

**DETERMINACIÓN DE LOS CRITERIOS DE OPERACIÓN DEL NUEVO  
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN AUTOMÁTICO EN LA MÁQUINA DE COLADA  
CONTINUA PARA LA FABRICACIÓN DE PALANQUILLA EN LA EMPRESA  
ACERÍAS DE CALDAS S.A.**

**JAVIER RICARDO ARCINIEGAS VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2005**

**DETERMINACIÓN DE LOS CRITERIOS DE OPERACIÓN DEL NUEVO  
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN AUTOMÁTICO EN LA MÁQUINA DE COLADA  
CONTINUA PARA LA FABRICACIÓN DE PALANQUILLA EN LA EMPRESA  
ACERÍAS DE CALDAS S.A.**

**JAVIER RICARDO ARCINIEGAS VILLAMIZAR**

**Informe final para optar  
al título de Ingeniero Metalúrgico**

**TUTOR**

**ORLANDO PLATA HERNÁNDEZ**

**Ingeniero Metalúrgico**

**CO-TUTOR**

**AFRANIO CARDONA GRANADOS**

**Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2005**

A Dios, por darme la oportunidad de crecer, de alcanzar las metas propuestas en mi vida y de tener personas a mi lado que siempre han creído en un mejor futuro.

A mis padres Miguel Angel y Martha por su amor e incondicional apoyo, por todo lo que me han enseñado para ser una mejor persona y toda la ayuda que desde su corazón me han podido dar.

A mis hermanos Carolina y Julián. Que sea este el momento para decirles que sueñen y luchen por sus ideales.

A mi sobrina Camilita. Su sonrisa ha llenado de amor nuestras vidas.

A mi novia Jimena. Por su amor y entera dedicación.

A todos aquellos que de una u otra forma colaboraron para la realización de esta meta.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

LOS DOCENTES, de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, por sus excelentes enseñanzas y orientaciones para llevar a cabo mi formación profesional y progreso personal.

ORLANDO PLATA, Ingeniero metalúrgico por su apoyo al presente proyecto como Tutor.

AFRANIO CARDONA, Ingeniero metalúrgico y Co-Tutor del proyecto, por su colaboración.

LUIS CARLOS CORZO, Ingeniero metalúrgico, ACERÍAS DE CALDAS S.A.

IVÁN URIBE, Director de escuela.

SUPERVISORES Y OPERARIOS, sección de acería, ACERÍAS DE CALDAS S.A.

Y A TODOS LOS AMIGOS, siempre en todos los momentos.

## GLOSARIO

**BARRA FALSA** extrae la palanquilla al inicio de la colada, se entrelazada por medio de barras móviles entre si.

**BILLETS** tipo de palanquilla que la maquina de colada continua produce de dimensiones mas superiores que las de un bloom.

**BLOOM** tipo de palanquilla que la maquina de colada continua produce de forma cuadrada de dimensiones pequeñas.

**BUZA** boquilla generalmente de circón utilizada en el distribuidor de la maquina de colada continua para que el acero líquido se deposite en el molde.

**GRANALLADO** tipo de adecuación que se le hace a una pieza metálica por bombardeo de partículas minúsculas a altas presiones.

**LASTRE** deposito de viruta metálica que se deposita en el fondo del molde antes de iniciar el colada para que el acero se ciña en la barra falsa.

**PRESIÓN METALOSTATICA** presión ejercida por el acero a las paredes de la corteza de la palanquilla al momento de solidificarse.

**TOCHOS** tipo de proceso de colado del acero que funciona a partir de un molde o bloques rectangulares estáticos de capacidad aproximada entre 15 y 20 ton.

**SLAB** tipo de palanquilla que la maquina de colada continua produce de forma rectangular también se le conoce como planchón.

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>OBJETIVOS</b>	3
<b>1. GENERALIDADES</b>	4
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	4
1.2 PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA	5
1.2.1 Misión	6
1.2.2 Visión	7
<b>2. COLADA CONTINUA</b>	8
2.1 MÁQUINA DE PALANQUILLA DE COLADA CONTINUA	10
2.1.1 Refrigeración secundaria	14
2.1.2 Distribuidores refractarios	18
2.1.3 Suministro de acero líquido	20
<b>3. ASPECTOS METALÚRGICOS</b>	22
3.1 TEMPERATURA DE LIQUIDUS PARA EL ACERO	24
3.2 SOLIDIFICACIÓN	26
3.2.1 Formación inicial de la piel	28
3.3 PROCESOS Y ACABADOS EN LAMINACIÓN	29
<b>4. DEFECTOS EN PRODUCTOS DE COLADA CONTINUA</b>	32
4.1 DEFECTOS SUPERFICIALES	35

