboratorio (14), por otro lado han indicado que el aluminio del acero reacciona con la sílice de la boquilla (cuando ésta la contiene) y precipita Al_2O_3 de acuerdo a la reacción:



Así mismo, el depósito de partículas suspendidas en el acero sobre la superficie de la boquilla, ha resultado no jugar un papel importante en el sistema, aunque la cantidad de partículas de alúmina suspendida en las coladas de laboratorio ha sido limitada en comparación con las de una colada industrial, por lo que, para corroborar esto, han sido necesarias pruebas a gran escala (15).

(13) Idem

(14) SAXENA, S.K. et. al, cit. por. SAXENA, S.K. op.cit. p. 111

(15) Cfr., SAXENA, S.K. op.cit., p. 111

Por otro lado se han efectuado pruebas adicionales con vaciados tanto en colada continua como en lingoteras en condiciones especiales a -- fin de obtener buena representatividad en los resultados.

1.3.2. RESULTADOS (15)

La tabla 1.2 y la Fig. 1.13, muestran los resultados de una primer serie de pruebas efectuadas. La figura también muestra las curvas nomales de flujo para aceros desoxidados con silicio y para aceros desoxidados con aluminio, ambos colados a través de boquillas de silicato de zirconio. Como puede apreciarse, las cargas desoxidadas con aluminio mas CaBaSi fluyen libremente a través de las boquillas V99 (99% Al_2O_3 , 1% SiO_2) -- sin causar acumulación. Las curvas de flujo son idénticas a las obtenidas con aceros desoxidados con silicio, sin indicar ninguna reacción química -- entre el acero líquido y el refractario de la boquilla, ni ningún depósito apreciable de inclusiones en sus bordes dado su contenido de alúmina (Al_2O_3). Tampoco se han obtenido segregados sólidos de tipo de la galaxita -- ($MnO.Al_2O_3$), la cual se adhiere fácilmente a la superficie refractaria. -- Por otro lado los exámenes sí han indicado la presencia de aluminatos de -- calcio (precipitados líquidos a las temperaturas de operación), explicando el porqué de la apariencia de las boquillas tan cercana a la original, des--pués de la operación, mientras que la boquilla de arcilla calcinada de la cuchara sí ha mostrado pesados depósitos de Al_2O_3 , en especial puede verse esto en la carga N^o 5, en la que la buza o boquilla de la cuchara se --obstruye prácticamente antes de finalizar el vaciado. La razón posible de ello, es que el contenido de SiO_2 libre de la arcilla calcinada, reacciona con el aluminio del acero para producir los depósitos.

Como se aprecia en la Fig. 1.13, la curva N^o 2 se tiende consi--derablemente más abajo que la curva de flujo para el acero desoxidado con Al más CaBaSi. El estudio mostró que la diferencia está en el depósito -- de Al_2O_3 en el segundo caso, mostrando en forma clara su papel en el siste--ma.

El análisis comparativo de las curvas 2 y 4 ejemplifican muy -- bien el papel que juega la reacción química en el bloqueo de la boquilla. Ambas cargas contienen Al_2O_3 en suspensión, pero fueron vaciadas a través de boquillas diferentes.

LM+ Inclusiones de aluminato de bajo punto de fusión conteniendo alrededor de 42-47% CaO. HM++ Inclusiones de corundum de alto punto de fusión. HM+++ Inclusiones de aluminato de calcio de alto punto de fusión conteniendo 15% CaO V99 = 99% Al₂O₃ y 1% SiO₂.

TABLA 1.2

Carga No.	SiCaBa adición (Kg/100n)	Análisis del acero en la olla								Tipo de inclus.	Boquilla del distrib.	Temp. de vaciado (°C)	Observaciones
		XC	XSi	XMn	XCr	XMo	XV	XAl	sol.				
1	5	0.35	0.25	0.70	1.40	0.20	-	-	0.040	LM+	V99	1620	Excelente. Sin acumulación
2	4	0.81	0.47	2.30	0.17	-	-	0.19	0.025	LM+	V99	1600	Excelente. Sin acumulación
3	0	0.78	0.34	2.10	0.20	-	-	0.17	0.022	HM++	V99	1595	Regular. Boquilla obstruída alrededor de un 50%
4	0	0.80	0.47	2.10	0.20	-	-	0.19	0.040	HM++	Silicato de Zr	1600	Malo. Boquilla obstruída (carga de referencia)
5	4	0.32	0.42	0.91	1.15	0.27	-	-	0.045	LM+	V99	1620	Excelente en distrib. pero obstrucción en la boquilla de la olla
6	4	0.33	0.28	0.84	1.15	0.20	-	-	0.026	HM+++	V99	1635	Regular. Boquilla del distribuidor obstruída alrededor de un 50%.
7	4	0.34	0.40	0.90	1.15	0.28	-	-	0.027	LM+	V99	1620	Excelente. Sin acumulación
8	4	0.27	0.50	1.70	0.11	0.16	-	-	0.060	LM+	V99	1600	Excelente. Sin acumulación
9	4	0.28	0.38	1.70	0.26	0.19	-	-	0.045	LM+	V99	1600	Boquilla del distribuidor con bloqueo

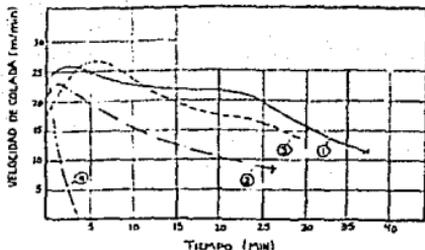


FIG. 113. Curvas de Velocidad de Colada vs. Tiempo para aceros desoxidados con Si, Al y Al+CaBaSi respectivamente. 1: _____ Acero desoxidado con Al+CaBaSi con boquilla de 99% Al_2O_3 . 2: _____ Acero desoxidado con Al con boquilla de 99% Al_2O_3 . 3: - - - - Acero desoxidado con Si (carga de referencia) con boquilla de Silicato de Zr. 4: - . - . Acero desoxidado con Al (carga de referencia) con boquilla de Silicato de Zr.

La curva No. 2 se encuentra apreciablemente más arriba que la curva No. 4, ya que en este caso aparte del depósito de alúmina, tiene una agtiva influencia la reacción química.

Los resultados de una serie adicional de experimentos se resumen en la tabla No. 1.3. En este caso, aún cuando las cargas fueron desoxidadas con aluminio más calciosilicio (vaciado en lingoteras), se obtuvo una cantidad apreciable de óxidos depositados tanto en las boquillas de mullita^(*) como en las V99, o sea, inclusiones del tipo de las de alto punto de fusión o viscosas, con una alta concentración de Al_2O_3 ; mientras que en la buza de la cuchara si aparecieron los aluminatos de calcio de bajo punto de fusión con 41-46% CaO y 52-58% Al_2O_3 . Esto quizás se haya debido a que durante su vaciado de la tina al distribuidor, se oxidó el acero con el aire elevando el contenido de Al_2O_3 en las inclusiones y haciéndolas más adheribles al refractario. Estas inclusiones llegan a ser más perjudiciales que las resultantes de la desoxidación con aluminio pues, dependiendo de su concentración, llegan a obturar las boquillas hasta en 9 minutos, - siendo este tiempo más prolongado en el caso de dichos aceros tratados con aluminio.

La hipótesis de la reoxidación con el aire parece confirmarse con el hallazgo de partículas de óxido de tamaño mayor a los 200 μ , que no son comunes en los depósitos de la práctica usual. El efecto perjudicial de estas inclusiones de aluminato de calcio viscosas o parcialmente sólidas, en el bloqueo de las boquillas, es confirmado por otros autores (16), quienes indican que las aleaciones de Al-Si y Fe-Si que contienen calcio son más peligrosas y difíciles de colar que aquellas que no lo contienen. Como veremos en la siguiente sección, este problema puede ser manejable.

Interesante resultó la observación de que la boquilla de mullita, a pesar de su contenido de SiO_2 , no mostró acumulación (quizás debido a que su fase de silicato de aluminio no reaccionó con el aluminio del acero líquido), a diferencia del caso de la buza de arcilla calcinada de la cuchara que, al igual que en las pruebas de laboratorio y en las primeras pruebas industriales, mostró depósitos pesados resultado de la reacción de su fase pura de sílice con el aluminio.

(*) $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$

(16) Onishi, T., Mitsushima, S., et al. "Effect of deoxidation.", cit. por Saxena, S.K., op. cit., p. 111

LM+ Inclusiones de aluminato de calcio de bajo punto de fusión conteniendo 41-47% CaO y 51-54% Al₂O₃. HM++ Inclusiones de corundum de alto punto de fusión. HM+++ Inclusiones de aluminato de calcio de alto punto de fusión y/o viscosas conteniendo 22-37% CaO y 63-78% Al₂O₃. TABLA 1-3

Carga No.	Análisis del acero					Temperatura de vaciado (°C)	Tipo de inclusión	Tipo y No. de hoquilla del distribuidor	Vaciado de através de Aire/N ₂	Desarrollo de la colada	Acumulación de óxidos	
	CaSi (K _g /Ton)	%C ₂ 10 ²	%Si 10 ²	%Mn 10 ²	%S ₂ 10 ³							%Al 10 ³
Ensayos típicos en Lingoteo:												
X8926	1.35	15	32	76	11	60	1620	HM++	V99 Mullita 2	Aire Aire	Pobre Pobre	Boquilla obstruída Boquilla obstruída
X9267	1.95	18	37	77	7	54	1585	LM+	V99 Mullita 2	N ₂ N ₂	Buena Buena	Sin acumulación Sin acumulación
Ensayos en Máquina de Colada Continua:												
J2408	1.20	13	29	64	10	40	1612	LM+	Silicato Zr 1 Silicato Zr 2 V99 3 Silicato Zr 4	N ₂ N ₂ N ₂ N ₂	Excelente Excelente Excelente Excelente	Sin acumulación Sin acumulación Sin acumulación Sin acumulación
J091	2.00	18	36	64	12	11	1625	LM+	Silicato Zr 1 Silicato Zr 2 V99 3 Silicato Zr 4	N ₂ N ₂ N ₂ N ₂	Excelente Excelente Excelente Excelente	Sin acumulación Sin acumulación Sin acumulación Sin acumulación
V9589*	-	14	47	135	8	35	1630	HM++	Boquilla de mullita sobre dimensionada	Aire	Malo	Boquilla obstruída dentro de los primeros 45 min.
X5109*	1.20	15	26	123	20	40	1620	HM+++	Boquilla de mullita sobre dimensionada	Aire	Pobre	Boquilla obstruída dentro de los primeros 25 min.

*Cargas de referencia.

Pruebas en la máquina de colada continua. Al igual que en el vaciado en lingoteras, cuando el acero desoxidado con aluminio y tratado con CaSi fue vaciado a través de la atmósfera protectora de nitrógeno a través de las boquillas V99 o de las de silicato de zirconio, no se presentó obturación de las mismas.

El hecho de que la boquilla de silicato de zirconio no se obstruyera indica que el efecto de la reacción química entre el aluminio disuelto y el refractario de la misma, en unidades de colada mayores, con boquillas amplias, no es tan crítico como en las pequeñas unidades con boquillas de menor diámetro.

La Fig. 1.14, muestra las curvas de flujo para aceros tratados con diferentes desoxidantes y vaciados en colada continua a través de diferentes tamaños y tipos de boquilla del distribuidor. Como era de esperarse, la boquilla V99 (Curva No. 1) mantuvo una relativamente constante velocidad de colada durante toda la operación. La boquilla de silicato de zirconio (Curva No. 2) aunque dió en ocasiones un flujo inestable probablemente debido a la limitada reacción química, tampoco obstruyó el flujo del acero, es decir, esta boquilla mostró una ligera tendencia a la acumulación de óxido, pero, una vez limpiada con el tubo de oxígeno, mantuvo un flujo virtualmente constante. Por otro lado, la boquilla de manilla sobredimensionada (de mayor tamaño a la del diseño correspondiente a la máquina o, simplemente, correspondiente a una unidad grande) durante el vaciado de la carga V9589 (Curva No. 4) llegó a obstruirse completamente a los 40 minutos debido a que esta carga fue desoxidada con aluminio solamente, originando inclusiones sólidas de Al_2O_3 . Parece obvio establecer que la causa del bloqueo es el depósito de dichas inclusiones sobre los bordes de la boquilla. Esto apoya nuevamente el hecho de que en las grandes unidades de colada (boquillas de diámetro grande) el proceso de bloqueo está controlado por el depósito de alumina.

Incidentalmente, la carga X5109 (Curva No. 5) volvió a mostrar la evidencia industrial que se presentó en los experimentos de vaciado en lingoteras. La carga fue tratada con la inyección de 1.2 Kg de CaSi por ton en la cuchara; sin embargo, fueron encontradas en el distribuidor inclusiones de aluminato de calcio viscosas o de alto punto de fusión.

- 1 Carga J2408 con boquilla V99
- 2 Carga J2408 con boquilla de Silicato de Zr
- 3 Acero calado con Si con boquilla de Silicato de Zr
- 4 Carga V9589 (boquilla del distribuidor sobredimensionada)
- 5 Carga X5109 (boquilla del distribuidor sobredimensionada)

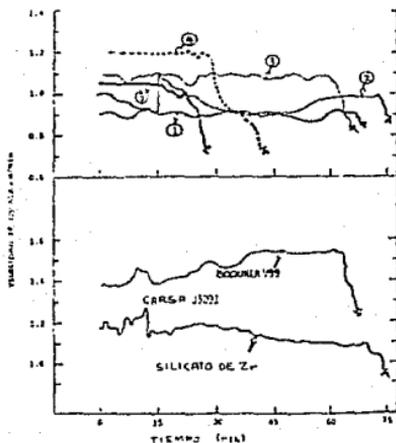


Fig. 1.14. Curvas de Velocidad de Colada vs. Tiempo de aceros deoxidados con diferentes desoxidantes y colados a través de diferentes boquillas.

Ello dió como resultado que durante el vaciado a través de la boquilla sobredimensionada de mullita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), se llegara a su bloqueo completo en 25 minutos, siendo que con el depósito de Al_2O_3 (curva Nº 4) el bloqueo se completó hasta los 40 minutos, (15' más tarde). Las inclusiones de aluminatos resultaron con un tamaño del orden de 150 a 200 μ , comparadas con el tamaño de los grupos de pequeñas inclusiones de alúmina. Estos hechos vuelven a corroborar que la obstrucción de las boquillas en este tipo de aceros está controlado principalmente por el depósito de inclusiones sobre ellas siendo factible eliminar el problema transformando las inclusiones de Al_2O_3 a inclusiones de aluminato de calcio realmente líquidas con un contenido de 42 a 46% de CaO y 50 a 55% de Al_2O_3 . Ello puede reforzarse, aislando el chorro de acero de la cuchara al distribuidor de la reoxidación con el aire pues la absorción de O_2 provoca cambios en las inclusiones de desoxidación primaria haciéndolas sólidas o viscosas a las temperaturas de operación.

1.4. INFLUENCIA DEL CALCIO.

Se ha indicado (17) que las adiciones de calcio producen modificaciones en las inclusiones resultantes de la desoxidación de aceros con aluminio. Algunos investigadores han estudiado el efecto que tiene el incrementar las cantidades de calcio sobre las propiedades de flujo de estos aceros partiendo de la premisa de que el calcio establece la identidad de las fases producidas y, en consecuencia, regula el flujo de acero a través de las boquillas. Además, éstas investigaciones han buscado verificar la hipótesis de que la obstrucción de boquillas de los aceros tratados con Al pudiera prevenirse mediante la adición de calcio.

Debido a que existe una íntima relación entre la práctica de desoxidación y el bloqueo de las boquillas, se ha hecho necesaria la caracterización de las inclusiones endógenas para completar los estudios y verificar el mecanismo del bloqueo.

(17) Farrell, J.W., and Hilty, D.C., op. cit., p. 110

1.4.1. RESULTADOS. (18)

Las composiciones de las cargas se engloban en la tabla 1.4. Se han mantenido constantes la mayoría de las variables tales como: geometría de la boquilla, patrón de flujo, velocidad, temperatura, etc., con objeto de tener una sola variable independiente: la práctica de desoxidación, -- siendo una medida del grado de obstrucción de la boquilla el peso de -- los lingotes obtenidos. La Fig. 1.15, ilustra esta relación mediante la gráfica del peso de los lingotes contra la relación $\{Ca/Al\}$ en el distribuidor.

Con respecto a la caracterización de las inclusiones, en la mayoría de las coladas se encontraron íntimamente asociadas en mezclas de dos fases de aluminato de calcio y las cantidades relativas de cada fase en estas inclusiones duplex variaron dentro de límites muy estrechos; sin embargo, la identidad de las fases no cambió.

Estudios previos (19) habían indicado que los cambios abruptos -- en el peso de los lingotes, Fig. 1.15, deberían estar relacionados con la identidad de las fases de las inclusiones endógenas. Para verificarlo, -- fueron identificadas y estimadas las cantidades de las fases de aluminato de calcio en las inclusiones. Además, la presencia simultánea de calcio y azufre establecieron la presencia de CaS . En la Fig. 1.16, los resultados están sobrepuestos sobre la gráfica previamente mostrada en la Fig. 1.15. Como era de esperarse, siempre que se tenía un cambio brusco en el peso de los lingotes, se tenía un correspondiente cambio en el tipo de fase que se encontraba en mayor cantidad en las inclusiones endógenas, reafirmando su influencia en el bloqueo de las boquillas. Los datos obtenidos durante el estudio se resumen en la tabla 1.5.

1.4.2. COMENTARIOS

De los datos graficados en la Fig. 1.17, podemos apreciar que -- cuando el flujo se vió incrementado, hubo un correspondiente incremento en

(18) Cfr., Faulring, G.M., Farrel and Hilty, op.cit., p. 110

(19) Vid., idem.