4.1.1	Porosidad superficial y subcutánea (pinholes)	35
4.1.2	Grieta longitudinal en la esquina de la palanquilla	36
4.1.3	Marcas de oscilación	38
4.2	DEFECTOS INTERNOS	39
4.2.1	Porosidad interna (blowholes)	39
4.2.2	Grietas tipo estrella	41
4.2.3	Grietas centrales	42
4.2.4	Cavidad o porosidad en el centro de la palanquilla	43
4.3	DEFECTOS DE FORMA	45
4.3.1	Romboides	45
4.3.2	Concavidad	46
4.3.3	Convexidad	47
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>49</b>
5.1	ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA	49
5.2	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE INICIO DE COLADO Y PÉRDIDAS DE TEMPERATURA EN EL PROCESO	50
5.2.1	Temperatura de liquidus	50
5.2.2	Pérdidas de temperatura durante el proceso	53
5.3	PARÁMETROS DE SOLIDIFICACIÓN	64
5.3.1	Longitud metalúrgica	64
5.3.2	Formación de la piel en la palanquilla (ley de Lighfoot)	65
5.3.3	Caudales de agua en la zona de refrigeración secundaria	68
5.4	REGISTRO DE DEFECTOS PRESENTES EN	

PALANQUILLAS	77
5.4.1 Análisis macroestructural	77
5.4.2 Resultados de macroataques	78
<b>6. CONCLUSIONES</b>	83
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	86
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	87
<b>ANEXOS</b>	90

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Colado de acero en moldes, fabricación de tochos.	8
<b>Figura 2.</b> Diagrama del molde de cobre para colada continua.	11
<b>Figura 3.</b> Diagrama esquemático donde muestra la formación de la corteza solidificada.	12
<b>Figura 4.</b> Zona de refrigeración.	15
<b>Figura 5.</b> Solidificación de la palanquilla.	16
<b>Figura 6.</b> Esquema de un distribuidor con dos líneas de colada.	19
<b>Figura 7.</b> Esquema de solidificación en colada continua del acero.	23
<b>Figura 8.</b> Productos terminados por laminado en caliente.	30
<b>Figura 9.</b> Porosidad superficial y subcutánea, en palanquillas.	36
<b>Figura 10.</b> Grietas longitudinales en las esquinas, en palanquillas.	37
<b>Figura 11.</b> Marcas de oscilación, en palanquillas.	39
<b>Figura 12.</b> Porosidad interna, en palanquilla.	41
<b>Figura 13.</b> Grieta estrella, en palanquilla.	42
<b>Figura 14.</b> Grietas centrales, en palanquillas.	43
<b>Figura 15.</b> Porosidad en el centro de la palanquilla.	44
<b>Figura 16.</b> Romboides, en palanquilla.	46
<b>Figura 17.</b> Concavidad, en palanquillas.	47
<b>Figura 18.</b> Convexidad, en palanquillas.	48

<b>Figura 19.</b> Inicio de vaciado de acero a la cuchara.	55
<b>Figura 20.</b> Cuchara con acero saliendo del foso de vaciado.	56
<b>Figura 21.</b> Transporte de la cuchara desde el foso de vaciado hacia máquina de colada continua.	57
<b>Figura 22.</b> Toma de temperatura en cuchara para dar inicio al colado.	57
<b>Figura 23.</b> Esquema de longitud metalúrgica en la palanquilla.	66
<b>Figura 24.</b> Perfil de solidificación del acero.	67
<b>Figura 25.</b> Zona 1 de refrigeración.	70
<b>Figura 26.</b> Zona 2 de refrigeración.	71
<b>Figura 27.</b> Zona 3 de refrigeración.	71
<b>Figura 28.</b> Grieta central en palanquilla 115*115 mm para acero A-572.	79
<b>Figura 29.</b> Grieta central en palanquilla 115*115 mm para acero 1020.	79
<b>Figura 30.</b> Grieta presente en ala de perfil de 3 3/8" para acero A-572.	80
<b>Figura 31.</b> Rechupe y grietas en zona central en palanquilla de 130*130 mm para acero A-36.	80
<b>Figura 32.</b> Macroataque a palanquilla de 115*115 mm. para acero A-36.	81
<b>Figura 33.</b> Macroataque a palanquilla de 130*130 mm. para acero A-572.	81
<b>Figura 34.</b> Macroataque a palanquilla 115*115 mm. para acero 1045.	82
<b>Figura 35.</b> Temperatura de liquidus para acero en función del porcentaje de carbono sin elementos aleantes	90
<b>Figura 36.</b> Porcentaje anual de grietas en los productos de laminación	94

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Diagrama de porcentajes de carbono y elementos aleantes con factor de corrección.	25
<b>Tabla 2.</b> Influencia de los procesos en la calidad de la palanquilla.	34
<b>Tabla 3.</b> Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero A-36.	51
<b>Tabla 4.</b> Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero A-572.	51
<b>Tabla 5.</b> Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero 1020.	52
<b>Tabla 6.</b> Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero 1045.	52
<b>Tabla 7.</b> Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero 1060.	53
<b>Tabla 8.</b> Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero A-36.	58
<b>Tabla 9.</b> Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero A-572.	58
<b>Tabla 10.</b> Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero 1020.	59
<b>Tabla 11.</b> Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero 1045.	59
<b>Tabla 12.</b> Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero 1060.	60
<b>Tabla 13.</b> Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero A-36.	61
<b>Tabla 14.</b> Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero A-572.	61
<b>Tabla 15.</b> Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero 1020.	62

<b>Tabla 16.</b> Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero 1045.	62
<b>Tabla 17.</b> Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero 1060.	63
<b>Tabla 18.</b> Temperaturas en planta para controlar parámetros de funcionamiento.	64
<b>Tabla 19.</b> Ley de <b>Lighfoot</b> para palanquillas de 115*115mm. y 130*130mm.	67
<b>Tabla 20.</b> Caudales de agua en diferentes tipos de acero.	69
<b>Tabla 21.</b> Distribución de agua según ubicación en el sistema de refrigeración.	69
<b>Tabla 22.</b> Equivalencia de velocidades según diámetro de buza y tipo de palanquilla.	69
<b>Tabla 23.</b> Constantes para caudales en refrigeración, para perfil 3" y acero A-572.	72
<b>Tabla 24.</b> Caudal de agua circuito secundario, para perfil 3" y acero A-572, en palanquilla de 115*115 mm.	73
<b>Tabla 25.</b> Constantes para caudales en refrigeración, para perfil 4" y acero A-572.	73
<b>Tabla 26.</b> Caudal de agua circuito secundario, para perfil 4" y acero A-572, en palanquilla de 130*130 mm.	74
<b>Tabla 27.</b> Constantes para caudales en refrigeración, para canal de 3" y 4" en acero A-36.	74
<b>Tabla 28.</b> Caudal de agua circuito secundario, para canal de 3" y 4" en acero A-36, en palanquilla de 115*115 mm.	75
<b>Tabla 29.</b> Constantes para caudales en refrigeración, para redondo de calibración de 1 1/8" en acero 1020.	75
<b>Tabla 30.</b> Caudal de agua circuito secundario, para redondo de calibración 1 1/8" en acero 1020, en palanquilla de 115*115 mm.	76

<b>Tabla 31.</b> Constantes para caudales en refrigeración, para redondo de calibración de 1 1/8" en acero 1045 y 1060.	76
<b>Tabla 32.</b> Caudal de agua circuito secundario, para redondo de calibración 1 1/8" en acero 1045 y 1060, en palanquilla de 115*115 mm.	77
<b>Tabla 33.</b> Cuadro de composición química de aceros.	91
<b>Tabla 34.</b> Perfiles de productos fabricados en laminación (NTC 4537).	93

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Diagrama de temperatura de liquidus para acero en función del porcentaje de carbono sin elementos aleantes.	90
<b>Anexo B.</b> Cuadro de composición química de aceros.	91
<b>Anexo C.</b> Perfiles de productos fabricados en laminación (NTC 4537).	93
<b>Anexo D.</b> Porcentaje anual de grietas en los productos de laminación	94

**TITULO: DETERMINACIÓN DE LOS CRITERIOS DE OPERACIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN AUTOMÁTICO EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA PARA LA FABRICACIÓN DE PALANQUILLA EN LA EMPRESA ACERÍAS DE CALDAS S.A.\***

**AUTOR: JAVIER RICARDO ARCINIEGAS VILLAMIZAR\*\***

**PALABRAS CLAVES:** acero, colada continua, palanquilla, refrigeración, solidificación, temperatura.

### **Resumen.**

La puesta en marcha de este proyecto se considera necesaria, luego de identificar los problemas que se presentaban en la Acería de Caldas S.A., debido al porcentaje tan alto de producto fabricado en laminación de mala calidad, originado por el sistema de refrigeración de la palanquilla en la máquina de colada continua.