TABLA 1.4 Rangos Composicionales de las cargas experimentales

Z S	Z C	Z Mn	Z Si
0.017 - 0.021	0.31 - 0.44	0.68 - 0.91	0.19 - 0.36
0.023 - 0.028	0.32 - 0.46	0.75 - 0.92	0.32 - 0.46

TABLA 1.5 Resumen de Datos

ZCa:ZAl (distribuidor)	Peso lingote (Kg)	Tiempo* (segundos)	"Obstrucción-Drene" de la boquilla	Identificación de inclusiones Cantidad relativa**	
				Incremento	Decremento
0 - 0.007	40	190	Obstrucción	Al ₂ O ₃	
0.0070 - 0.0085	40 - 14	190 - 60	Obstrucción	CaO.6Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
0.0085 - 0.10	14	60	Obstrucción	CaO.6Al ₂ O ₃	
0.10 - 0.13	14 - 127	60 - 390	Obstrucción-Drene	CaO.2Al ₂ O ₃	CaO.6Al ₂ O ₃
0.13 - 0.14	127 - 136	390 - 460	Obstrucción-Drene	CaO.2Al ₂ O ₃	
0.14 - 0.28	133 - 136	360 - 270	Drene	CaO.Al ₂ O ₃ +CaS	CaO.2Al ₂ O ₃

*Los tiempos para colar 136 kg de acero desoxidado con Si-Mn. . . 270-290 seg.

**El incremento y/o decremento en las cantidades relativas de las fases de las inclusiones identificadas corresponde al incremento indicado en la relación ZCa:ZAl.

1
35
1

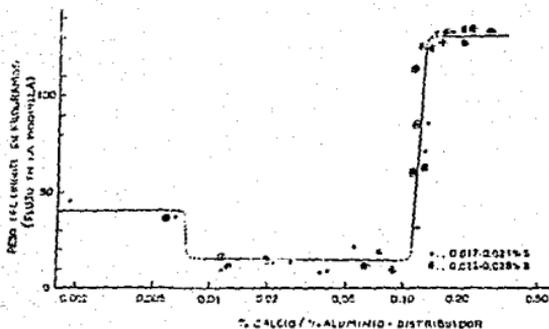


Fig.1.15. Efecto del Calcio sobre el flujo de aceros desoxidados con Aluminio a través de las boquillas.

la cantidad relativa de Ca en la fase aluminato enfatizando el efecto de la composición de la inclusión sobre el flujo de los aceros. En otras palabras para un dado contenido de aluminio, la cantidad de calcio en estos aceros, determinó el flujo. Sin embargo, y esto es importante, la carta de esta figura no refleja el efecto que la adición de calcio tiene sobre el bloqueo de la boquilla, esto es, no nos indica e.g. que cuando pequeñas cantidades de Ca son adicionadas al acero tratado con Al, el bloqueo se incrementa. Por ejemplo, con una baja relación $\%Ca/\%Al$ en el distribuidor, menor de 0.115, el acero fluye en forma rápida pero sólo por un corto tiempo. Los pesos de los lingotes y los tiempos de colada disminuyen, y estos últimos, frecuentemente en mayor grado. O sea, el acero fluye rápido pero los lingotes pesan menos que cuando se vuelan aceros libres de Ca tratados con Al, por ello es importante la relación entre las características de la inclusión y el peso de los lingotes en lugar del flujo de acero y haciendo énfasis en la cantidad, morfología e identidad de dichas inclusiones endógenas sobre el bloqueo, propiedades todas relacionadas directamente con la práctica de desoxidación.

Cuando la relación $\%Ca/\%Al$ en el distribuidor se incrementó desde 0.0070 hasta 0.0085, el precipitado de Al_2O_3 fué gradualmente reemplazado por la fase $CaO.6Al_2O_3$. El tiempo de flujo disminuyó desde 205 hasta 34 segundos y el peso del lingote desde un máximo de 45 Kg hasta un mínimo de 9 Kg (20). Como se indica en la Fig. 1.15, éste severo bloqueo continuó hasta que la relación excedió de 0.10, siendo consistentemente más pobre que en los aceros desoxidados con Al y libres de Ca. El peso promedio del lingote obtenido para este rango fué de 13.6 Kg (el 10% de la carga total del horno), con flujo rápido y corta duración, así como con cantidades relativas de Ca y Al en el precipitado de las boquillas, características de la fase $CaO.6Al_2O_3$, la cual origina grupos muy cohesivos. Su alta temperatura de solidificación como la de la alúmina, 1850°C y 2050°C, respectivamente, aseguran que dichas fases obstruirán las boquillas.

Continuando con el análisis de la curva, cuando la relación sobrerasa de 0.10 hasta 0.14, el bloqueo severo se elimina y si excede de 0.14, El acero fluye totalmente hasta drenar el distribuidor. Para un da-

(20) Como dato adicional es interesante mencionar que existe un incremento de volumen del 14% cuando la Al_2O_3 cambia a $CaO.6Al_2O_3$.

do contenido de Al, este intervalo de la relación es equivalente a un incremento de menos de 1.5 veces en la cantidad de calcio. Por ejemplo, para uno de los aceros 1038 con 0.039% Al y 40ppm de Ca, la boquilla se tapó dando un lingote de aproximadamente 32Kg., pero cuando el calcio llegó hasta 70ppm, el distribuidor se vació totalmente dando un lingote de casi 136 Kg. En el primer caso se obtuvieron inclusiones de $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, y en el segundo caso de $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ en los lingotes colados.

Los precipitados obtenidos en los aceros con relación Ca/Al entre 0.10 y 0.13 se encontraron asociados en una mezcla de $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$. Basados en una correlación entre los pesos de lingote y las cantidades estimadas de $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ en los precipitados, se concluyó que la severidad del bloqueo disminuye cuando la cantidad de ésta fase también disminuye.

Con relaciones entre 0.13 y 0.14, se obtuvieron lingotes desde 127 hasta 134 Kg permaneciendo el restante acero en el distribuidor por no tener ya una carga ferrostática suficiente para evacuarlo. Con respecto a la fase $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, se esperaba que tuviese un efecto más severo en la obstrucción dado que en anteriores estudios (21), cuando esta fase se forma en estado puro en un sistema tricomponeente Ca-Al-O, bajo condiciones de enfriamiento en equilibrio resulta sólido a las temperaturas de aceración. Sin embargo, éste estudio estableció que cuando se da en un sistema multicomponente bajo condiciones de aceración precipita como semisólido, casi líquido, de forma esférica, con un efecto mínimo en el queo.

Cuando la relación se incrementó desde 0.14 hasta 0.28, por ejemplo: 0.045%Al y 61 ppm Ca, no sólo no hubo bloqueo, sino que el tiempo requerido para colar los 136 Kg disminuyó, siendo comparable al colado de aceros tratados con Si'n cuando la relación sobrepasó de 0.22. Ello concuerda con la práctica industrial. Las únicas fases detectadas en este caso fueron del tipo $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Esta última ya apareció cuando la relación fué mayor a 0.15.

(21) Vid., Faulring, G.M. "Precipitation Diagram of the . . ." cit. por. - Farrell, J.W., and Hilty, D.C., op. cit. p. 110

1.4.3. EFECTO DEL MAGNESIO

Contrariamente a lo esperado, una de las cargas con un contenido de 80 ppm de Ca y 0.047% de Al, es decir $\%Ca/\%Al = 0.19$, bloqueó la boquilla en forma prematura dando un lingote de 76 kg en un tiempo de 300 seg. El precipitado encontrado en la boquilla consistió en pequeños volúmenes de CaS dispersos en una matriz de $MgO \cdot Al_2O_3$ (espinela), indicando que la carga se contaminó con magnesio reducible del crisol del horno. Análisis subsiguientes del acero remanente en el distribuidor indicaron un contenido mayor de 6 ppm de Mg; una cantidad suficiente para formar $MgO \cdot Al_2O_3$ en los aceros tratados con Al y debido a la temperatura de solidificación de esta espinela, 2135°C, la obstrucción de boquillas se produce aún en aceros ricos en calcio.

1.5. EL DISEÑO DE LA BOQUILLA

Sabemos ya que la alúmina se acumula como polvo fino en la boquilla (Fig. 1.18) y que provoca una rápida caída en la velocidad de colada - hasta el bloqueo completo. Ello afecta la productividad y la calidad del producto. Por ejemplo, en la boquilla de 13 mm la acumulación se inicia - si el contenido de Al se incrementa hasta 0.005%. Con 0.008% el bloqueo es completo. El tiempo necesario para que este se complete disminuye drásticamente al aumentar el $\%Al$; por ejemplo, con 0.036% el bloqueo de dicha boquilla de 13 mm se efectúa en los primeros 4 minutos de iniciada la colada. Con el empleo de boquillas de mayor tamaño se reduce el problema, pero no se elimina, por ejemplo: con boquillas de 51 mm y un contenido de - Al entre 0.03 y 0.06%, la velocidad de colada empieza a disminuir en 1/2 hora y con boquillas de 32 mm cae severamente en 20 minutos.

El problema se ha intentado resolver por varios métodos, incluyen do la alimentación de alambre de Al al molde y/o la sustitución de Al por vanadio o columbio en la desoxidación. Estos métodos no dan muchas veces los resultados y la calidad deseada y no son aplicables en muchos productos, por lo que se continúa buscando eliminar el problema de raíz.

La teoría indica que la velocidad del fluido en contacto con la boquilla es prácticamente cero y que las partículas de alúmina en su paso por la superficie de ella tienden a adherirse para disminuir su energía in

terfacial de contacto con el acero líquido. Las corrientes de remolinos en y cerca de dicha superficie de la boquilla fomentan su colisión y coalescencia con su consecuente sinterización y la obstrucción al fluido.

Como se ha visto, al ser la acumulación un problema físico que se inicia por el contacto boquilla-acero, y no un problema químico, se han sugerido cambios en las condiciones de flujo en las boquillas para evitar dicho contacto en su parte interna que es en donde se lleva a cabo el estrangulamiento del fluido:

10. Estableciendo una película gaseosa (gas inerte) entre el metal y el refractario (boquillas porosas).
20. Modificando en sí las características de flujo.

El primer método, sin embargo, a menudo provoca chorros muy delgados de acero y/o se tienen problemas con la alimentación externa del gas.

El segundo método se ha extendido mucho en los E.U. y ha dado lugar a las "boquillas anulares".

1.5.1. LA BOQUILLA ANULAR

A continuación hablaremos brevemente respecto a las características de este tipo de boquilla y sobre los resultados de algunas pruebas efectuadas a nivel industrial en varias compañías de los E.U. (22).

Considérese el esquema de la Fig. 1.19 en el que se ilustra el paso de un fluido a través de un ducto u orificio que presenta un cambio súbito de sección de un diámetro D a otro d . La superficie del chorro se "dobla" en un arco de 90° al pasar hacia el orificio pequeño. El hecho es que, en realidad, el fluido en estas condiciones no es capaz de cambiar de dirección de esa manera en forma instantánea, por lo que adopta el perfil mostrado en la figura 1.20; se dice que se "contrae". La sección de la máxima contracción se denomina "vena contracta". La relación entre la sección transversal A_c en la vena contracta y el área transversal del orificio, se llama coeficiente de contracción C_c , por lo tanto:

(22) Cfr. Singh, S.N., "A practical solution to ..." op. cit. p. 111

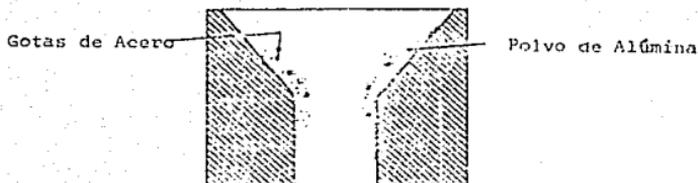


FIG.118. Típica sección transversal de una boquilla de distribuidor mostrando las regiones donde generalmente se deposita el polvo de alúmina.

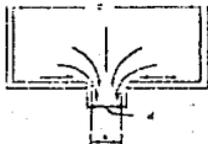


FIG.119. Esquema que ilustra la "vena contracta" obtenida cuando se presenta un cambio repentino en el tamaño de un orificio.



FIG.120. Esquema que muestra el contacto posterior entre el chorro y el orificio a una cierta distancia abajo de éste.

$$A_c = C_c A$$

El valor más pequeño de C_c es cuando se presenta la mayor contracción. Su valor para una sección transversal disminuye cuando:

- 1) Aumenta la presión del fluido en la parte de arriba.
- 2) Disminuye la relación d/D , y,
- 3) Disminuye el radio de la esquina de arriba del orificio.

Asimismo, varía cuando las condiciones de flujo corriente arriba del orificio cambian.

Experimentalmente se ha observado que la distancia sobre el orificio, en la cual se pierde el contacto con la pared de éste y la superficie del chorro es del orden de $2d$.

Estos conceptos de flujo de fluidos fueron empleados en el diseño de la boquilla anular consistente de 2 secciones cilíndricas separadas por un delgado anillo que sirve como orificio "contractor" (Fig. 1.21). Las características básicas de este tipo de boquillas son:

- 1) El orificio delgado no absorbe calor del acero en forma rápida por lo que las pérdidas de calor, que podrían acelerar la acumulación de precipitados, se evita en gran parte.
- 2) El mayor diámetro del cilindro superior provoca una vena contracta efectiva.
- 3) El cilindro superior, por su mayor diámetro, proporciona espacio para la acumulación de algina en zonas donde las condiciones del flujo no se ven afectadas, además de amortiguar las condiciones turbulentas del distribuidor que afectan el flujo en la boquilla, por ejemplo: los chorros variables.
- 4) El pequeño diámetro del cilindro inferior proporciona un soporte para el orificio contractor, y su corta longitud evita el segundo contacto de la boquilla con el acero.

La Fig. 1.21, muestra las dimensiones críticas de la boquilla:

- t: Espesor del anillo orificio, que deberá ser el mínimo posible para evitar la formación de costras de acero solidificadas.

- d/D: la relación entre los diámetros de los cilindros inferior y superior. El máximo valor de esta relación se determinó experimentalmente siendo: 0.69. Si se sobrepasa esta relación podría presentarse la contracción. La contracción óptima se obtuvo para 0.30. A mayor contenido de aluminio, la relación deberá ser menor; por ejemplo, para aceros con un contenido de Al superior a 0.05%, la relación deberá ser 0.5 ó menor si es posible. Debido a que d lo fijan las condiciones de operación, D tendrá que maximizarse dentro de las limitaciones dimensionales de la boquilla.
- H: altura de la cámara superior. Su mínimo valor recomendado es D/3 para asegurar que los efectos turbulentos del distribuidor no afecten al flujo en la boquilla.
- h: altura de la cámara inferior. Deberá valer 2d para prevenir el contacto entre la pared de la cámara inferior y el chorro de acero.

1.5.2. PRUEBAS EN PLANTA.

Las boquillas han resultado ser más efectivas en la colada de aceros para palanquilla desoxidada con Al, en donde el diámetro del orificio es de 25mm o menos, aunque en la colada de planchones también se obtuvieron ventajas significativas.

La mayoría de las pruebas se han efectuado en máquinas equipadas con un sistema de "intercambio de boquillas durante operación".

La Fig. 1.22 presenta la carta de velocidad de colada para un acero con 0.048% Al colado a través de una boquilla regular de 32mm como la mostrada en la Fig. 1.18 y típica el problema causado por la acumulación de alúmina:

Se mantuvo una velocidad de colada de 1.27m por minuto aprox., durante 20 min, después de lo cual se presentó una caída brusca en dicha velocidad por la acumulación de alúmina en la boquilla. En los siguientes 5 min, cayó desde 1.22 hasta 0.76m/min, con una velocidad aproximada de 0.1m/min/min. Una nueva boquilla regular de 35mm fué colocada en sustitución de la anterior en el mecanismo intercambiador obteniéndose una velocidad promedio uniforme de 1.37m/min durante otros 23 min, pasados los cua

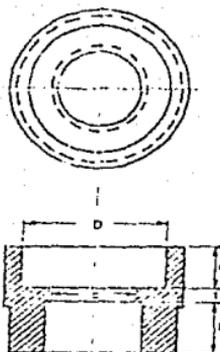


FIG.1.21. Esquema del diseño de una boquilla anular: sólo se indican las dimensiones críticas.

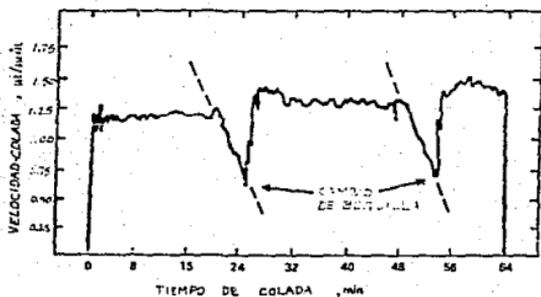


FIG.1.22. Carta de velocidad obtenida al colar un acero con 0.046% Al a través de boquillas regulares.

les empezó a decrecer nuevamente desde 1.37 hasta 0.75m/min , en 5 minutos, requiriendo un nuevo cambio de boquilla. Sería posible completar la operación de las coladas de esta manera con el auxilio del mecanismo intercambiador y con los frecuentes cambios de estas grandes boquillas; sin embargo, - ésto está limitado por el desgaste de la entrada. Esto, junto con el desgaste del revestimiento del distribuidor, es también una limitante del número de coladas que es posible empalmar en forma seguida.

La fig. 1.23 ilustra el efecto del uso de una boquilla anular en la colada de un acero similar al anterior. La boquilla anular se insertó en el lugar de la boquilla regular cuando ésta empezó a bloquearse, a los 4 minutos. Posteriormente, la velocidad de colada se mantuvo virtualmente -- constante durante los siguientes 56 minutos de operación.

Con el fin de comparar el comportamiento de ambas boquillas bajo similares condiciones, una boquilla de cada tipo fué colocada en cada una de las 2 líneas de una máquina para colar 2 cargas de un acero 1006 de bajo silicio desoxidado con aluminio. Sus diseños se muestran en la fig. 1.24. La primera colada, con un contenido de 0.32% Al, se coló a través de una boquilla regular de 35mm en la línea A con una velocidad nominal de colada de 1.39m/min , y de una anular del mismo diámetro en la línea B con una velocidad de 1.32 m/min y un coeficiente de contracción, Cc, de 0.96. La menor velocidad en esta boquilla se debe a la presencia de la vena contracta.

Las cartas de velocidad para las boquillas regular y anular, se muestran en las figuras 1.25 y 1.26. El exámen de las boquillas, después de la colada, mostró acumulación de alúmina en la boquilla regular y no apareció en la anular (23).

La segunda colada fué de un acero 1006 con un contenido de 0.07% Al y se coló a través de 2 líneas A y B dando los siguientes resultados:

Línea A: Boquilla regular de 35mm con una velocidad máxima de -- 1.45m/min y caídas de velocidad de 0.04m/min/min en promedio.