El presente proyecto plantea una mejora en la productividad gracias a la adecuación de un sistema automático de refrigeración que hará posible que los defectos originados en esta etapa del proceso de fabricación se vean disminuidos gracias al manejo de un modelo matemático que controla la relación entre agua de refrigeración y velocidad de colada.

Para el mejoramiento en la productividad se hizo un estudio sobre los factores críticos en la fabricación del acero, como es la temperatura del acero, composición química y refrigeración en las palanquillas.

El estudio se basó en los aceros A-572, A-36, 1020, 1045 y 1060. Para la temperatura del acero se analizaron las temperaturas en horno eléctrico, en cuchara y en distribuidor, de donde se pudo establecer las temperaturas reales en cada una de estas etapas. En la determinación de los caudales de agua para cada acero, se tomó toda la información de temperaturas y de mecanismo de solidificación; encontrando una combinación entre refrigeración y solidificación que conduzca a la disminución de defectos en las palanquillas producidas.

Una vez establecidas las condiciones de colada se realizaron pruebas metalúrgicas (macroataque), para determinar si el procedimiento realizado tuvo el desempeño que se requería para disminuir los costos de mala calidad originados por el sistema de refrigeración en la máquina de colada continua.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales.

**TITLE: DETERMINATION IN OPERATING CRITERIA OF THE NEW SYSTEM OF AUTOMATIC REFRIGERATION IN THE CONTINUOUS CASTING MACHINE FOR BILLET MANUFACTURATION IN COMPANY ACERÍAS DE CALDAS S.A.\***

**AUTHOR: JAVIER RICARDO ARCINIEGAS VILLAMIZAR\*\***

**KEYWORDS: BILLET, CONTINUOUS CASTING, REFRIGERATION, STEEL, TEMPERATURE.**

**Abstract.**

To put into gear this project is considered necessary, after indenting problems presented in the Acerías de Caldas S.A. Due to a very high percentage of the manufacturing product in a bad quality engraving, originated by the refrigeration system on the billet in the continuous casting machine.

This project establishes on improvement in the productivity due to the adaptation of a refrigeration automatic system that will make possible that defects originated in this process step of manufacturing, be diminished due to a mathematical model manage that controls relation between refrigeration water and velocity casting.

For improvement in productivity was made a study about critical factors in steel fabrication, as steel temperature, chemical composition and refrigeration in the billets.

The study was based in steels A-572, A-36, 1020, 1045 y 1060. For steel temperature were analyzed on electrical furnace, landle and tundish, from were established real temperature in each one of these stages. Determining water volume for each steel was taken all temperature information and solidifying mechanism; finding a compound between refrigeration and solidifying that leads to decrease defects in the produced billets.

Once established casting condition were performed metallurgic proofs (macroetching) to determine if the performed procedure had the required performance to diminish the costs of bad quality originated by the refrigeration system in the continuous casting machine.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales.

## INTRODUCCIÓN

El éxito de la colada continua se basa en la aplicación ininterrumpida de factores conocidos en todos los aspectos del procedimiento. La temperatura del acero, calidad del mismo, velocidad de colada y régimen de refrigeración son factores críticos para el buen resultado de la operación; de ahí que deban calcularse las condiciones óptimas para cada planta y producto. Estas condiciones óptimas habrán de aplicarse estrictamente en toda la operación posterior; de lo contrario no se obtendrá un producto de la mejor calidad posible.

La información obtenida para ésta investigación se basó en la experiencia de plantas a nivel mundial y de la propia planta de ACASA, en el proceso de colada continua específicamente en la refrigeración del acero.

Determinar las condiciones óptimas de operación en el sistema automático de refrigeración, conlleva a una reducción de defectos originados por enfriamiento irregular y etapas anteriores a la colada continua sin control, teniendo que analizar las temperaturas críticas en cada etapa del proceso de fabricación del acero, como ayuda a que los caudales de agua del sistema de refrigeración actúen correctamente en el mecanismo de solidificación.

Los resultados obtenidos llevarán a que una empresa siderúrgica que no maneje un sistema automático de refrigeración y donde los altos costos por concepto de mala calidad en los productos, implementen este tipo de tecnología el cual reduce los controles sobre factores críticos, haciendo menos dispendioso el manejo de la máquina de colada continua por parte de los operarios.

La principal limitante para determinar los parámetros del proceso de solidificación sin defectos en las palanquillas, serán las mismas circunstancias de trabajo en la

máquina de colada continua y el condicionado diseño de la misma; de ahí que cada planta maneje de manera diferente criterios de refrigeración definidos para procesos iguales.

En la investigación se deberá comprobar que el funcionamiento del sistema secundario de enfriamiento dará los resultados deseados. También será un estudio de tipo descriptivo, porque se deberán identificar elementos y características propias de este proceso. Para lograr el objetivo se necesitará tener gran capacidad de observación de los fenómenos físicos y químicos que ocurren en la solidificación del acero. Para todo esto se deberá acudir a la experiencia del personal de la empresa y conocedores del tema para tener una idea más clara sobre el funcionamiento del sistema secundario de refrigeración.

El desarrollo y estandarización del sistema de refrigeración basado en conceptos técnicos de la Ingeniería Metalúrgica, el manejo real de las variables involucradas, el análisis de defectos previo estudio de las condiciones del proceso de colada, conducirá a un proceso mucho más ágil y donde se manejarán conceptos de calidad, proporcionando un aumento en la productividad.

## OBJETIVOS

### GENERAL

Determinar los criterios de operación en el sistema de refrigeración automático de la máquina de colada continua “CONCAST” para la fabricación de palanquilla, con el fin de reducir los defectos originados por la refrigeración secundaria.

### ESPECÍFICOS

- Determinar los valores óptimos de caudales de agua del sistema de refrigeración, para que la solidificación de las palanquillas sea el mecanismo correcto para disminuir la formación de defectos.
- Evaluar si los aceros A-572 (NTC 1985), A-36 (NTC 1920), 1020, 1045, 1060 (NTC 243), modificaron su porcentaje de defectos en palanquillas producidas, frente a los cambios realizados en criterios de operación para el proceso de fabricación del acero.

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 RESEÑA HISTÓRICA**

En América, la edad de hierro llegó con la venida de las colonias europeas, las cuales tenían una cultura amplia del hierro, que además era muy antigua, por esta razón fue más fácil el dominio ejercido por los europeos a las culturas americanas menos desarrolladas, ya que las más evolucionadas se adaptaron al trabajo, organización social y políticas de los europeos. Los europeos llegaron trayendo consigo aperos, armas, herramientas de minería, artículos de lujo, cañones de bronce, cerrajería y otros objetos que los autóctonos no conocían.

En la época de la Gran Colombia se fomentó la siderúrgica y la fundición, así un grupo franco-colombiano estableció ferrerías en los actuales departamentos de Boyacá y Cundinamarca.

Entre 1920 y 1930, casi todas las siderúrgicas del país fracasaron, teniendo que importar la mayoría del hierro que se consumía. Por otra parte la fundición comenzó a imponerse en los años treinta gracias a la industrialización y expansión de la infraestructura, las cuales estimularon la fabricación de productos metálicos utilizando el método de fundición de acero en horno de arco eléctrico y trenes de laminación.

Con el comienzo de la industria automotriz, entre los años 50 y 60 se da mayor importancia a la fundición, ya que la producción de piezas fue en serie. Hoy en día la fundición sigue siendo un renglón disperso, por todas las principales ciudades

del país, en forma de medianos y pequeños talleres, dando énfasis a la fabricación de maquinaria y partes para la industria automotriz.

En el país la industria siderúrgica se perfila como una de las más prósperas debido a la gran utilidad de las estructuras de acero en todo tipo de construcciones y a las ventajas que presenta frente a otros materiales. En ACASA, al igual que otras siderúrgicas del país, existe una continua motivación hacia la optimización de los procesos en miras de aumentar la calidad de los productos y reducir costos, sin embargo, uno de los procesos en el que menos se ha trabajado es el relacionado con el enfriamiento de la palanquilla. Aunque las experiencias que se conocen en el país sobre este tipo de trabajos es casi nula; lo cual ha sido una motivación adicional para la proyección de este trabajo, además el interés de las personas a cargo de la planta por este tipo de proyectos genera un ambiente propicio para el desarrollo del mismo.

A nivel mundial existen diversos estudios sobre la refrigeración a la que se debe someter la palanquilla en el proceso de colada continua y se han establecido ya condiciones de operación de acuerdo al tipo de acería que se trabaje, sin embargo debe tenerse en cuenta que la identidad de cada proceso varía marcadamente por las condiciones de trabajo.

## **1.2 PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA**

Acerías de Caldas S.A. (ACASA), es una empresa nacida bajo los beneficios tributarios del decreto 3880 dictado por el gobierno luego de la erupción del Volcán Nevado del Ruiz el 13 de noviembre de 1985.

ACASA es una industria siderúrgica, que desde su creación en Manizales hacia el año 1992, ha estado dedicada a satisfacer las necesidades de materia prima en la construcción de maquinaria y equipos.