Línea B: boquilla anular de 38mm con una velocidad constante de 1.27m/min.

(23) Vid: Singh, SH., op. cit., p. 111

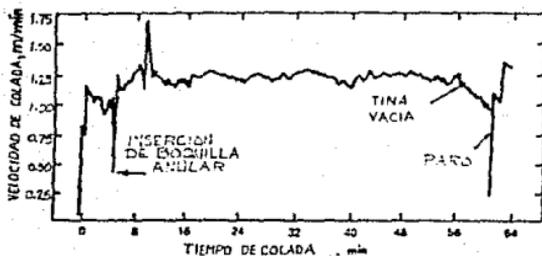


FIG.1.23. Carta de velocidad obtenida al colar un acero con 0.04% Al a través de boquillas anulares .

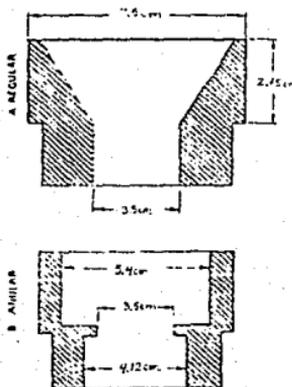


FIG.1.24. Detalles de las dimensiones y del diseño de las boquillas regular y anular respectivamente .

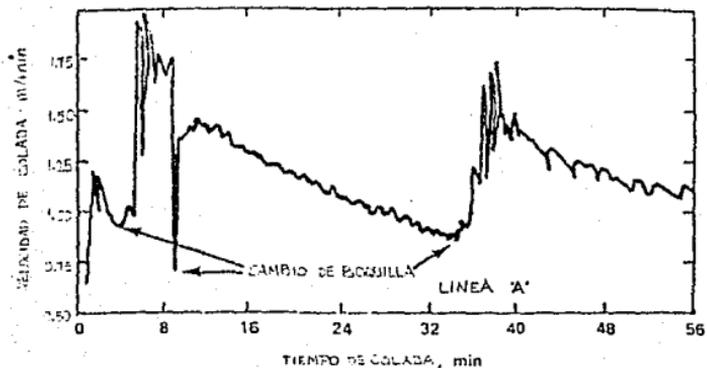


FIG.1.25. Carta de velocidad obtenida para la boquilla regular .
Al = 0.032 %

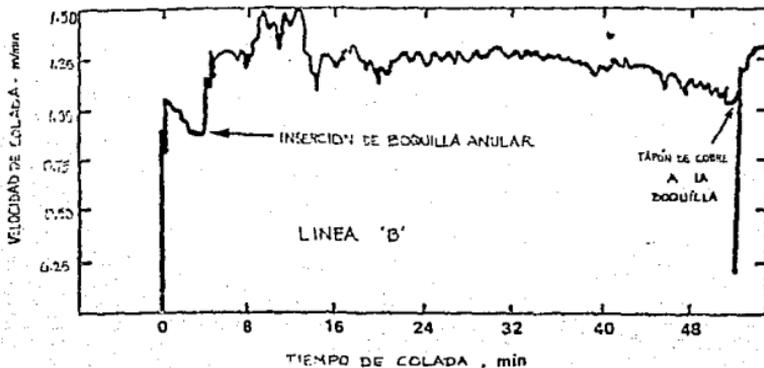


FIG.1.26. Carta de velocidad obtenida para la boquilla anular.
Al = 0.032 %

La velocidad constante de colada con el uso de las boquillas anulares se ha observado en otros numerosos ensayos, colando aceros desoxidados con Al, Si, Cb, Al-B-Ti, y otros. El examen al microscopio de las boquillas anulares después de las coladas también ha mostrado que no se presenta acumulación de alúmina.

1.6 CONTROL DEL ALUMINIO, LA DESOXIDACION Y LA DESULFURACION DEL ACERO PARA COLADA CONTINUA MEDIANTE LA MEDICION DE LA ACTIVIDAD DEL OXIGENO.

En las modernas acerías se están estableciendo estaciones de "tratamiento y metalurgia de cuchara" en las que se miden y determinan parámetros muy importantes como son la temperatura y la actividad del oxígeno en el acero (tan esencial para el control de la obstrucción de boquillas), cada vez con mayor grado de confiabilidad, con el fin de hacerlas más eficientes.

Los últimos años se han caracterizado por la constante investigación para mejorar la calidad de los tradicionales aceros grado carbono así como de los aceros grado especial y por la fuerte tendencia a conseguir un más rápido y mejor control de los procesos de desoxidación hasta llegar a la relativamente reciente "metalurgia fuera del horno".

La aparición de los medidores de actividad de oxígeno del acero líquido con una alta confiabilidad y reproducibilidad han contribuido en buena forma a ello y están haciendo posible tener un control de la desoxidación casi instantáneo. Varios modelos y correlaciones han sido determinados prácticamente para la aplicación de dichos medidores, de los cuales algunos, en forma muy general, presentan la condición siguiente:

El determinador de oxígeno es una celda electroquímica en óxido de zirconio y magnesio "estabilizado" (tubo monolítico) con un electrodo de referencia para O_2 de Cr_2O_3 (sólido) que nos proporciona una FEM en mV, la cual es proporcional a la diferencia entre la presión parcial del oxígeno del baño y la del oxígeno de referencia, y también proporcional a la temperatura del acero líquido, la cual es proporcionada al mismo tiempo por un termopar de platino/platino rodio al 10%.

El determinador es empleado en la estación de tratamiento de la cuchara, la cual está parcial o totalmente equipada con lo siguiente:

- Insuflación de gas (Ar ó N₂) a través de una lanza o de un tapón poroso.
- Alimentación de chatarra.
- Alimentación de aluminio en alambre o en banda.
- Adición de aleantes.
- Inyección de CaSi (Calcio-Silicio)
- Equipo completo para el control del proceso con computadora y --muestreador automático, así como con lanzas de inmersión diseñadas para medir temperatura y actividad del O₂.

1.6.1. CONTROL DE LA DESOXIDACION

A. ACEPOS PARA PALANQUILLAS CALMADOS CON Si-Mn O CON Si-Mn-Al.

Para éste tipo de aceros el equilibrio con el oxígeno puede estar gobernado por el Si y el Mn cuando el contenido de aluminio en el acero es muy bajo o no existe, o por el Al cuando éste se adiciona sólo o en contenido suficiente al principio de la desoxidación. Estos diferentes equilibrios, así como el camino de pasar de uno al otro, se han estudiado en forma práctica y se presentan en la fig. 1.27.

En la colada continua de aceros calmados para palanquillas y planchones con el fin de operar sin problemas (boquillas del distribuidor completamente libres de bloqueo), el empleo del aluminio como desoxidante está limitado precisamente por el diámetro de las boquillas de acuerdo a la siguiente correlación:

$$\log Al = -1.25 + 1.74 \times \log. D \quad (1)$$

En donde:

D = diámetro de la boquilla en mm y

Al = contenido crítico del aluminio soluble en 10⁻³%, para evitar la obstrucción de las boquillas.

Ahora bien, la práctica de desoxidación con Si-Mn y con bajo o poco aluminio (con objeto de no tener el problema del bloqueo mencionado), podría no satisfacer las condiciones del límite máximo de contenido de oxígeno para eliminar el riesgo de la reacción de éste con el carbono del acero en el frente de solidificación, lo cual podría originar sopladuras ó "pinholes", diversos poros u otros defectos en el producto final.

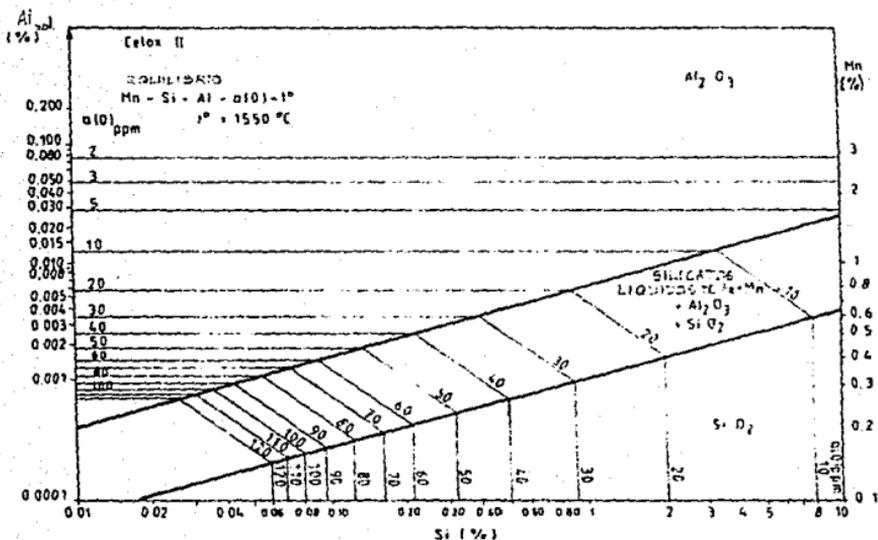


FIG. 1.27. Este modelo está dividido en tres diferentes áreas, dependiendo de cuál o cuales son los elementos que gobiernan el equilibrio con el oxígeno. En la parte inferior se encuentra el área en la que el equilibrio está gobernado sólo por el Si (sin Al y con bajo contenido de Mn) y la formación de la fase SiO_2 . El área central es en donde el equilibrio está controlado por el silicio y el manganeso y en donde se presenta la formación de fases de silicatos líquidos de Fe y Mn. Dependiendo de la cronología de la desoxidación con o sin adición de Al, es posible la formación de SiO_2 , Al_2O_3 o mullita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). En el área superior el equilibrio lo gobierna únicamente el aluminio.

En consecuencia, la medición de la actividad del oxígeno en la es-
tación de tratamiento compararía el nivel existente de oxígeno (fig. 1.27),
con las condiciones dadas en la fig. 1.28, permitiendo así una corrección -
directa de la desoxidación en la cuchara.

La gráfica inferior de la fig. 1.28 nos muestra la relación entre
el C y el O₂ que requerimos para crear condiciones de desoxidación adecua-
das para eliminar el riesgo de defectos superficiales.

La reacción carbono-oxígeno en el frente de solidificación puede
estar influenciada considerablemente por gases como el H₂ y el H₂, los cua-
les reducen la presión parcial del CO libre (normalmente igual a 1 atm). -
La variación de tal presión, se muestra en la gráfica superior de la fig. -
1.28, siendo una función directa de los contenidos solubles de H₂ y H₂.

Como se indicó, el tratamiento en la cuchara brinda la posibili-
dad de corregir la desoxidación y, en consecuencia, el nivel de oxígeno que
generalmente es demasiado alto por el problema de tener que mantener un ni-
vel bajo de aluminio para no arriesgarse a los problemas de obstrucción de
boquillas; la corrección en la adición del aluminio se realiza de acuerdo a
la siguiente correlación:

$$Al = \frac{0.11 (a(O)_m - a(O)_c) Cap.}{NAL}$$

En donde:

Al = adición necesaria del Al en Kg (en forma de alambre o --
banda).

a(O) = actividad del oxígeno en ppm (medidas con el instrumento)

a(O)c = actividad del oxígeno en ppm (calculada de acuerdo al mo-
delo de la fig. 1.28).

Cap. = Capacidad de la cuchara en toneladas métricas.

NAL = Eficiencia promedio en la recuperación del aluminio adi-
cionado en %.

B. ACEROS PARA COLAR POR LINGOTE CALMADOS CON Si O CON Al SOLO.

En este caso el equilibrio con el oxígeno está gobernado sólo por
el Al pues la estructura de grano fino requerido en estos aceros, dadas sus

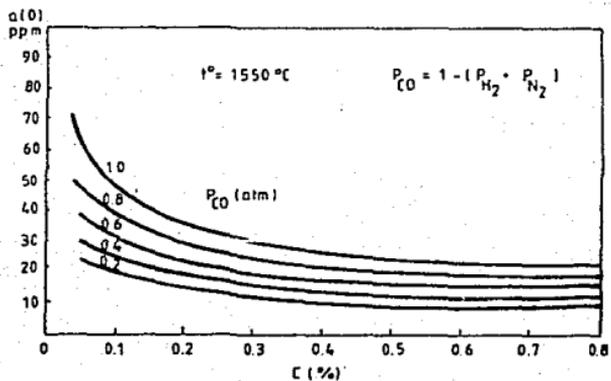
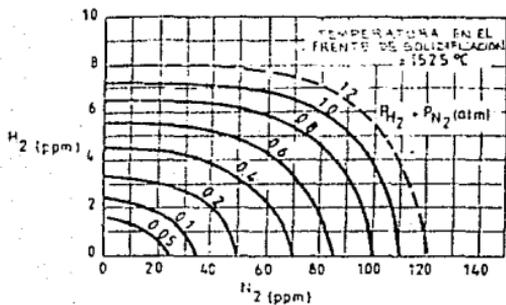


FIG. 1.28.

aplicaciones, exigen contenidos de Al comprendidos entre 0.025 y 0.060%.

Con este análisis de aluminio el nivel de oxígeno dado en la fig. 1.27 es muy bajo, en el rango de 3 a 5 ppm y de esta manera el problema del control de la desoxidación es mucho menor de lo que sería, por ejemplo, el control de la limpieza del acero. El control del análisis del Al se efectúa más fácilmente a través de una simple medición de la actividad del O_2 y la alimentación del aluminio requerido en la cuchara.

1.6.2. CONTROL DEL ANALISIS.

Para los dos tipos de acero mencionados con anterioridad, aceros para colada continua y aceros para lingotes, el principal problema en relación con la desoxidación está en el control del análisis del aluminio soluble.

A. En el caso de los aceros para colada continua desoxidados con Si-Mn-Al se mencionó que el uso del aluminio de la desoxidación está limitado por el diámetro de las boquillas del distribuidor y que existe un nivel crítico de Al soluble arriba del cual es prácticamente imposible evitar la obstrucción de boquillas. Este nivel crítico es bastante bajo para los aceros de colada continua (palanquillas): alrededor de 0.005 a 0.006% de Al soluble. Consecuentemente, es muy difícil controlar en forma rápida dicho nivel con los sistemas convencionales de análisis químico o espectrográfico.

El modelo para control de la desoxidación en la estación de tratamiento de la fig. 1.27 muestra que cuando el aluminio gobierna el proceso es fácil controlar niveles muy bajos de Al soluble a través de la medición de la actividad del O_2 con una alta sensibilidad. Así, realmente una variación en el aluminio soluble entre 0.001 y 0.006% corresponde a una variación en el contenido de O_2 (a 1550°C) de 60 ppm (entre 80 y 20). Esto equivale a aproximadamente 12 ppm de O_2 por cada 0.001% de Al.

En resumen, los sistemas de medición de la actividad de O_2 permiten un buen control del proceso de colada de palanquillas mediante la determinación de niveles bajos en relación con el contenido crítico soluble de Al con objeto de evitar la obstrucción de boquillas y de niveles superiores de dicho contenido de Al, los cuales están en función directa de las condiciones de desoxidación como lo hemos visto, con objeto de evitar la reacción C- O_2 en el frente de solidificación que genera sopladuras, poros y o--

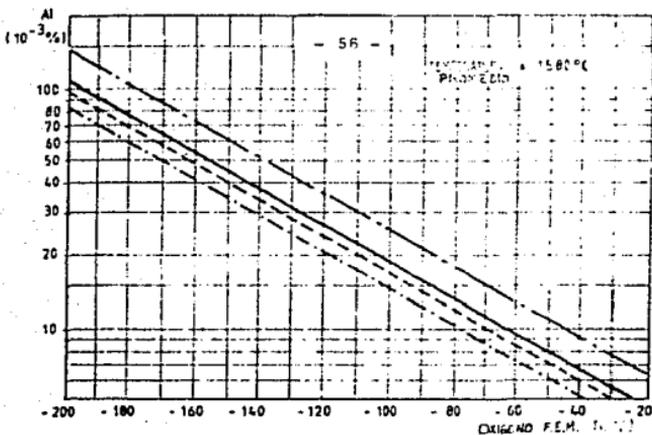
tros defectos superficiales en los productos finales (palanquillas o planchones).

B. En el caso de los aceros para lingotes desoxidados con Al, en los que el equilibrio está controlado exclusivamente por el Al con la correspondiente formación de Al_2O_3 , también existe una relación directa entre el aluminio soluble y la actividad del O_2 estudiada en la práctica. - Esta relación se muestra en la fig. 1.29. La confiabilidad del método es en realidad alta para la mayoría de las aplicaciones y si tomamos en cuenta la velocidad en la determinación del contenido de Al soluble a través de la medición del oxígeno (aprox. 15 seg.), podemos concluir que se trata de un sistema que responde a las crecientes necesidades de productividad, economía y calidad de las acerías modernas al brindar control instantáneo y reproducible del Al justo antes de pasar a la unidad de colada.

Es importante extrapolar la lectura del contenido de Al soluble, determinado en la estación de tratamiento, a su valor en el producto final y tratar de tener una idea acerca de la limpieza del acero (inclusiones de alúmina). La fig. 1.29 nos muestra claros ejemplos de tales relaciones: compara la diferencia entre el aluminio total en el sistema en la estación de tratamiento con el contenido de aluminio soluble en el acero dando así, en forma directa, la concentración de alúmina en ese momento para una muestra en particular (las técnicas de muestreo son aquí parámetros muy importantes en relación con las inclusiones de alúmina en flotación). Nos muestra también la comparación con el aluminio soluble en la unidad de colada en donde ya se ha tenido una cierta pérdida del mismo, la cual depende de las condiciones de colada, por ejemplo: reoxidación del chorro del acero colado, tipo de revestimiento de la cuchara (una alta concentración de Al reduce la sílice de los ladrillos retractarios), de los que se dan ejemplos en la misma figura mostrando las pérdidas de Al para revestimientos de dolomita y chamota. En relación con esto, es obvio que las pérdidas de Al dependen también directamente de la violencia con que se efectúe la insuflación de gas en la estación de tratamiento.

1.6.3. TRATAMIENTO CON CALCIO.

La inyección de aleaciones y compuestos de calcio a través de una lanza inmersa en el acero de la cuchara tiene muy importantes propiedades



Medición de la $a(O)$ en la estación de insuflado:

- Al_{sol} en la estación de insuflado
- Al_{tot} en la estación de insuflado
- Al_{sol} en la unidad de colada con tina de dolomita.
- . - . - Al_{sol} en la unidad de colada con tina de chamota.