ACASA fue gestada por un grupo de inversionistas caldenses, iniciando operaciones el 3 de Marzo de 1992 para cubrir un mercado fomentado por otros fabricantes y por la urgencia de satisfacer necesidades de materia prima para la construcción de maquinaria y equipos, herramientas agrícolas, estructuras metálicas, torres de energía, puentes, etc., fomentando así la actividad económica de la región.

Los motivos que llevaron a este grupo de inversionistas a crear esta empresa, obedecieron a que en su área de influencia no existía ninguna empresa productora de aceros, lo cual representaba una favorable coyuntura de mercado; y fue el hecho de que una empresa gestora de ACASA sería un importante consumidor de los productos de la compañía.

Desde sus comienzos, ACASA produce piezas angulares y aceros con alto contenido de carbono, que se utilizan para la fabricación de herramientas agrícolas. Hoy, la empresa que sigue creciendo, ofrece acero para la producción de estructuras metálicas, torres de energía y telefonía celular, cubiertas para estadios y puentes; fomentando así el desarrollo de la actividad económica del país, ya que es en Colombia donde se distribuye la mayoría de sus productos.

ACASA esta ubicada en la vía termales Km. 2, la Enea, Manizales, Caldas, Colombia.

**1.2.1 Misión.** Acerías de Caldas S.A. ACASA, es una industria siderúrgica, dedicada a satisfacer las necesidades de materia prima para la construcción de herramientas, estructuras metálicas, torres de energía, puentes; fomentando así el desarrollo de la actividad económica dentro y fuera del país.

Nos hemos posicionado en el mercado cumpliendo con las normas técnicas nacionales e internacionales, como garantía de calidad y confiabilidad de nuestros

productos.

Somos un equipo humano inspirado en el conocimiento, el sentido de pertenencia y comprometidos con las necesidades del cliente.

Aunamos esfuerzos con nuestros proveedores, con quienes crecemos armónicamente, cuidando y conservando el medio ambiente y propendiendo por la exaltación de la calidad humana, el bienestar social y familiar de nuestros empleados y de la comunidad.

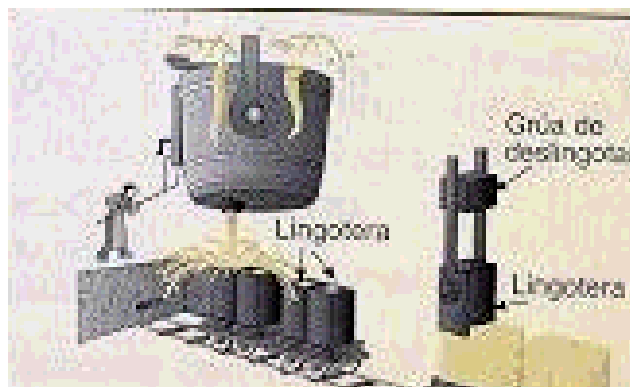
Perseguimos objetivos específicos de supervivencia, crecimiento y rentabilidad que garanticen un retorno financiero a nuestros inversionistas.

**1.2.2 Visión.** ACASA se proyecta como la siderúrgica más importante a nivel nacional en la producción y comercialización de perfiles estructurales y aceros especiales para forja, apoyándose en una excelente calidad de sus productos, en la confianza y aceptación de sus clientes y consumidores y en un continuo intercambio tecnológico a nivel nacional e internacional: todo lo anterior, buscando participar activamente en programas de expansión y crecimiento que contribuyan al desarrollo de la economía de nuestro país.

## 2. COLADA CONTINUA

Desde que se obtuvo por primera vez acero en estado líquido, hace más de doscientos años, la práctica general ha permanecido casi invariable en el tiempo. Consiste en fundirlo y modelarlo en bloques rectangulares cuya forma definitiva se obtiene en posteriores operaciones de forja y laminación en frío o en caliente. En principio estos bloques o lingotes eran de poco peso, pero a medida que se incrementó la producción de los hornos de acero, aumentó el peso producido en cada colada, así como el del mismo lingote; hoy día es corriente producir lingotes de 15 o 20 ton. (figura 1). Dichos lingotes se laminan en trenes de laminación primarios para convertirlos en palanquillas que serán moldeadas posteriormente.

**Figura 1.** Colada de acero en moldes, fabricación de tochos.



Fuente: BRIAN, Thomas. Curso Sobre Colada Continua. En: Revista Instituto Argentino de Siderurgia N° 165, p 55. Buenos Aires: IAS, Abril de 1999.