Fig. 1.29. Aquí, la actividad del oxígeno está representada por la fuerza electromotriz dada por la celda para una temperatura promedio de 1580°C en lugar del valor directo en ppm. Esta presentación se justifica por el hecho de que la sensibilidad de la correlación es mucho mejor empleando valores de mV, los cuales varían en una amplia gama, por ejemplo: de -100 a -170 mV para aluminio soluble desde 0.020 hasta 0.060% en lugar de los valores en ppm que varían en menor proporción, por ejemplo: desde 7 hasta 3 ppm para los mismos valores del contenido de Al y para una temperatura promedio de 1580°C. La influencia de la temperatura sobre el equilibrio Al-O, viene siendo similar a la que ejerce sobre el equilibrio Cr-O, de la celda de referencia; la temperatura no juega un gran papel desde el momento en que la variación alrededor del valor promedio no exceda de ±20°C. El coeficiente de variación de tal correlación es aproximadamente del 10% lo que significa una desviación estándar de 0.005% para un promedio de 0.050% de aluminio soluble.

des en relación con la desoxidación, la desulfuración y la limpieza del acero. El calcio principalmente en forma de CaSi (calciosilicio), es ampliamente usado en el mundo con estos tres propósitos, por lo que resulta de interés observar sus propiedades en relación con la medición de la actividad del oxígeno.

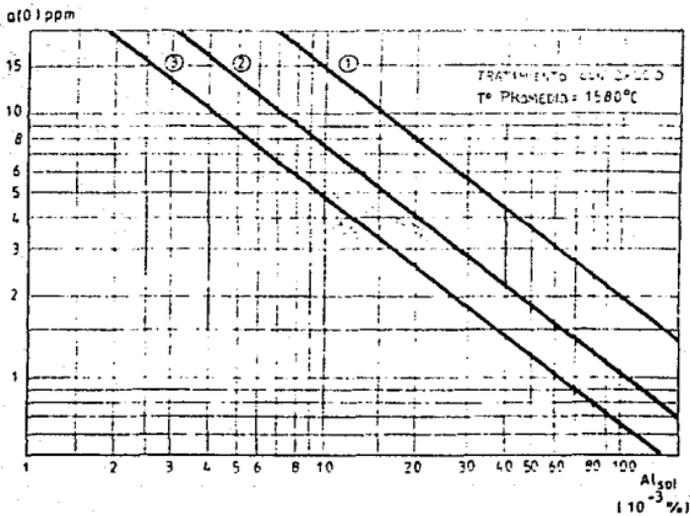
En el caso de la adición o inyección de calcio como CaSi, es prácticamente imposible estudiar el equilibrio simple Calcio-Oxígeno debido a la dificultad para analizar residuos de Ca tan bajos como los que se presentan en el acero y para tener una idea correcta de la presión parcial del Ca gaseoso durante la reacción. Por lo tanto, los trabajos de los investigadores (24) se han abocado al estudio de la influencia de la adición de calcio sobre la desoxidación en el equilibrio $Al-O_2$. Los resultados practicados se exponen en la fig. 1.30.

Podemos apreciar en forma inmediata que el calcio tiene un fuerte poder de desoxidación, principalmente cuando el contenido de Al es bajo (aceros aún no desoxidados fuertemente). Esta propiedad está haciendo al calcio muy eficiente en el caso de los aceros calmados con SiMn para colada continua, en donde el problema de la obstrucción de boquillas es difícil de controlar empleando aluminio solamente como se ha indicado con anterioridad. Por otro lado, la dificultad para controlar el nivel crítico superior de oxígeno (con objeto de evitar defectos superficiales) puede ser resuelto en forma positiva dada la caída drástica del contenido de oxígeno. Por otra parte, el calcio inyectado reacciona con la alúmina para formar aluminatos de calcio de bajo punto de fusión generando inclusiones en forma globular, algo que es muy importante pues dichas inclusiones no bloquean las boquillas (ni de la cuchara, ni del distribuidor) y tienden a flotar rápidamente, obteniéndose así una buena colabilidad y limpieza del acero.

Consecuentemente, la medición de la actividad de oxígeno puede llevarse a la par con el control en la adición de Ca con objeto de obtener los beneficios mencionados.

Ahora bien, del análisis de la fig. 1.30 se nota en forma inmediata que la influencia del calcio en el sistema es pobre cuando el contenido de aluminio es alto (aceros bien desoxidados). Por lo tanto, en los aceros calmados con aluminio sólo (para lingoteo), el Ca desempeña un pe-

(24) Vid., Carlens, J.P., "Aluminium, desoxidation and...". *precip.*, p. 110



- 1 Equilibrio Al- a(O) -t° sin Ca
- 2 Equilibrio Al- a(O) -t° con inyección de CaSi
(Ca = 0.6 kg/ton)
- 3 Equilibrio Al- a(O) -t° con inyección de CaSi
(Ca = 1 kg/ton)

FIG. 1.30.

queño papel en la desoxidación puro, por otro lado, continúa ejerciendo una gran influencia sobre la limpieza del acero como ya se indicó así como también sobre la desulfuración pues el Ca reacciona con el azufre cuando la actividad del oxígeno es baja o en otras palabras, cuando el acero ha sido bastante desoxidado. Un ejemplo del efecto del Ca sobre la desoxidación y la limpieza del acero se muestra en la fig. 1.31.

1.6.4. CONTROL DE LA DESULFURACION.

Sabiendo que el calcio reaccionará con el azufre y el oxígeno dependiendo de la concentración de estos, es interesante estudiar las condiciones de la desoxidación necesarias para una eficiente desulfuración. Los investigadores (25) han resumido los resultados prácticos obtenidos de tal estudio en el modelo dado en la fig. 1.32.

Antes del análisis del modelo, se mencionarán los aspectos generales de la pruebas:

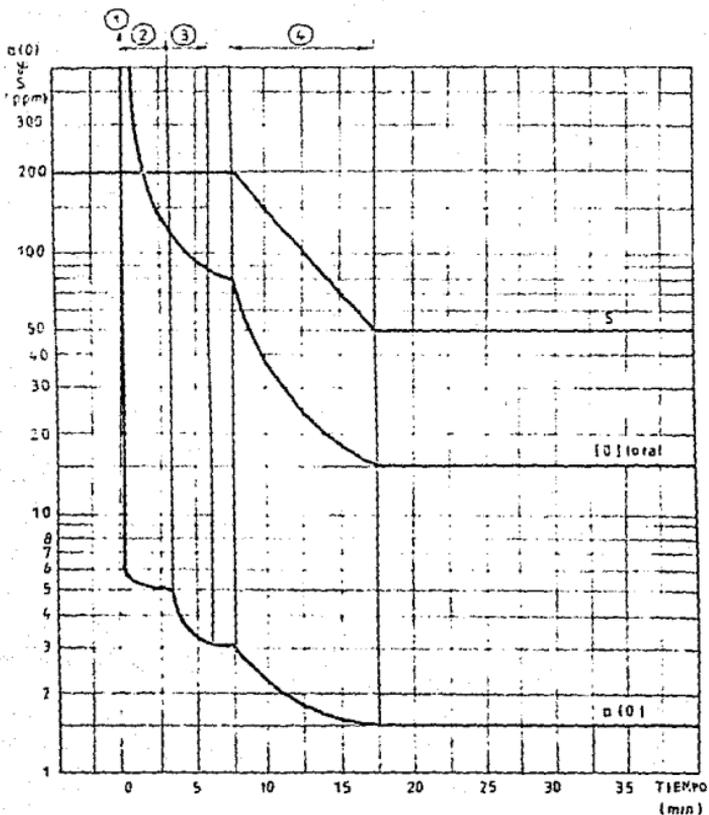
- Dos diferentes sistemas de inyección de CaSi fueron usados: el T. N. y el S.L. (Scandinavian Lancers).
- Los revestimientos de la cuchara empleados fueron a base de dolomita o alúmina. Si se emplea revestimiento de sílice, ésta es fuertemente reducida por el Al y el Ca durante la insuflación de Argón, causando fuertes pérdidas de Al.
- Se empleó un convertidor de escoria muy bien controlado. Este es uno de los principales parámetros a controlar, si se desea obtener un control de la desulfuración amplio y reproducible.

La parte superior izquierda del modelo establece la misma relación entre el contenido del Al soluble y el del oxígeno vistos con anterioridad en las figs. 1.27 y 1.29. Esta correlación es importante porque indica las condiciones límite de desoxidación con objeto de asegurar que la desulfuración se producirá y no se tendrá una desoxidación suplenataria (otra vez).

La parte inferior izquierda muestra el parámetro de adición de Ca y su influencia sobre la desoxidación a bajos niveles de O_2 en forma análoga a como se vió en la fig. 1.30.

Las partes inferior y superior derechas presentan el complemento del

(25) Vid. Carlens, J.P., op. cit., p. 110



- 1 Vaciado y desoxidación con Al
- 2 Transferencia de la cuchara a la estación de insuflado
- 3 Homogenización de t° y control del Al durante el insuflado con Argón
- 4 Tratamiento con Ca mediante la inyección de CaSi

FIG. 1.31.

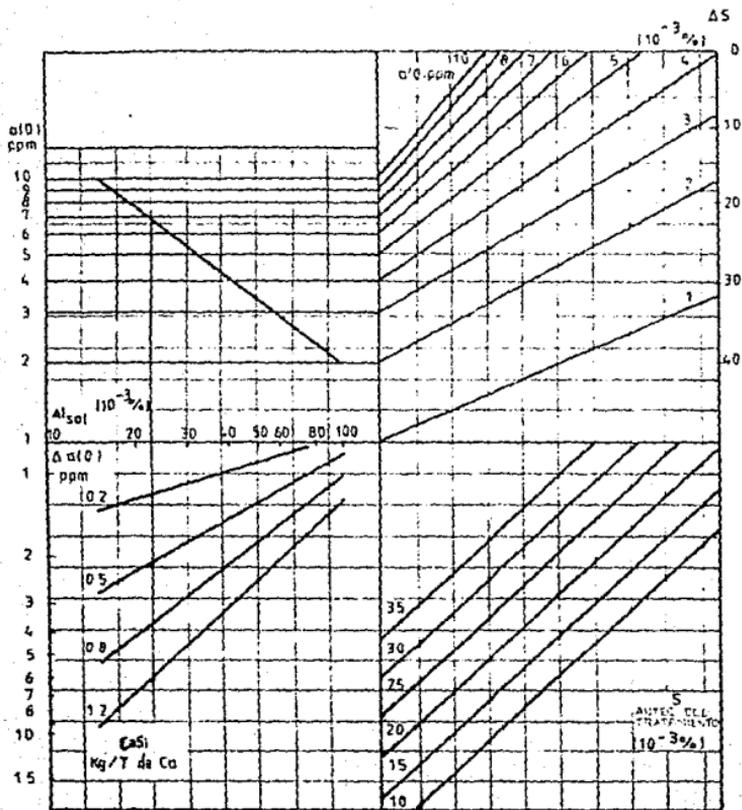


FIG. 1.32.

modelo generando así una correlación múltiple con los nuevos parámetros tales como el contenido de azufre antes del tratamiento con Ca y las pérdidas de azufres ΔS para una misma actividad del oxígeno.

Un ejemplo hará que entendamos mejor la aplicación del modelo:

Para una temperatura promedio de 1580°C, si obtenemos con el medidor una actividad de oxígeno de 3.5 ppm, la correlación Al-O₂ nos indica un contenido residual de Al igual a 0.050%. Desde este valor nos dirigimos verticalmente hacia abajo hasta la curva de la adición que se desee hacer. Supongamos que el caso sea 0.8 Kg/ton de Ca que corresponde a una desoxidación igual a 1.8 ppm, por lo que el contenido de oxígeno, después de la adición del CaSi será: $3.5 - 1.8 = 1.7$ ppm.

Desde este punto sobre la línea de 0.8 kg/ton de Ca, nos vamos horizontalmente hasta la línea de "S antes del tratamiento" igual a 0.025% (suponiendo que ese fuera nuestro análisis de S) y desde este punto nos dirigimos verticalmente hacia arriba hasta la curva con el valor de 3.5 ppm de oxígeno (otra vez). Desde esta línea nos vamos horizontalmente hasta la escala ΔS , la que representa las pérdidas de S en el tratamiento, en donde localizamos un valor aproximado de 0.016 a 0.017%. En estas condiciones el S final, - después de la inyección de CaSi (0.8 Kg/ton) sería 0.008% (igual a 0.025 - - 0.017% S).

En consecuencia, este modelo muestra efectivamente la cantidad de - desulfuración lograda para un cierto nivel de O₂ (o para una cierta desoxidación) y para una determinada inyección de CaSi. En otras palabras, si se ha fijado o determinado la cantidad de CaSi a inyectar, por ejemplo 0.8 Kg/ton, la desulfuración puede ser controlada directamente con la medición de la actividad del O₂ con un modelo más específico para este caso (fig. 1.33)

Este es, probablemente, uno de los primeros estudios cuantitativos sobre la correlación directa entre la desulfuración (ΔS) y la actividad del oxígeno. Proporciona también una idea aproximada del nivel crítico máximo - del O₂ (7 a 8 ppm) arriba del cual es prácticamente imposible desulfurar.

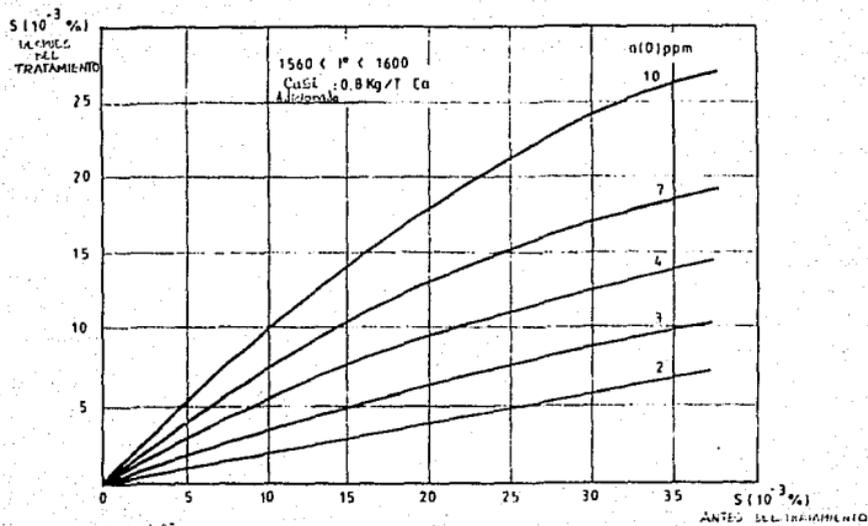


FIG. 1.33.

CAPITULO I I

REOXIDACION DEL ACERO

2.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA REOXIDACION DEL ACERO LIQUIDO DURANTE LA COLADA CONTINUA.

Muchos de los problemas asociados con el comportamiento del acero en sus procesos finales o en servicio, frecuentemente se pueden atribuir a materiales que han quedado atrapados en él durante su solidificación. Como ya se ha visto, estas inclusiones pueden deberse a la presencia de material refractario erosionado, a partículas de escoria atrapadas, pueden ser productos de desoxidación o productos formados por la reoxidación de elementos disueltos en el acero cuando el metal se vacía "al aire libre" siendo esta última considerada como una de las fuentes más serias de inclusiones en el acero.

Muchas veces los productos de reoxidación formados durante la operación de colada llegan a ser más problemáticos que los productos de desoxidación formados en la cuchara, ya que los primeros tienen una mayor tendencia a quedar atrapados por la solidificación del metal, en tanto que estos últimos tienen la oportunidad de difundir a través de la fase líquida hasta la fase escoria cuando el acero se encuentra en reposo en la cuchara.

En especial en el vaciado por colada continua la reoxidación llega, frecuentemente, a ser más severa por la exposición del líquido al ambiente en su paso de la cuchara al distribuidor y de éste al molde.

2.1.1. EL CHORRO DE VACIADO.

La reoxidación del acero en las unidades de colada continua se lleva a cabo por el contacto entre el chorro del mismo y el aire del medio, así -

como entre el aire y el espejo metálico del distribuidor y del molde. Otro de los factores que más influyen en este fenómeno es la entrada del aire al interior del baño, ya sea a través de la boquilla y los poros de los materiales refractarios o mediante su arrastre por el chorro del acero.

La extensión de la reoxidación depende de varias condiciones: la temperatura, la composición química del líquido, la naturaleza del chorro, el potencial de O_2 de los alrededores, la duración de la colada y el área de exposición del líquido al medio, etc.

De los factores mencionados, la naturaleza del chorro del acero es de las más importantes, y se puede tener una idea de su calidad por el grado de salpicaduras o chispas que produce en los espejos metálicos, tanto del molde como del distribuidor.

Un chorro irregular produce más salpicaduras, humo y perturbación de la superficie metálica, además, establece mayor área de contacto entre el metal y el aire y acarrea más cantidad de dicho gas al interior del baño, lo cual influye en el patrón de flujo de acero en el sistema distribuidor-molde, en la producción de inclusiones y en la limpieza del producto final.

Con el avance de la colada y la erosión de la boquilla, se tiene un diámetro del chorro cada vez mayor, haciéndose menos irregular y menos radiante. Ello trae como resultado una disminución en el grado de reoxidación.

Como ya se indicó, la reoxidación se incrementa con la duración y grado de exposición del chorro de acero al medio, siendo estos factores a su vez, función de la velocidad y de la longitud del mismo. Al principio (antes de que se normalice el chorro) y al final de la operación de vaciado se crean las condiciones óptimas para la reoxidación. Cuando dicho vaciado está finalizando, primero se crea un chorro variable, irregular, que produce un mayor acarreo de aire y más salpicaduras, con producción de humo, terminando en un chorro delgado que se transforma en una serie de gotas, obteniéndose en toda esta etapa la máxima relación área/volumen.

2.1.2. POSICION DE LA LINEA CON RESPECTO AL CHORRO DE ACERO DE LA TINA.

La incidencia de defectos superficiales por escoria en productos de colada continua, está fuertemente influenciada por la localización relativa de la línea (posición de la boquilla) con respecto a la posición del chorro de la cuchara (punto de caída del chorro) en el distribuidor.

Los investigadores (26) han realizado observaciones al respecto en distribuidores de 3 boquillas en unidades de colada continua que trabajan con chorros de flujo libre. Un ejemplo se muestra en la fig. 2.1.

Del análisis de las operaciones de colada, ha podido establecerse que cuando se cierra la boquilla de la cuchara, es decir, cuando no cae chorro de acero de ella, las condiciones en el distribuidor son relativamente tranquilas y los tres chorros de sus boquillas tienen una apariencia tranquila, más compacta. Sin embargo, cuando el chorro de la cuchara se abre, los chorros 1 y 2 que se encuentran adyacentes a la caja de vaciado (la caja donde cae el chorro de la cuchara para minimizar la turbulencia que produce éste en el distribuidor) se transforman en irregulares y turbulentos o distorsionados, mientras que el No. 3 permanece con su apariencia original, tranquilo y compacto. Cuando nuevamente se cierra el chorro de la tina, los chorros 1 y 2 adquieren otra vez las condiciones del último, 10 ó 20 segundos después. Un estudio sobre la incidencia de defectos superficiales por escoria indica que la mayor parte del acero contaminado proviene de los hilos 1 y 2. La distribución en base al porcentaje es la siguiente:

<u>LINEA No. 1</u>	<u>LINEA No. 2</u>	<u>LINEA No. 3</u>
48.2	30.3	21.5

Sobre la base de estos resultados, se concluye que el problema es originado más por reoxidación que por desoxidación. Un chorro turbulento da origen a una superficie de acero turbulenta con constante renovación del líquido en contacto con el aire y, en consecuencia, con mayor reoxidación; además, como se verá después, da poca oportunidad para la separación de los productos de reoxidación, pudiendo ser acarreados a la zona de solidifica-

(26) Vid., Maddever, W. J., McLean, A., Lockett, J. S. & Forward, G. E., op. cit., p. 111

ción en forma de escoria, con el consecuente problema de defectos superficiales antes mencionados.

Así pues, mientras la apariencia del chorro es una buena guía para calificar la marcha del proceso, la observación del golpeteo del chorro en la superficie del baño puede resultar un buen apoyo para tal efecto.

2.1.3. ESTUDIOS CON MODELOS DE AGUA

Las propiedades físicas del agua y del acero líquido son tales que se han empleado modelos de agua para obtener información cualitativa sobre el flujo de acero en las operaciones de vaciado. Arreglos similares a las unidades de colada empleando agua se han usado para seguir patrones de flujo con la ayuda de esferas pequeñas de polietileno coloreadas en el distribuidor y el molde, bajo las condiciones siguientes: (*)

- 1) Cuando está cayendo el chorro de fluido desde la cuchara al distribuidor.
- 2) Cuando no está cayendo dicho chorro (boquilla de la cuchara cerrada).
- 3) Cuando está cayendo dicho chorro y se hace uso de boquillas sumergidas en el fluido del molde.

Los resultados obtenidos en estas pruebas se resumen en la tabla 2.1.

Es interesante ver el efecto que tiene el chorro de la cuchara sobre el chorro del distribuidor y, en consecuencia, sobre las condiciones del líquido dentro del molde.

Se ha determinado que cuando el chorro de la cuchara está cayendo, el chorro del distribuidor es más irregular y aproximadamente un 30% más ruidoso, con una mayor entrada de aire y problemas de reoxidación más severos además de presentarse un rápido movimiento de material en la superficie

(*) En estos experimentos las esferas de polietileno proveen una buena representación de la estructura total de flujo. Puesto que la relación de densidades del polietileno al agua es aproximadamente la misma que la de la escoria al acero, es posible una ilustración razonablemente confiable del movimiento de las partículas no metálicas.

del molde en todas direcciones y con movimiento de fluido en las paredes corriente abajo. Esto es debido a que la penetración del chorro se ve drásticamente disminuida a causa de las corrientes ascendentes producidas por las burbujas cuando se elevan hacia la superficie. La interacción entre la superficie y el chorro también causa sólo penetración superficial pues el momento del chorro irregular es disipado más rápidamente.

Bajo estas condiciones, en la práctica se tiene una mayor probabilidad de que las partículas queden atrapadas en la interfase sólido-líquido en el molde.

Si el chorro de la tina no está cayendo se invierten las direcciones de flujo en el molde y se dan las condiciones indicadas en la parte central de la tabla con movimiento de flujo en las paredes corriente arriba. Bajo estas condiciones, las partículas no metálicas tienden a permanecer en la superficie del acero del molde excepto cuando sean arrastradas al interior del baño por el chorro del distribuidor, siendo conducidas al fondo en la porción central de solidificación del metal quedando atrapadas.

Podemos establecer que los efectos más dañinos generados por la reoxidación del acero y las condiciones de flujo en el sistema, cuando se vacía el acero en forma convencional, son las siguientes:

- 1) Oxidación del chorro y los espejos metálicos por contacto directo con el aire.
- 2) Oxidación del metal dentro del baño por el arraste de aire con los chorros.
- 3) Atrapamiento de partículas no metálicas, en especial óxidos, arrastradas desde la superficie al interior del baño hasta la zona de solidificación.
- 4) Falta de control de los patrones de flujo dentro del acero del molde.

Dos métodos han sido empleados para intentar eliminar, o al menos minimizar, alguna de estas dificultades. Ambos métodos involucran la protección del chorro:

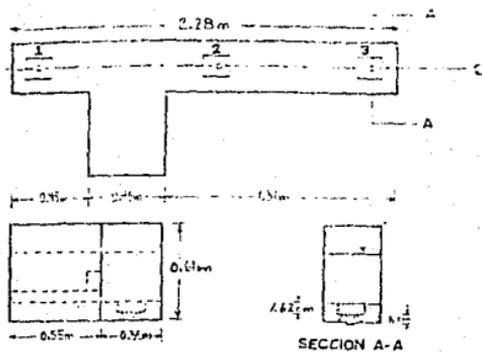


FIG.2.1. Configuración del distribuidor.

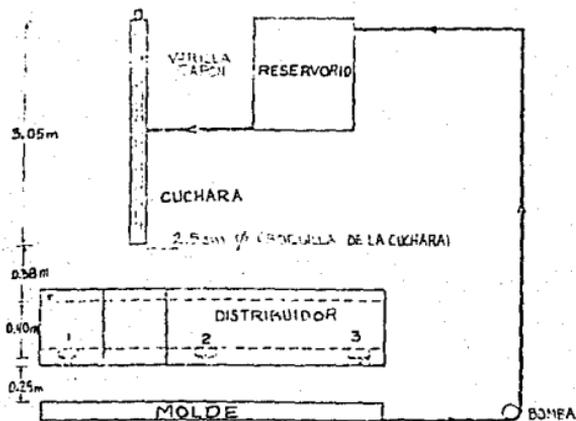


FIG.2.2. Modelo de agua esquemático.

- a) Empleo de boquillas rectas sumergidas.
- b) Protección con un gas inerte.

Cuando el chorro se protege con boquillas sumergidas hay menos probabilidad de que materiales tales como partículas de escoria, productos de oxidación y reoxidación, partículas producidas por la erosión refractaria, etc., sean acarreados desde la superficie del líquido del molde y queden -- atrapados en el metal durante su solidificación en el corazón de la línea. Ello se encuentra asociado con las condiciones dadas en la parte derecha de la tabla 2.1.

Esto se ha confirmado con las observaciones hechas en la práctica con el empleo de capas de escoria sintética en el molde, en el cual dicha capa permanece virtualmente estacionaria cuando se emplea junto con las boquillas sumergidas.

Ahora bien, en esta práctica es importante mantener el nivel adecuado de acero en el molde pues si se permite que este caiga por debajo de la punta de la boquilla, las partículas no metálicas de la superficie pudieran ser arrastradas al interior del líquido por las corrientes originadas alrededor del chorro y quedar atrapadas en la zona de solidificación. Un efecto similar se obtendría si el nivel del líquido en el distribuidor se dejara caer demasiado bajo. Las corrientes ahí originadas pudieran acarrear las partículas al interior del molde y otra vez sería atrapado este material por la llegada del chorro. Se han observado mejoras en la limpieza del metal cuando, en sustitución de esta boquillas, se emplean tubos rectos bifurcados -- pues amortiguan la llegada de partículas no metálicas desde el distribuidor dirigiéndose estas a la superficie del líquido en el molde en donde serán -- removidas por la escoria sintética y no hacia la zona de solidificación (27).

Si las boquillas sumergibles están porosas o agrietadas por defectos de fabricación o por manejo inadecuado los patrones de flujo en el distribuidor y el molde pueden alterarse en forma drástica. Esto se debe a que el aire se puede introducir al interior del tubo y ser acarreado por el chorro hacia el acero en el molde. Como resultado se obtienen patrones de flujo similares a los observados en el caso del lado izquierdo (A) de la tabla, es

(27) Vid, Graham, C.A., et al., cit por., Little, J., et.al. op. cit., p. 111

	Chorro de la tina abierto	Chorro de la tina cerrado	Chorro de la tina ab- ierto con empleo de bo- quillas sumergidas
Distribuidor			
Superficie del líquido	Turbulenta	Tranquila	Tranquila
Remolinos en el líquido	Muchos	Pocos	Moderados
Distribución de partículas	Muy dispersas	Mayormente en la superficie	Confinadas a la superficie
Chorro Distribuidor-Molde	Turbulento	Tranquilo	Encerrado
Molde			
Superficie del líquido	Turbulenta	Moderadamente tranquila	Tranquila
Entrada de gas	Alta	Baja	Ninguna
Penetración del chorro	Superficial	Profunda	Muy profunda
Movimiento de partículas sobre la superficie	Movimiento rápido desde el centro a las paredes	Arrastre lento de de las paredes al centro	Movimiento muy pequeño
dentro de la masa	En las paredes ha- cia abajo; hacia arriba en el centro	Permaneciendo sobre la superficie excep- to cuando son baja- das en el centro por el chorro del distri- buidor	Movimiento muy peque- ño

TABLA 2.1.

to es, cuando está cayendo el chorro de la tina al distribuidor y los chorros no se protegen en ninguna forma; las partículas serían barridas sobre la superficie hacia las paredes del molde y sumergidas en esta zona para quedar atranadas en la superficie solidificada.

El otro método alternativo es proteger el acero fundido con una atmósfera protectora que puede ser inerte o reductora. Este método elimina la absorción de oxígeno durante el vaciado del acero y previene la formación de inclusiones por reoxidación pero no tiene influencia en el comportamiento del chorro o en los patrones de flujo dentro del distribuidor o el molde. De hecho, los patrones de flujo resultan similares a los obtenidos en los casos A y B de la tabla 2.1, para chorros no protegidos.

2.2. CONTROL Y PROTECCION DEL CHORRO DE ACERO LIQUIDO

Muchas compañías, en especial en los E.U., emplean recubrimientos cerámicos (boquillas sumergidas, boquillas bifurcadas sumergidas, etc.) para proteger el flujo de acero de la reoxidación, pero en algunas operaciones el método no puede ser usado debido a sus varias desventajas, de las cuales ya hemos mencionado algunos ejemplos.

A continuación nos referimos a las ventajas que puede acarrear el control del carácter del chorro de vaciado junto con el empleo de una "envoltura" protectora de gas para minimizar la absorción de aire y sus efectos. Al respecto, los estudios de laboratorio se han enfocado hacia los siguientes aspectos:

- 2.2.1. Empleo de modelos físicos de los patrones de flujo en el molde.
- 2.2.2. Modelos químicos, a temperatura ambiente para la absorción de gas por el acero fundido.
- 2.2.3. Estudios con modelos para la absorción de gas con gotas de acero líquido.
- 2.2.4. Desarrollo a nivel laboratorio de diseños para producir envolturas gaseosas.

Por otra parte, las pruebas a nivel planta se han abocado principalmente a la obtención de resultados con respecto a los siguientes parámetros:

- 2.2.5. Absorción de oxígeno.
- 2.2.6. Absorción de nitrógeno.
- 2.2.7. Recuperación de aluminio.
- 2.2.8. Limpieza de la palanquilla.

2.2.1. MODELOS FISICOS DE LOS PATRONES DE FLUJO EN EL MOLDE.

2.2.1.1. MODELOS DE AGUA

En años recientes el interés por la calidad de los productos de colada continua se ha incrementado. Generalmente se ha considerado que la limpieza superficial e interna del producto depende en gran parte del comportamiento del fluido en la porción superior del molde, en donde se forma la primer capa solidificada y donde existe la oportunidad de separación de las partículas no metálicas hacia la escoria.

Para estudiar los efectos que influyen en el comportamiento de los chozros de acero vaciado en colada continua se han estructurado modelos de agua-bajo condiciones de similitud de flujo acero-agua (28). Para estos estudios y sus objetivos la similitud técnica puede ignorarse; la similitud cinemática se asegura manteniendo una constante relación entre el modelo y el equipo de planta, y para la similitud dinámica se han considerado las siguientes variables dimensionales:

$$N_{\text{fm, de Froude}} = \frac{v^2}{(gL)} = \frac{(\text{Fuerza de Inercia})}{(\text{Fuerza gravitacional})}$$

$$N_{\text{fm, de Reynolds}} = \frac{(vL)}{(\nu)} = \frac{(\text{Fuerza de Inercia})}{(\text{Fuerza viscosa})}$$

$$N_{\text{fm, de Weber}} = \frac{(\rho v^2 L)}{\sigma} = \frac{(\text{Fuerza de Inercia})}{(\text{Fuerza de tensión superficial})}$$

En el modelo mencionado con anterioridad (2.13) se trató con el patrón de flujo en el molde, en especial con relación a las boquillas sumergidas. Estos modelos se basan en el criterio de Weber y/o Froude. En otros estudios -

(28) JOHNSTON, R.E., SROGLUND, V.J., GUKMAN, A.A., PARKER J, cts. por MADDEVER, W.J., etal., on. cit., p. 111

sobre el efecto del diseño de la boquilla en la calidad del chorro, la similitud ha estado basada en el número de Reynolds, mientras que Robertson y Sheridan (29) en un estudio sobre el efecto del diseño del distribuidor, han empleado como criterio de similitud el número de Weber.

Los valores de las propiedades establecidas en la tabla 2.2. muestran que mientras las viscosidades absolutas del agua y el acero son marcadamente diferentes, las viscosidades cinemáticas son casi idénticas. Puesto que ambos números, el de Froude y el de Reynolds, contienen los términos V y L , g es constante y las viscosidades cinemáticas de los dos líquidos son casi iguales, estos criterios podrían ser satisfechos en modelos a gran escala. Sin embargo, las tensiones superficiales del agua y el acero líquido son diferentes, y mientras los números de Weber pudieran también ser idénticos, esto no se cumpliría en el mismo modelo.

Mientras que las fuerzas viscosas juegan el mayor papel en el volumen de acero donde la tensión superficial no tiene efecto, se ha cuestionado si los chorros observados en un modelo Froude-Reynolds serían una representación adecuada de los observados en la práctica. Puesto que los números de Weber son simplemente una relación de la fuerza de inercia a la fuerza por tensión superficial, llegarán a tener menor significancia cuando el valor de ésta relación se incremente por arriba de la unidad,

Tomando los diámetros de las boquillas como la longitud característica, números de Weber de aproximadamente 500 y 1,600 han sido obtenidos para acero y agua, por lo tanto, se ha considerado que las fuerzas por tensión superficial pudieran ser ignoradas y un modelo a gran escala ha sido construido basado en el criterio de Froude-Reynolds.

Un esquema del modelo empleado con las mismas dimensiones de una máquina industrial se muestra en la fig.2.2. El modelo permitió observar el efecto del manejo de la válvula deslizante sobre los chorros del distribuidor y también los puntos de golpeo entre estos chorros y los espejos metálicos de los moldes. Los primeros resultados confirmaron lo observado en la práctica. Con-

(29) ROBERTSON, A.A., and SHERIDAN, A.T., cit., por, MADDEVER, W.J. et. al. op. cit. n. 111

Propiedades físicas del agua a 20°C y del acero a 1600°C

	Agua (20°C)	Acero (1600°C)
Viscosidad Absoluta (μ)	1 cp	6.4 cp
Densidad (ρ)	1 gm/cm ³	7.014 gm/cm ³
Viscosidad Cinemática ($\nu = \mu/\rho$)	1 cs	0.913 c-
Tensión Superficial (σ)	73.0 ⁵ dinas/cm	1600 dinas/cm

TABLA 2.2.

la válvula deslizante de la tina cerrada los 3 chorros del distribuidor fueron tranquilos y compactos. Pero al abrir dicha válvula 10-20 segundos después los chorros 1 y 2 se volvieron turbulentos acarreado al interior del líquido considerables cantidades de aire y causando burbujeo y salpicaduras en el molde, mientras el No. 3 sólo permitió la entrada, en ocasiones, de poco aire. Al volver a cerrar la válvula los 3 chorros retornaron, como en la práctica, a su apariencia original. Estos hechos confirmaron que el criterio de similitud elegido había sido correcto. Resultó evidente que la turbulencia en el sistema contribuye a crear los problemas vistos en la práctica (defectos de producto, breakouts, roturas de línea, etc).

En algunas máquinas de colada continua, el chorro de la tina se encuentra "envuelto" por una boquilla refractaria para prevenir la entrada masiva de aire y la consecuente reoxidación del acero cuando entra al distribuidor, aunque más frecuentemente las boquillas sumergidas se usan para prevenir la reoxidación del acero vaciado del distribuidor al molde. En este caso, sin embargo, las boquillas tienen ciertas desventajas, por ejemplo, en la colada de palanquillas de pequeña sección existe el peligro de la formación de puentes de acero solidificado debido a las condiciones relativamente tranquilas del líquido en el molde y ello puede causar fracturas del refractario de la boquilla por los esfuerzos originados por la oscilación. Por esta razón, su principal aplicación se ha enfocado hacia la colada de grandes palanquillas, lingotes y planchones; otra desventaja relacionada con dichas boquillas es el hecho de que los chorros no pueden ser observados, y el empleo de lanzas de oxígeno para limpiar las boquillas con tendencia a obstruirse, está muy restringido.

Se ha reportado el empleo, en algunas acerías, de boquillas sumergidas en la cuchara y en el distribuidor al mismo tiempo; sin embargo, no se ha mencionado el uso de boquillas sumergidas solamente en la cuchara (flujo de acero protegido en su paso de la cuchara al distribuidor) con flujo de acero libre del distribuidor a los moldes. Un arreglo de este tipo podría ser benéfico en relación con la colada de palanquillas de pequeña sección y tiene la ventaja de que cualquier síntoma de bloqueo en las boquillas del distribuidor podría evitarse con el empleo de una lanza de oxígeno.