Este método de elaborar productos primarios, utilizado casi universalmente, se caracteriza por lo siguiente:

- Se invierte un fuerte capital en moldes y placas de fondo.

- Se invierte también un capital considerable en instalaciones y grúas, necesarias para el desmolde de los lingotes y reposición de lingoteras en los carros transportadores, al mismo tiempo que se necesitan hornos para calentamiento con el fin de preparar el lingote para el laminado y un tren primario para laminarlos.
- El lingote presenta segregaciones, lo cual constituye un inconveniente en cualquier acero, y necesita “mazarotas” refractarias en ciertas calidades, con la consiguiente pérdida como chatarra después de laminados en el tren primario. Cuanto mayor sea el lingote, mayor será la segregación.
- Todo lingote pierde una fracción en la parte superior y en la inferior después del laminado primario<sup>1</sup>.

Tales condiciones impulsaron a los fabricantes de acero a considerar la posibilidad de colar directamente el acero en forma de palanquilla y planchón, eliminando así buena parte de los costos de fabricación y de inmobilizaciones descritos anteriormente, al tiempo que se reducía al mínimo la pérdida de rendimiento y la segregación en el producto. Este problema denominado colada continua, se estudió durante largo tiempo y se resolvió hace muchos años para los metales no ferrosos. Las temperaturas necesarias son mucho más bajas que las exigidas por el acero; hasta hace algunas décadas se consiguió idear y aplicar a escala comercial métodos prácticos de colada continua para el acero en pequeñas secciones. Posteriormente su desarrollo ha sido rápido.

Respecto al número de líneas, la mayor máquina construida hasta ahora puede utilizar ocho líneas simultáneamente; una máquina mayor sería compleja y muy

---

<sup>1</sup> BRIAN, Thomas. Curso Sobre Colada Continua. En: Revista Instituto Argentino de Siderurgia N° 165, p 55. Buenos Aires: IAS, Abril de 1999.

costosa. Sin embargo, una vez instalada, procedería a una colada cada dos o tres horas, lo que equivale a una producción anual de 850.000 ton. Dicha producción total sería atendida por cuatro hornos que, si colaran con regularidad, alimentarían a una sola máquina. En la práctica no es posible tal sincronismo de modo que la costosa máquina o el horno, de igual costo, permanecerían inactivos a menos de disponer de una máquina de repuesto. Esto implica un desembolso de capital aún mayor.

Otro efecto importante de la colada continua es la posibilidad de reducir costos de la acería; por ejemplo, si el rendimiento del acero líquido en la cuchara al fabricar tochos o palanquillas por el método convencional es de 87 %, puede aumentar a un 95 % empleando colada continua, por lo que la acería deberá producir aproximadamente un 8% menos de acero líquido para dar el mismo peso de palanquilla. Solamente esto equivaldría a un 17 ó 27 % del costo de capital de la máquina de colada continua, según la clase de acería que se considere.

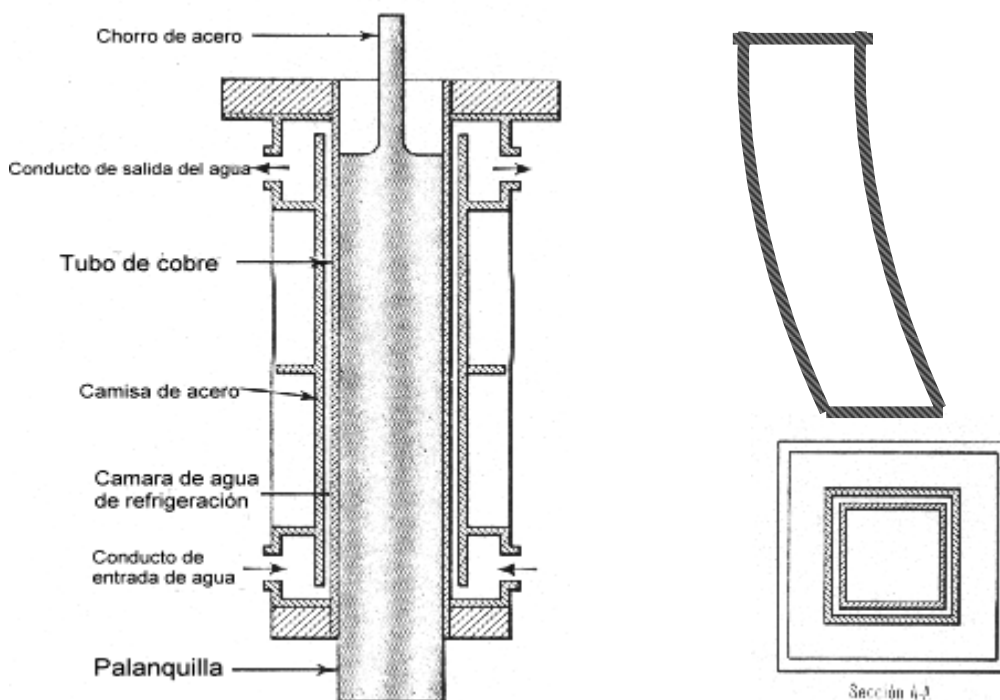
## **2.1 MÁQUINA DE PALANQUILLA DE COLADA CONTINUA**