Con objeto de estudiar este aspecto en detalle, varios experimentos se han efectuado empleando modelos de agua usando boquillas rectas sumergidas. Cuando las boquillas rectas sumergidas han sido usadas únicamente desde la cuchara al distribuidor, sólo ligeras mejoras se han encontrado en las condiciones de flujo del molde. Sin embargo, se ha obtenido menor turbulencia en el distribuidor y relativamente más compactos y regulares chorros en las tres boquillas aún cuando el chorro de la cuchara estuviese fluyendo, es decir, válvula deslizante abierta.

2.2.1.2. LA BOQUILLA ESTRIADA

Puesto que se han atribuido varias ventajas al empleo de las boquillas de flujo abierto en el distribuidor, se han realizado varios experimentos para determinar el diseño más adecuado de boquilla que ayudara a contrarrestar los efectos de la turbulencia en el distribuidor y que produjera condiciones tranquilas en el molde con chorro abierto desde la cuchara al distribuidor y del distribuidor al molde. En base a un diseño realizado por Robertson y Sheridan una boquilla fué construida con un borde recto y ranuras radiales. Sin embargo, esta boquilla produjo chorros turbulentos aún bajo condiciones tranquilas en el distribuidor. Después de experimentar con varios diseños, se determinó que la que brindaba mejores resultados era una boquilla regular con entrada logarítmica y modificada para incluir ocho ranuras de 4.75 mm por 16 mm de profundidad en el borde superior. Durante las pruebas con estas boquillas estriadas la apariencia de los chorros del distribuidor permaneció sin cambios, aun cuando el chorro de la cuchara estuviera cerrado o abierto. Bajo condiciones tranquilas en el distribuidor los chorros fueron más turbulentos que con las boquillas regulares normales. Sin embargo, cuando se abrió el chorro de la cuchara, es decir, condiciones turbulentas, hubo menos entrada de aire por los chorros de las boquillas estriadas presentando espejos de líquido en el molde menos turbulentos en comparación con las normales.

Además otro resultado que pudo observarse, es que la profundidad de penetración del chorro en el líquido del molde con estas boquillas tiene un valor intermedio entre las producidas con chorros tranquilos o compactos y las

Patrones de flujo en el molde producidos por chorros de varias calidades

Calidad del chorro	Penetración del chorro	Flujo en la superficie	Flujo dentro de la masa	Entrada de aire
Boquilla regular-Tranquila	Profunda	Quieto	Hacia abajo en el centro	Pequeña o ninguna
		Flujo lento desde los lados hacia el centro	Hacia arriba en los lados	
Boquilla regular-Turbulento	Superficial	Turbulento	Hacia abajo en los lados	Cantidades substanciales
		Flujo rápido y violento desde el centro hacia los lados	Lento hacia arriba y profundo en el centro	
Boquillas estriadas-Consistente y ligeramente turbulento	Media	Moderadamente turbulento	Zona de oposición de flujos en las paredes; hacia abajo en las profundidades superficiales y hacia arriba en las partes más bajas	Cantidades moderadas
		Flujo rápido desde el centro hacia los lados		

TABLA 2.3.

producidas con chorros variables o irregulares (ambas en el caso de boquillas regulares). De igual manera, los patrones de flujo producidos tienen un carácter intermedio entre estos dos casos.

La mayor penetración y, en consecuencia, la mayor extensión del chorro comparada con la de un chorro turbulento, produjo una zona más baja o más profunda de corrientes ascendentes en las paredes del molde. Como resultado, hubo una región localizada a una corta distancia abajo de la superficie del líquido en donde el flujo ascendente en las paredes (desde la parte más baja del molde) interactuó con las corrientes descendentes en las paredes (desde la superficie) produciendo considerables corrientes de remolinos. Este comportamiento de oposición de flujos, tiene importantes implicaciones en relación a los avances en la limpieza del acero por las mejores condiciones para la separación de las partículas no metálicas desde la superficie líquida del acero al interior de la escoria. Los patrones de flujo producidos por chorros de varias calidades son resumidos en la tabla 2.3.

2.2.1.3. APLICACION EN AESA. (30)

Las boquillas estriadas han sido usadas en los distribuidores en Acero Ecatepec con chorro de vaciado libre desde la tina al distribuidor y del distribuidor al molde.

La fig. 2.3 muestra la proporción de palanquilla degradada por defectos superficiales por escoria, como un porcentaje del material total degradado durante 7 meses en AESA. La boquillas estriadas se instalaron a mediados de abril. Con las boquillas regulares durante los 3 primeros meses se promedió un rechazo de aproximadamente un 43%. Durante los 3 primeros meses de instaladas las estriadas, ese promedio bajó a 19%.

Dos factores contribuyeron para esta mejora: no solamente se vio reducida la reoxidación con la consecuente menor formación de escoria debido a la menor entrada de aire sino que, además, la naturaleza de los chorros -- producidos por las boquillas estriadas han tenido un pronunciado efecto sobre las condiciones de flujo en el molde.

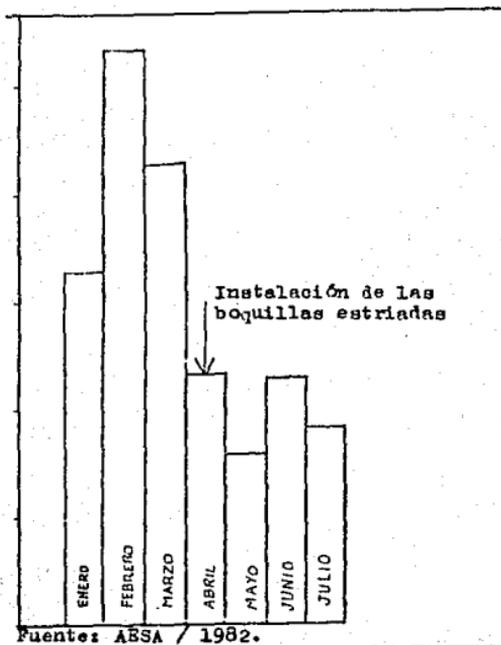


Fig. 2.3. Porcentaje de palanquilla degradada por escoria como un porcentaje del total degradado.

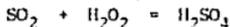
Como se ha visto, con las boquillas regulares cuando el chorro de la tina está cerrado, el chorro del distribuidor es regular y homogéneo, y la superficie del líquido en el molde está tranquila con flotación de la escoria en ella. La alteración de este chorro, cuando el de la tina se ha abierto, produce un baño turbulento en el molde que dirige la escoria de la superficie hacia sus paredes. Esta escoria es atrapada en la superficie de la palanquilla que se empieza a formar, produciendo una costra de escoria que no es removible en la cámara de espreas. Sin embargo, con el chorro de forma regular producido por las boquillas estriadas, se tiene en el molde un ligero espejo turbulento que mueve continuamente la escoria hacia las paredes del molde. Ello resulta en la formación de una delgada capa de escoria en la superficie de la palanquilla que se desprende fácilmente en la cámara de espreas dada la diferencia en los coeficientes de contracción por el enfriamiento entre el acero y la capa de escoria.

2.2.2. MODELOS QUIMICOS A TEMPERATURA AMBIENTE PARA LA ABSORCION DE GAS POR EL ACERO FUNDIDO.

El objetivo primario de este tipo de estudios ha sido determinar las cantidades relativas de gas absorbidas por un chorro de vaciado y por el líquido en donde cae, lo cual depende de la calidad de dicho chorro.

Recientemente, Brimacombe con otros (31) publicaron un artículo en el cual la transferencia de masa entre una boquilla horizontal y un líquido fue estudiada empleando un "modelo frío" (a temperatura ambiente). En su estudio una mezcla de SO_2 y aire al 1% de SO_2 fue inyectada a manera de atmósfera a un sistema de vaciado chorro-molde de una solución de H_2O_2 en agua al 0.3%. Este sistema químico se consideró representativo para estudiar la absorción de gas por el acero fundido, siendo la mezcla de SO_2 y aire representativa del gas contaminante.

El SO_2 absorbido por el chorro de vaciado o dentro del baño líquido en un molde, reacciona con el peróxido de hidrógeno en el agua para formar ácido sulfúrico:



(31) BRIMACOMBE, J.K., et al., op. cit. p.110

La amplitud de la absorción bajo diferentes condiciones fué seguida - con un indicador de cambio de pH en el sistema.

Los resultados confirmaron que existe una gran diferencia entre las cantidades de gas absorbidas bajo condiciones tranquilas y turbulentas en el sistema. Con un chorro compacto y un baño "quieto" en el molde la absorción de gas fué menor del 1% del tomado por un chorro irregular con violento mezclado en el molde. Bajo las primeras condiciones 10 a 15% del gas absorbido fué tomado por el chorro, mientras el 85 a 90% restante lo acumuló la interfase entre la fase gaseosa y la superficie del baño del molde. Puesto que muy poco gas es acarreado al interior de dicho baño, hay prácticamente cero absorción en esta zona.

En el caso del sistema turbulento, menos del 1% del total de gas absorbido lo tomó la superficie del chorro. Más del 99% fué atrapado dentro del agitado baño. Estos resultados concuerdan con las conclusiones de McCarthy y otros (32), quienes calcularon las cantidades relativas de reoxidación que ocurre en la superficie del chorro por contacto con la atmósfera y en el espejo líquido por la entrada de aire. Estos autores estimaron que la transferencia de masa hacia el chorro es menor del 1% de la correspondiente al baño para una configuración de vaciado turbulento similar al del modelo del ácido sulfúrico.

Empleando boquillas estriadas para proveer un chorro regular pero ligeramente turbulento (característico de este tipo de boquilla), solamente pequeñas cantidades de gas resultaron absorbidas por el chorro durante su caída desde el distribuidor al molde. En esta etapa, el tiempo de exposición del acero a la atmósfera es corto y la relación de área superficial a volumen de metal expuesto es pequeña.

Esto implica que se debe dar una particular atención a la atmósfera - inmediata al espejo del molde. Un gas protector en esta zona presenta por tanto ventajas desde diversos puntos de vista:

(32) MCCARTHY, M. J., et al, cit. por MADDEVER, W.J., HEASLIP, L. and McLEAN, A. op. cit. p. 111

- 1) La entrada de gas reactivo acarreado por el chorro será desplazado por el gas protector, el cual, a su vez, no será introducido al baño líquido del molde por la zambullida del chorro.
- 2) Las superficies de metal fresco producidas constantemente por la turbulencia del espejo estarán expuestas a un gas inerte en mucha mayor proporción que al aire.
- 3) El gas inerte que llegara a ser acarreado al interior del baño producirá una acción de arrastre que ayudará a remover partículas metálicas en suspensión que se hayan introducido a éste desde el distribuidor.
- 4) La entrada masiva de gas contaminante al interior del líquido que se tiene bajo condiciones normales de colada, es así evitada.

2.2.3. MODELOS PARA LA ABSORCIÓN DE GAS CON COTAS DE ACERO LÍQUIDO

Absorción de Oxígeno.

Para estudiar el tipo de productos de reoxidación formados cuando el metal se vacía expuesto al medio ambiente se han efectuado pruebas con acero líquido desoxidado en hidrógeno y posteriormente expuesto a una atmósfera oxidante (mezcla $CO_2 - CO$) por varios períodos de tiempo y tomando gotas como muestra para su observación (33).

Los resultados han indicado que, en general, las gotas desoxidadas -- tienden a ser más esféricas que las que contienen oxígeno, y conforme éste se incrementa las gotas son más ovaladas (33). Un efecto similar a este se ha observado cuando el acero es expuesto a una mezcla de $H_2 - H_2S$. Ello se atribuye principalmente al hecho de que la tensión superficial del hierro fundido es drásticamente reducida cuando el oxígeno y el azufre se incrementan. Desde el punto de vista práctico, si un acero ha sido fuertemente desoxidado y tiene una tensión superficial relativamente alta, producirá en la unidad de colada chorros más compactos y menos susceptibles a la

(33) Cfr., LITTLE, J., etal., op. cit., p. 111

entrada de gas que los obtenidos con aceros de alto contenido de oxígeno, el cual se puede reducir durante el vaciado mediante la adición de desoxidantes al molde, por ejemplo, aluminio.

Los resultados del examen microscópico de las muestras tomadas (gotas enfriadas rápidamente) de acero oxidado en la atmósfera de CO_2 - CO, han mostrado óxidos compuestos, esencialmente de una matriz de silicatos de manganeso.

A nivel comercial se ha encontrado que la incidencia de estos defectos disminuye en forma significativa cuando se previene la reoxidación empleando boquillas sumergidas y bifurcadas y escorias sintéticas en el molde. Sin embargo, como hemos indicado con anterioridad, aquellas son de difícil aplicación en muchas ocasiones y situaciones.

Otros resultados han mostrado que la proporción de reoxidación no es afectada por los cambios en concentración de S, Ti o Al. Las proporciones medidas concordaron bien con las predichas para una reacción controlada por difusión de oxígeno en la fase gaseosa, fig. 2.4. Ello implica que la extensión de la reoxidación del acero líquido expuesto a la atmósfera es rápida y no es obstaculizada por la presencia de azufre o de desoxidantes potentes tal como Ti y Al. Por lo tanto, lo conveniente es disminuir el tiempo de exposición del acero disminuyendo la altura de caída del chorro y ajustando las condiciones en el molde para minimizar la entrada de gas contaminante. Los chorros compactos tienen muchas ventajas al respecto pero son difíciles de mantener en ocasiones en la práctica. Por ello, los gases inertes ofrecen una buena alternativa.

ABSORCION DE NITROGENO

En experimentos similares a los realizados para la reoxidación, se han tomado medidas de la absorción de nitrógeno por gotas de acero cayendo a través de aire, nitrógeno y mezclas de N_2 -Ar, fig. 2.5. Las cantidades son mucho menores que las observadas para la absorción de oxígeno. Además, la proporción de nitrógeno retenida del aire es mucho menor que la ob

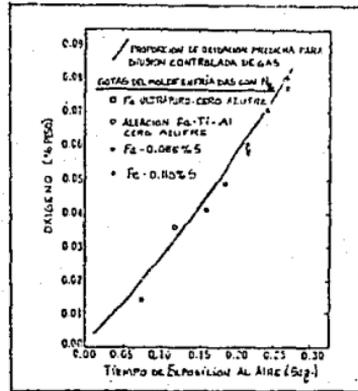


FIG.2.4.Absorción de Oxígeno por gotas líquidas metálicas .

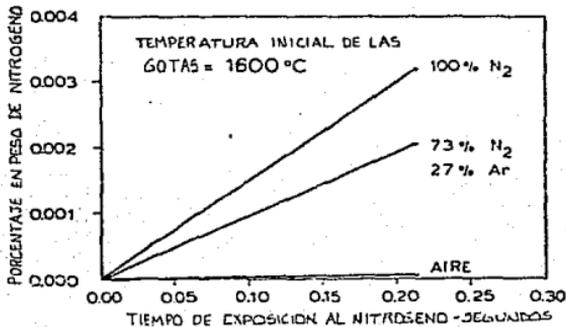


FIG.2.5.Absorción de Nitrógeno por gotas líquidas de acero .

tenida con nitrógeno puro o mezclas de N_2 -Ar de aproximadamente la misma concentración de N_2 que el aire. Esto implica que la cantidad de nitrógeno absorbida por contacto directo con los chorros es pequeña debido al poco tiempo disponible para la reacción. Esto se atribuye a que el efecto activo del oxígeno en la superficie disminuye la absorción de N_2 . Sin embargo, con chorros turbulentos se presenta una mayor oportunidad para su retención debido a la entrada de gas al interior del espejo metálico del molde.

Durante estas investigaciones se ha encontrado que la proporción de N_2 absorbido se incrementa fuertemente cuando el nivel de azufre disuelto en el acero disminuye por abajo de 0.02%, fig. 2.6. Esto quiere decir que para ciertos aceros que han sido fuertemente desulfurados, la absorción de nitrógeno puede ser excesiva. El efecto del S sobre el N_2 es similar al encontrado por McLean y Greenberg (34) para O_2 sobre N_2 en relación con la actividad superficial.

2.2.4. DESARROLLO DE LABORATORIO DE DISEÑOS PARA PRODUCIR ENVOLTURAS O ATMOSFERAS PROTECTORAS

2.2.4.1. MODELOS DE AGUA Y DISEÑOS COMERCIALES

Después de investigar el mecanismo de entrada de gas y la estimación de las cantidades relativas absorbidas en diferentes puntos del sistema de colada, se ha investigado el concepto de la protección gaseosa.

Se han hecho estudios con modelos de agua para la protección del líquido en el sistema de chorro del distribuidor-baño del molde mediante una cortina de gas inerte o reductor. Se ha probado la alimentación de gas al molde a través de un dispositivo múltiple y también mediante un anillo alrededor de la base del distribuidor.

Estos métodos tienen la ventaja de permitir la observación del chorro y de no interferir en las operaciones de la unidad como en el caso de las protecciones cerámicas. Sin embargo, existe la desventaja de que las co-

(34) McLEAN, A., AND GREENBERG, I.A., cit por., MADDEVER, W.J., et al on, cit., p. 111

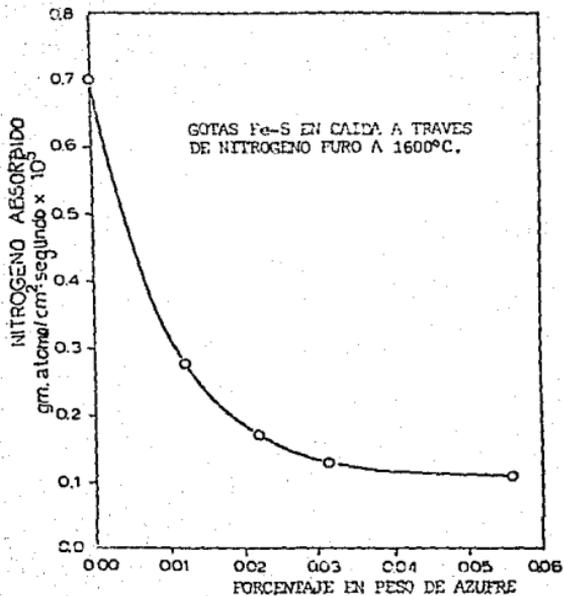


FIG.2.6. El efecto del azufre sobre la proporción de Nitrogeno absorbido por gotas líquidas metálicas .

rientes de aire, que en muchas ocasiones se presentan en las unidades de colada, pueden destruir las cortinas protectoras. Como resultado, la capa de gas inerte es reemplazada por gas atmosférico. No obstante, dado que las protecciones gaseosas tiene en general más aplicaciones que las boquillas cerámicas sumergidas, se ha insistido en contrarrestar este problema.

En años recientes las técnicas de protección con gas se han empleado sucesivamente en varias operaciones de aceración. Tres de estos métodos merecen especial mención:

1. El IMPACT (Improve Metal Protective Atmosphere Casting Technique). Entre el distribuidor y el molde se tiene una fuelle plegable y desmontable hecha con un resorte encurvado y protección de asbesto. La fuelle en vuelve completamente el chorro del distribuidor y la superficie del líquido en el molde. Esta fuelle es alimentada con argón bajo una ligera presión positiva. Una instalación similar es usada entre la cuchara y la tapa del distribuidor. El argón es también introducido al distribuidor entre la superficie y la tapa.

2. Un reciente desarrollo en el área de la protección del chorro con gas inerte es la envoltura Pollard, ampliamente discutida por Samways y colaboradores (35). Como resultado de las pruebas llevadas a cabo para desarrollar este diseño, se concluyó que se requiere una concentración de menos de 0.1% de oxígeno en el gas que se encuentra sobre la superficie del líquido del molde para prevenir la reoxidación. En este método un cilindro metálico hueco es colocado alrededor del chorro entre el distribuidor y el molde, y argón o nitrógeno es introducido aproximadamente a la mitad de la longitud del cilindro. El cilindro no toca ni el distribuidor ni el molde y el gas es alimentado a un flujo suficientemente alto (aproximadamente 850 litros por minuto) de manera que no solamente es acarreado al interior del molde sino que evita que la cortina sea destruida por las corrientes del aire.

(35) SAMWAYS, N.L., et al., cit. por. MADDEVER, W.J., et al. op.cit., p. 111

3. Otro reciente desarrollo en esta área es la envoltura USSC. Este diseño es colocado sobre la parte superior del molde y los gases inertes se introducen a través de un tubo con objeto de inundar la cavidad del molde y que el chorro no introduzca aire al baño.

En la literatura se reportan considerables adelantos en la limpieza del acero mediante el empleo de las protecciones gaseosas.

2.2.4.2. ASPECTOS EXPERIMENTALES

Como se indicó, se han probado dos métodos empleando modelos de agua (36):

- Una envoltura del chorro con origen en la base del distribuidor, y
- Un gas múltiple (37) con origen en el molde.

El primer diseño está basado en la premisa de que el flujo de gas desde la base del distribuidor debe ser suficiente para desplazar el aire en la cámara del molde y, de este modo, proteger el líquido o baño así como el chorro durante su caída.

El diseño del gas "múltiple" se basa en la premisa de que el nivel del líquido en el molde está generalmente 15 a 30 cm abajo del filo superior del mismo. Se propuso pues, llenar esta cavidad con un gas múltiple. En base a las conclusiones obtenidas con estudios de la caída de gotas de acero líquido a través de aire y gas inerte, se concluyó que la capa del aire arrastrada por la superficie del chorro continuará su caída hasta el espejo de acero. El sistema está equipado con dos arreglos de boquillas suministradoras del gas, uno dirigiéndolo verticalmente hacia abajo dentro del molde y otro enviándolo hacia el chorro para destruir la capa de aire acarreada por el chorro.

En ambos casos se ha empleado N_2 como gas inerte. Las muestras han sido tomadas de diferentes puntos de la cavidad del molde. Los resultados se muestran en la fig. 2.7.

(36) Cfr. MADDEVER, W.J., et al, *op. cit.*, p. 111

(37) Se empleó el término "múltiple" para indicar inyección del gas desde varios puntos y en diferentes posiciones.

PRUEBAS EN PLANTA

Estas pruebas se han efectuado usando Ar y N_2 como gases protectores y boquillas estriadas en el distribuidor.

2.2.5. ABSORCION DE OXIGENO

Se han tomado muestras de la cuchara, del distribuidor, del molde y de la palanquilla para análisis de oxígeno con objeto de determinar los efectos del gas múltiple con y sin adiciones de aluminio al molde. Los resultados se muestran en las tablas 2.4 y 2.5 y en las figs. 2.8 y 2.9.

Se han encontrado que los contenidos de oxígeno en el distribuidor han sido considerablemente más altos en promedio que los de la cuchara indicando los efectos de la reoxidación del acero en su vaciado de la cuchara al distribuidor. Por otro lado, el contenido de oxígeno en éste empieza a disminuir en el transcurso de la colada. Ello puede deberse a dos hechos: primero, la disminución de la carga ferrostática con el transcurso del tiempo en la cuchara resulta en una menor turbulencia en el distribuidor y, segundo, con el transcurso del tiempo las partículas no metálicas (en especial óxidos) presentes en la cuchara tienen mayor oportunidad de separarse en la escoria de la misma.

Debido al pequeño tamaño de las muestras (0.5 gr. aprox.) los valores de contenido de oxígeno que se disparan del promedio indican la presencia de gruesas partículas no metálicas en dichas muestras. El empleo del gas múltiple ha dado como resultado más bajos y consistentes niveles de oxígeno en el molde. Mejores resultados se han obtenido usando el gas múltiple junto con la adición de aluminio al molde. Estas mismas tendencias se han observado empleando N_2 o Ar como gases protectores.

2.2.6. ABSORCION DE NITROGENO

Las tablas 2.6 y 2.7 y la fig. 2.10 muestran que la cantidad de N_2 absorbida durante la colada se ve influenciada por la atmósfera a través de la cual se vacía el acero. El mínimo se ha obtenido para Ar con un incremento de 15 ppm aprox. cuando se cambia a aire. Cuando el gas a través del

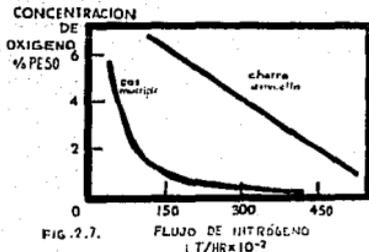


FIG. 2.7.

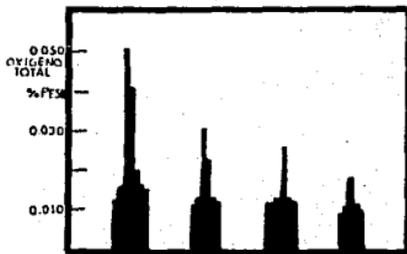


FIG. 2.7.

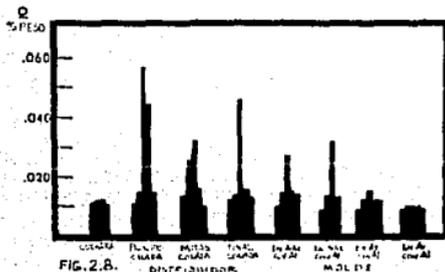


FIG. 2.8.

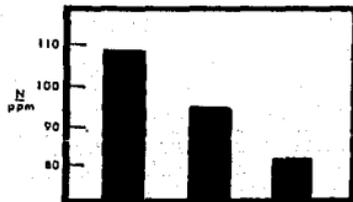


FIG. 2.11.

2.7 Efecto de la manera de aplicación del gas protector sobre los niveles de oxígeno en el molde.

2.8 Contenidos de Oxígeno en la Cuchara, Distribuidor y Molde.

2.9 Contenidos de Oxígeno en palanquilla colada con y sin la protección del gas múltiple

2.10 Efecto de diferentes atmósferas en el molde sobre el contenido de Nitrógeno en palanquillas.

Contenido de Oxígeno en la Cuchara, Distribuidor y Molde, y los efectos de las adiciones de Aluminio y la protección caseosa con Argón.

Localización del muestreo	Condiciones de las pruebas	Contenido de Oxígeno (% peso)	Promedio
Cuchara	No aplicable	0.011, 0.012, 0.013, 0.010	0.011
Distribuidor	Al inicio de la colada	0.011, 0.058, 0.015, 0.016, 0.045	0.029
	A la mitad de la colada	0.038, 0.010, 0.014, 0.016, 0.025	0.021
	Al final de la colada	0.014, 0.015, 0.013, 0.046, 0.014	0.020
Molde	Através de Aire-Sin Al	0.015, 0.014, 0.014, 0.028, 0.010	0.018
	Através de Aire-Adición de Al	0.033, 0.014, 0.013, 0.009	0.017
	Através de Argón-Sin Al	0.009, 0.017, 0.012, 0.015, 0.013	0.012
	Através de Argón-Adición de Al	0.010, 0.010, 0.009, 0.009, 0.010	0.010

TABLA 2.4.

Influencia de la Protección Gaseosa con Nitrógeno y de las Adiciones de Aluminio al Molde sobre los contenidos finales de Oxígeno en la palanquilla

Condiciones de las Pruebas	Contenido de Oxígeno (% en peso)	Promedio
A través de Aire-Sin Al	0.013, 0.016, 0.016, 0.051, 0.015, 0.041, 0.020	0.025
A través de Aire-Adición de Al	0.031, 0.013, 0.013, 0.012, 0.023, 0.012	0.017
A través de N ₂ -Sin Al	0.012, 0.026, 0.012, 0.012, 0.013, 0.013	0.015
A través de N ₂ -Adición de Al	0.009, 0.010, 0.011, 0.018, 0.011	0.012

TABLA 2.5

Influencia de la Protección con Nitrógeno sobre la Absorción
de éste en el Molde

Condiciones de las Pruebas	Contenido de Nitrógeno (ppm)	Promedio
A través de Aire - Sin Aluminio	85, 91, 88, 101, 94, 89	91
A través de Aire - Adición de Al	97, 89, 87, 94, 100, 86	92
A través de N ₂ - Sin aluminio	98, 109, 100, 105, 116, 122	108
A través de N ₂ - Adición de Al	116, 112, 107, 104, 113	110

TABLA 2.6

Influencia de la Protección Gaseosa con Argón sobre la Absorción
de Nitrógeno en el Molde

Condiciones de las Pruebas	Contenido de Nitrógeno (ppm)	Promedio
A través de Aire - Sin Aluminio	104, 89, 96	96
A través de Aire - Adición de Al	95, 102, 100	99
A través de Argón - Sin Aluminio	76, 80, 74	77
A través de Argón - Adición de Al	87, 78, 89	85

TABLA 2.7

diseño múltiple es cambiado a N_2 , el contenido de éste en el acero se incrementa todavía más allá de 15 ppm. Ello concuerda con los estudios realizados con las gotas de acero mencionadas anteriormente. A partir de estos resultados es obvio que para aquellos aceros que requieran bajos niveles de N_2 , deberá hacerse el vaciado a través de Ar si es que se requiere una atmósfera protectora.

2.2.7. RECUPERACION DE ALUMINIO

La tabla 2.8 y la fig. 2.11 muestran que, para la misma cantidad de aluminio alimentado al molde, el contenido residual de Al se incrementa desde 0.014% cuando el acero es vaciado a través de aire, hasta 0.019% cuando se emplea el gas múltiple (con Ar y N_2). Esto es el resultado de la menor absorción de O_2 en este último caso permitiendo una mayor recuperación del Al.

2.2.8. LIMPIEZA DE LA PALANQUILLA

La observación microscópica de muestras de palanquilla ha mostrado la presencia de dos tipos diferentes de inclusiones, similares en morfología pero diferentes en tamaño y composición. Ambas generalmente esféricas midiendo las más grandes desde 50 hasta 200 μ , y las de tipo más pequeño menos de 20 μ . Las primeras (las mayores) se han identificado como silicatos de manganeso prácticamente sin aluminio y las más pequeñas como silicatos de manganeso con mayores cantidades de aluminio y algo de calcio con la proporción de Al en función de si fué adicionado o no al molde. Ello concuerda con los resultados obtenidos por Kenney y Holden (38) y por Vincent en sus estudios sobre inclusiones en palanquillas.

Farrell y colaboradores han demostrado que en el caso de la reoxidación de aceros tratados con aluminio conteniendo Mn y Si, los primeros productos de reoxidación formados son aluminatos y, conforme avanza el proceso, estas inclusiones tendrán cada vez menos aluminio y cada vez más Mn y Si, y que la presencia de inclusiones de silicato en estos aceros son una fuerte evidencia de que la reoxidación en realidad se produce.

(38) KENNEY, M.P., cit. por MADDEVER, HEASLIP and McLEAN op. cit.
p. 111

Influencia de la Protección Gaseosa del Molde sobre la
Recuperación de Aluminio

	Palanquilla No.	Aluminio Total (% peso)	Aluminio Promedio (% peso)
A través de Aire Sin Aluminio	A1	0.005	0.004
	A2	0.003	
A través de Aire Adición de Aluminio	B1	0.013	0.014
	B2	0.014	
	F1	0.015	
	F2	0.015	
A través de Nitrógeno Sin Aluminio	C1	0.002	0.005
	C2	0.007	
A través de Nitrógeno Adición de Aluminio	D1	0.015	0.019
	D2	0.023	
A través de Argón Adición de Aluminio	H1	0.019	0.019
	H2	0.019	

TABLA 2.8

Desde que el acero viaja desde el horno hasta el molde, existe una gran oportunidad para la reoxidación. Una de las conclusiones importantes que ha llegado a obtenerse es el hecho de que existe gran probabilidad de que puedan ser acarreadas partículas no metálicas masivas desde la cuchara y el distribuidor hasta el molde las cuales tienen un pronunciado efecto sobre la calidad de la palanquilla. La protección gaseosa del baño del molde tiene solamente una influencia marginal sobre la incidencia de grandes inclusiones. Ello indica que la mayoría de las grandes partículas encontradas son probablemente productos de reoxidación previos al traslado del metal desde el distribuidor al molde. Sin embargo, aunque no puede evitarse la aparición de estas partículas, la limpieza general del acero se mejora marcadamente ya que la basta mayoría de las inclusiones presentes son de tamaño menor a las 20 μ , fig. 2.12. La fig. 2.13 muestra que la incidencia de las grandes partículas puede ser casi completamente controlada cuando se inyecta un gas inerte a la cavidad del molde combinado con la adición de un desoxidante fuerte tal como el aluminio.

Esto se fundamenta en los siguientes hechos: Está claro que la adición de aluminio al molde reduce el potencial de oxígeno por debajo del que estaría en equilibrio con los silicatos de manganeso. Por tanto los silicatos se disuelven resultando en un incremento en el contenido de oxígeno en el metal promoviendo la formación de muchos y pequeños aluminosilicatos de manganeso. El uso del gas múltiple es importante pues inhibe la formación de nuevos productos de reoxidación. Por lo tanto, se requiere menos aluminio para reducir el potencial de oxígeno que mencionamos y, en consecuencia, es más factible eliminar las grandes partículas acarreadas desde el distribuidor.

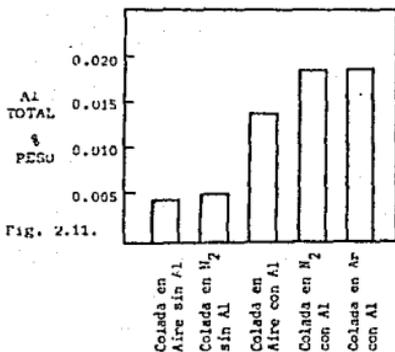


Fig. 2.11.

INDICE DE INCLUSIONES (< 20 μ)

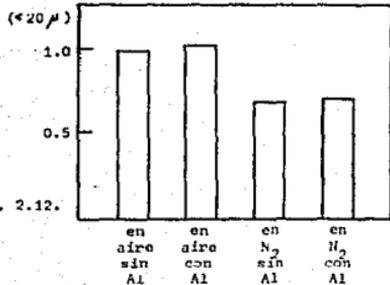


Fig. 2.12.

INDICE DE INCLUSIONES (> 50 μ)

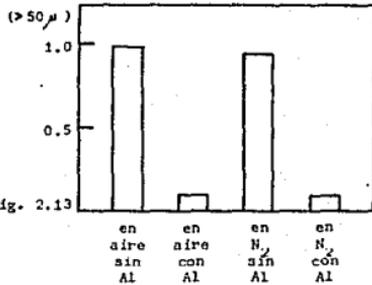


Fig. 2.13.

2.11 Efecto del gas múltiple sobre la recuperación de Al.

2.12 Efecto del gas múltiple sobre la incidencia de pequeñas inclusiones.

2.13 Efecto del aluminio sobre la incidencia de grandes inclusiones.

D I S C U S I O N .

Como ha podido verse a lo largo de este estudio, la mayor parte de los desoxidantes potentes investigados por Farrell y Hilty (específicamente Al, Zr, Ti y Tierras Raras), producen precipitados solidos a las temperaturas de aceración. Lo mismo parece ocurrir con el Si en ausencia o a bajas concentraciones de Mn coincidiendo con los resultados mencionados en la sección 1.2 por Holden, Rodiles y Elgner, en donde se indica que las bajas relaciones $Mn/3Si$ (normalmente menores a 3:1), dan problemas de fluidez pues los silicatos de manganeso saturados con sílice, a bajas relaciones MnO/SiO_2 en la escoria, tienden a tapar las boquillas del distribuidor en forma análoga a como lo hacen los productos no metálicos resultantes de la desoxidación con elementos tales como los mencionados arriba.

En México, la mayor parte de los aceros llamados comerciales se desoxidan sólo con Mn y Si. Cuando durante su colada se presenta la obstrucción de boquillas normalmente lo primero que se hace para diagnosticar el problema es recurrir al análisis químico final del cual sólo en algunas ocasiones logra obtenerse información concluyente en relación al origen del problema. Tanto la escoria como los residuos de los precipitados presentes en las boquillas obstruidas raras veces o nunca son analizados.

Por tanto considero que, a la luz de todo lo anteriormente expresado, el análisis de las escorias puede resultar un elemento importante en el control de los procesos de aceración y colada en relación a la obstrucción de boquillas con éste tipo de aceros.

Farrell y Hilty afirman justificadamente que aún no se logra entender qué fuerzas existen entre los precipitados y el material de las boquillas ni por qué los relativamente frágiles brazos dendríticos de acumulación de precipitados siguen creciendo con una unión muy fuerte a pesar de la acción de lavado del flujo de acero. También aseveran que no existe reacción entre dichos precipitados y la boquilla, y esto es cierto en gran parte de los casos. Sin embargo, aunque ellos no la encontraron en sus estudios, Saxena y colaboradores demostraron que sí puede darse dicha reacción, especialmente-

entre el aluminio que pudiera contener el acero y los componentes reducidos de las boquillas, principalmente SiO_2 y óxidos de Fe cuando estas los contienen. La reacción del metal con el revestimiento del distribuidor no se ha considerado relevante a nivel industrial como lo confirma la experiencia y el propio Farrell.

Asimismo mientras El y Hilty encontraron y establecieron que en relación al bloqueo generado en aceros tratados con desoxidantes potentes o con silicio el factor a dominar son los productos de desoxidación y que la influencia de los de reoxidación es sólo marginal, por otra parte Saxena, Onishi y Mitsushima demostraron que la reoxidación es la determinante en el bloqueo cuando el calcio (en ciertos rangos de concentración), interviene en el control de los productos de desoxidación pues la absorción de oxígeno provoca cambios en las inclusiones de desoxidación primaria haciéndolas sólidas. Este último hecho fué también corroborado por Farrell mismo y colaboradores quienes confirmaron que las adiciones de calcio producen modificaciones en las inclusiones resultantes de la desoxidación con aluminio, regulando por tanto el flujo del acero.

Ellos establecieron asimismo que la obstrucción de boquillas en los aceros tratados con aluminio puede prevenirse precisamente también, mediante la adición controlada de calcio. Como ya se mencionó, normalmente en México los aceros para colada continua no se desoxidan con aluminio sino con silicio y manganeso; sin embargo la obstrucción que se presenta con nuestros aceros en las unidades de colada muchas veces se asocia con el depósito de alúmina generado por el efecto de cantidades residuales de aluminio en dichos aceros.

Por lo tanto, en ocasiones, cuando los fundidores tienen que el metal presente problemas de fluidez, según su experiencia práctica, adicionan al líquido ciertas cantidades de CaSi (Calcio-Silicio), durante el vaciado del horno. Otras veces, ya en la unidad de colada, cuando los operadores de molde empiezan a ver que las boquillas se bloquean, también en base a su experiencia práctica, adicionan CaSi al distribuidor dando esto resultado sólo en algunas ocasiones.

Estas dos formas de proceder presentan, entre otras, las siguientes desventajas:

1. Dado que la adición de CaSi se hace al tanteo existe la probabilidad de complicar el bloqueo cuando el acero llega a contener aluminio pues, como ya hemos visto, la identidad de las fases en las inclusiones de aluminato de calcio, es decir, el que sean sólidas o líquidas, es muy sensible a los cambios de concentración del calcio y a la relación %Ca/%Al.
2. Debido a lo anterior, y a que muy probablemente el depósito no siempre es de origen aluminoso, normalmente se considera un desperdicio la adición de CaSi para estos fines por el consecuente incremento en el costo de fabricación.
3. Puesto que la adición de este material genera gran calentamiento en los recipientes (reacción exotérmica), el desgaste de refractarios se incrementa mucho en ocasiones. Quiero hacer hincapié en que es probable que, debido al fuerte calentamiento, los "tapones" de las boquillas se fundan aunque no sean de naturaleza aluminosa gracias a lo cual, algunas veces, el desbloqueo es efectivo y las coladas llegan a terminarse bien.
4. En base a lo anterior también se considera una práctica riesgosa para el personal la violencia de tal reacción.
5. Si llega a haber contaminación con Mg la adición de calcio-silicio es infructuosa (ver 1.4.3.).

Ahora bien, como complemento a estos comentarios, es justo mencionar que el CaSi y otras aleaciones y compuestos del calcio son muy empleadas en el mundo (incluso como sustituto de potentes desoxidantes como el Al en la fabricación de acero para colada continua), con grandes resultados y beneficios para desulfurar, desoxidar y mantener la limpieza de los aceros. Obviamente en estos casos estamos hablando de un empleo cualitativo y cuantitativamente bien controlado y sistemático.

Otra conclusión importante de estos investigadores es el hecho de que el flujo de acero a través de las boquillas no guarda relación con la amenaza potencial de bloqueo. Esto se ha observado en la práctica en AISI pues muchas veces el acero está fluyendo a flujo total en las boquillas y de repente se estrangula por completo en segundos, mientras que,

en otras ocasiones, el flujo llega a estar semiestrangulado y las coladas se terminan totalmente.

En relación al mecanismo de obstrucción con aluminio, Saxena llegó a la conclusión de que tanto la reacción química boquilla-componentes del acero y la reoxidación, así como el depósito de alúmina pueden presentarse y ser el mecanismo controlante dependiendo de las condiciones de desoxidación y colada, principalmente el tamaño y materiales de las boquillas y la adición de CaSi. Ya hemos visto que hay concordancia con otros autores.

Con respecto a las boquillas anulares, personalmente considero que aunque el estudio de Singh se centró en la investigación del depósito de alúmina sobre dichas boquillas, su fundamento puede ser extrapolado al depósito de otro tipo de inclusiones no metálicas en suspensión en el acero.

Estas boquillas se intentaron aplicar a finales de la década de los 70's en AESA; sin embargo se reportaron dificultades durante su empleo argumentándose que acarrecaban problemas principalmente en cuanto a la calidad y al perfil de los chorros producidos, pues estos eran variables (irregulares y turbulentos) trayendo descontrol en los operadores para mantener el nivel del baño de acero en los moldes y originando mayor reoxidación en chorros y espejos. Debido a esto se incrementó la frecuencia de roturas de línea o 'breakouts'. Empero, por otra parte, sí hubo un sensible descenso en la cantidad de acero no procesado debido al bloqueo de boquillas. De las coladas que presentaron obstrucción de boquillas anulares la mayor parte fué debido a acero "frio" (baja temperatura desde el vaciado del horno) y sólo contadas cargas presentaron bloqueo efectivo por acumulación sin haberse podido dar un diagnóstico claro. A final de cuentas el resultado fué un rechazo generalizado por parte del personal del área de colada continua y no se aplicaron más. En cuanto a las boquillas estriadas su aceptación encontró menor resistencia por parte de dicho personal y, como hemos podido ver, los resultados de su aplicación (3 ó 4 años después que las anulares), fueron positivos, aunque cabe señalar que algunas coladas mostraron obstrucción de las boquillas estriadas; sin embargo su objetivo principal: mejorar la limpieza del producto, lo han venido --

cumpliendo en forma aceptable; empero, finalmente, se ha limitado su uso (debido a su costo en relación con las boquillas regulares), a la colada de ciertos tipos de acero al carbono considerados como semiespeciales, - clasificación SAE, con la adición de aluminio al molde.

Con referencia a lo anteriormente expuesto se hace imprescindible - poner de manifiesto que nuestra mentalidad y sus inherentes prejuicios - son un freno importante para nuestro desarrollo y ello debido a que no - estamos "acostumbrados" a implementar innovaciones continuas en nuestros procedimientos, los cuales de esta forma se estancan.

Creo que debemos estar concientes de que todo cambio técnico lleva consigo un periodo de capacitación, adaptación, estudio y, en ocasiones, de experimentación investigando las posibles deficiencias en la aplicación, al final del cual podrán empezar a darse los resultados y beneficios esperados. Así, considero que la experiencia reportada en AESA con el empleo de las boquillas anulares pudo haber tenido que ver en parte - con estos problemas de adaptación.

Con respecto a la aplicación de los sistemas de refinación secundaria del acero, de los cuales la sección 1.6 es un ejemplo en relación - con la desoxidación, la desulfuración y el control de las inclusiones - tendiente a manejar en forma más eficiente el carácter químico del metal (para mejorar su colabilidad y limpieza), a través de la medición instantánea de la actividad del oxígeno. Una muestra de ello es que, por ejemplo, tenemos la tendencia a comprar para nuestras instalaciones industriales equipos viejos desechados por países más desarrollados con objeto de tener un ahorro en la inversión inicial. Sin embargo, esto a la - larga resulta una iniciativa equivocada pues muchos de los sistemas modernos de operación y proceso de fabricación de acero se pagan por sí - solos en relativamente poco tiempo.

La desulfuración y la medición de la actividad del oxígeno en la cuchara no tiene antecedente de aplicación en México. Lo mismo ocurre con el empleo de escorias sintéticas y boquillas sumergibles. En cuan--

to a las atmósferas protectoras de los chorros y al insuflado de gas -- inherente en la cuchara para homogenizar temperatura y composición y para eliminar parte de las inclusiones más dañinas, si se han aplicado en SICARTSA empleando nitrógeno en lugar de argón, aunque esto implica -- siempre un riesgo por la potencial absorción de nitrógeno; sin embargo, dada la calidad de los aceros que se fabrican, esto es permisible.

En relación a los distintos tópicos del párrafo anterior podemos -- remarcar los siguientes puntos:

- Los modelos y correlaciones de control aunados a la aplicación de los medidores de la actividad del oxígeno en el acero permiten tener un rápido y más eficiente control sobre la potencial obstrucción de boquillas, la formación de sopladuras y poros, los contenidos finales de -- Al_2O_3 y Al, la desulfuración, la limpieza y la desoxidación.
- La reoxidación es función de la temperatura, la composición, la naturaleza del chorro, el potencial de oxígeno del medio ambiente en la unidad, la duración de la colada y la relación área/volumen del líquido.
- Los efectos más dañinos en el vaciado convencional con relación a la reoxidación se presentan así: 1) Por oxidación directa metal-ambiente, 2) Por inmersión de aire en el líquido, 3) Por óxidos arrastrados desde la superficie, 4) Por falta de control de los patrones de flujo en el molde. Estas premisas han dado origen a distintas innovaciones tales como las boquillas sumergibles (normales y bifurcadas), aunadas al empleo de escorias sintéticas, las boquillas estriadas y las protecciones gaseosas, todas las cuales son aplicables dependiendo (dadas sus ventajas y limitaciones) de los requerimientos de operación en las unidades de colada.

CONCLUSIONES.

1. El acero desde su fabricación en el horno (fusión, descarbonación, desoxidación, control del aluminio y del análisis químico, etc.) , trae determinadas propiedades químicas que van a influir decididamente en su colabilidad; pero además, las condiciones ambientales-(reoxidación) y de operación en la unidad de colada (empleo de lanzas de oxígeno, empleo de CaSi al distribuidor, diseño y tipo de boquillas y otras condiciones), influyen también en dicha propiedad así como en el que se lleve a buen término la colada de toda una carga de acero líquido con calidad aceptable en el producto final.
2. Al margen de que el acero pueda "cuajarse" en los recipientes de la unidad de colada por venir realmente "frio" de aceración dejando fluir debido a ello, es un hecho contundente que la obstrucción de boquillas tiene su origen en el control del oxígeno.
3. Las condiciones y los sistemas de operación de una acería tales como: la clase y la carga misma de arrabio o chatarra, la práctica de desoxidación, la limpieza y las condiciones de las tinas o cucharas en donde el acero será vaciado desde el horno, el control de temperaturas, las condiciones de la unidad de colada y ambientales, etc., deben estudiarse y supervisarse celosamente pues influyen de manera decisiva en dicho control del oxígeno. El seguimiento fiel de los instructivos de operación juega un papel importante a este respecto.
4. Aún cuando se han obtenido importantes conclusiones a raíz de la investigación realizada en el campo de la desoxidación de los aceros, sólo el depósito de alúmina es hasta la fecha el mecanismo definitivamente aceptado por los grandes cánones de la siderurgia como la principal causante de la obstrucción de las boquillas en las unidades de colada a nivel industrial.
5. Tentativamente considero recomendables las siguientes condiciones generales de desoxidación y colada para aceros comerciales con objeto de evitar contratiempos en la fabricación del semielaborado

(palanquilla) con respecto a su colabilidad y reoxidación:

1. En el horno:
 - a) %C antes de la desoxidación = El mínimo requerido en el instructivo de fabricación según la calidad a producir, siendo este indicio de que el nivel de O_2 no es excesivo. De lo contrario, es casi imposible evitar problemas posteriores de -- fluidez, consumos elevados de desoxidantes y un alto riesgo de que la palanquilla sea degradada por salirse de especificación y/o por el nivel de inclusiones.
 - b) Etapas de desoxidación y ajuste de la composición = Conforme lo requiera el proceso correspondiente a la calidad producida con Mn, Si, Al, etc., vigilando el mantener una escoria adecuada hasta antes del vaciado y sin perder de vista la relación $\%Mn/\%Si$.
 - c) Vaciado = En recipientes limpios y sin riesgo de desprendimiento del refractario.
2. En la estación de tratamiento (muy deseable resulta contar con estaciones de este tipo dadas las grandes ventajas que representan en relación al control de la calidad de los aceros fabricados):
 - a) Ajuste fino de la composición.
 - b) Control de la temperatura y de los niveles de O_2 y Al = Con correlaciones específicas para minimizar o prevenir problemas de obstrucción de boquillas, sopladuras, poros y niveles indeseables de alúmina.
 - c) Insuflación = de Ar o N_2 para homogenizar temperatura, composición y bajar el nivel de inclusiones.
 - d) Desulfuración = con CaSi y otros compuestos de calcio buscando también transformar la alúmina a aluminatos de calcio del tipo $CaO \cdot 2Al_2O_3$ y $CaO \cdot Al_2O_3$ para mejorar colabilidad.
3. En la unidad de colada:
 - a) Temperatura = Minimizar pérdidas.
 - b) Boquillas = Estriadas y preferentemente que no contengan compuestos reducibles por el aluminio.
 - c) Protección gaseosa = con N_2 o Ar y preferentemente con alimentación de naturaleza múltiple.
 - d) Aluminio al molde = Deseable si se requiere grano fino y para minimizar el contenido de "grandes" inclusiones.

6. Podemos predecir que en un futuro a mediano plazo, de una u otra forma, mediante las soluciones expuestas en este trabajo y/o de algunas otras que surjan más adelante, los problemas de obstrucción de boquillas y el de la reoxidación del acero en las unidades de colada continua serán prácticamente erradicados. La automatización y los métodos de refinación secundaria serán herramientas fundamentales para auxiliar al logro de este objetivo.
7. Esta afirmación también puede ser aplicable a nuestro país, aunque tardará más tiempo en darse dependiendo del interés que le demos al problema y teniendo siempre en mente que la exitosa operación de una instalación de colada continua presupone un profundo conocimiento metalúrgico del comportamiento del acero durante la colada y durante la solidificación del metal.
8. Este trabajo queda expuesto con el afán de que sea de utilidad para aquellas personas involucradas en esta área de la industria siderúrgica y pueda servir de base a futuros estudios.

DESCRIPCION DE LOCUCIONES LATINAS

- 1) e.q.: Significa: por ejemplo.
- 2) cit.por.: Significa: Citado por.
- 3) op.cit,p.: Significa: Que la obra referida se encuentra -
en la página "p".
- 4) Vid: Significa: Véase.
- 5) Cfr: Significa: Que se compare lo que se escribió con lo
escrito en la fuente, puesto que pueden
existir aspectos que no se escribieron y
en la fuente están, o bien, pueden exis-
tir en la fuente otros conocimientos.
- 6) idem: Significa: El mismo autor, la misma fuente y la -
misma página o páginas.
- 6) ibid: Significa: Que se refiere al mismo autor, - - -
misma fuente anterior y página o pági-
nas diferentes.
- 8) et.al.: Significa: Y otros.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- BAUER, K.H.
Influence of deoxidation on castibility of steel.
International conf. on continuous casting of steel.
France, May 31-June 2, 1976. Metals Society. pp. 3-6
- 2.- BRIMACOMBE, J.K. and WEINBERG, F.
Journal of the Iron and Steel Institute
January, 1973. pp. 24-33
- 3.- BRIMACOMBE, J.K. and WEINBERG, F.
Iron-making and Steel-making
(Quarterly) 1974, No. 2. pp. 90-97
- 4.- BRIMACOMBE, J.K.
Canadian Metallurgical Quarterly
Vol. 15, No. 2, 1976. pp. 163-174
- 5.- CARLENS, J.P.
Aluminium, deoxidation and desulfurization control in
ladle metallurgy for billet and slab casters by means
an oxygen activity measurement.
Electro-Nite publication
Brussels, Belgium. August 12th, 1981. 12 p.
- 6.- FARRELL, J.W., and HILTY, D.C.
Steel flow through nozzles. Influence of deoxidizers
Electric Furnace Proceedings., 1971. pp. 31-45
- 7.- FAULRING, MG., FARRELL, J.W., and HILTY, D.C.
Steel Flow Through Nozzles. Influence of Calcium.
Iron and Steelmaking
February, 1980. pp. 14-20

- 8.- LITTLE, J.O. VANOSTEN, M., and McLEAN, A.
Factors Affecting Reoxidation of Molten Steel During Continuous Casting
Canadian Metallurgical Quarterly
Vol. 7, No. 4 pp. 235-246. Oct.-Dic. 1968
- 9.- MADDEVER, W.J., HEALIP, L. and McLEAN, A., et. al.
A new system for the control and protection of casting streams
Canadian Metallurgical Quarterly
Toronto, Canadá pp. 177-211. 1974.
- 10.- MADDEVER, W.J., McLEAN, A., LUCKETT, J.S. and FORWARDS, G.E.
Canadian Metallurgical Quarterly.
Vol. 12, No. 1 1973 pp. 79-88
- 11.- MILLS, N.T., and BHAT, L.F.
Iron and Steelmaking.
October, 1978. pp. 18-24
- 12.- RODILES, D.M. (SICARISA)
Influencia de las inclusiones no metálicas y la relación Mn/Si en el Bloqueo de boquillas del distribuidor.
Congreso Guadalajara, Jal., México. Noviembre de 1979
- 13.- SAXENA, S.K., SANDBERG, H., WALDENSTRÖM, T., et. al.
Scandinavian Journal of Metallurgy
1978. pp. 126-133.
- 14.- SINGH, S.N.
Iron and Steelmaking
June, 1979. pp. 40-46.
- 15.- WASMUTH, J.T.
La colada continua del acero.
Serie Técnica Siderúrgica No. 1
ILAFSA, Chile, Santiago, 1977. 1a. Edición.