La primera planta moderna se construyó en Alemania en 1943; fue seguida en breve por plantas a escala experimental o piloto en varios otros países. En 1953 operaba un pequeño número de plantas de producción; para 1963 más de 60 máquinas con unas 130 líneas trabajaban en varias partes del mundo y muchas más se hallaban en construcción.

La pieza clave de la operación es un molde de cobre sin fondo, refrigerado con agua, cuya forma interior es la sección transversal del producto que se desea obtener como se observa en la figura 2. Para iniciar la colada se cierra el extremo inferior del molde con un fondo postizo; a continuación se vierte el acero líquido. Cuando el molde está casi lleno, se comienza a retirar la placa del fondo, lo que se efectúa a ritmo constante, retirando con ella de la base del molde una banda de acero. Se continúa vertiendo acero líquido ininterrumpidamente por la parte

superior del molde; esta operación simultánea de introducción y extracción de acero prosigue hasta haber empleado toda la colada, convertida ahora en una banda sólida que se cortará más tarde en la medida requerida. La finalidad del molde consiste en eliminar calor suficiente del acero para producir en él una película exterior o piel de grosor adecuado, de modo que contenga con seguridad en su interior el acero aún líquido que posteriormente se solidifica. Si se deja que la banda de acero salga del molde demasiado aprisa, la corteza podría fracturarse y la ruptura originaría un derrame del líquido. Si su extracción es demasiado lenta, el rendimiento de la máquina quedaría por debajo de su capacidad y se prolongaría innecesariamente el tiempo de espera del acero líquido en la cuchara.

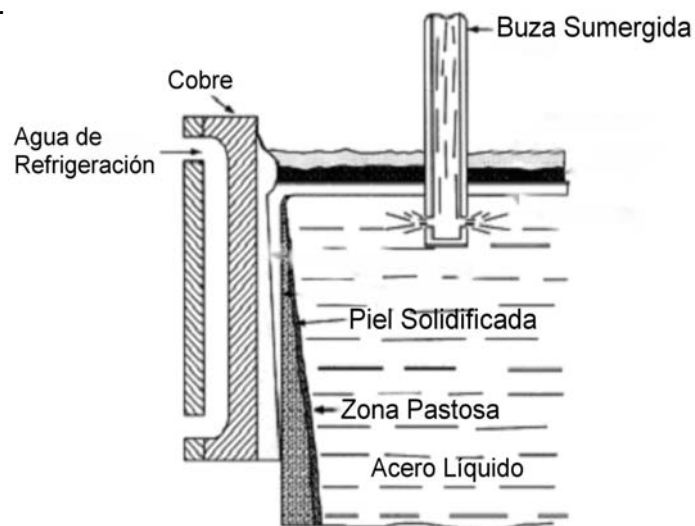
**Figura 2.** Diagrama del molde de cobre para colada continua.



Fuente: G. Eberhardt. Curso De Colada Continua. Tomo 1. Buenos Aires: IAS. 1986. 176 p.

Para comprender la función de este molde puede considerarse como lleno en una buena parte de metal en estado estacionario. Cerca del menisco de metal, el acero se encontrará en estado líquido y en íntimo contacto con las caras internas del molde. Algo más abajo se encontrará una superficie sólida de grosor creciente que, debido a la contracción, cesará en un momento dado de hacer contacto con las caras del molde y, por consiguiente será autoportante. Si ésta barra parcialmente solidificada se extrae lentamente del fondo y se vierte constantemente por la parte superior una cantidad equivalente de acero líquido, no será difícil imaginar un punto o zona donde una delgada piel de acero solidificado será presionada hacia abajo por la presión metalostática del acero líquido, ésta piel estará en íntimo contacto con las caras del molde y constituirá una junta en desplazamiento que impide los escapes de acero líquido como se observa en la figura 3.

**Figura 3.** Diagrama esquemático donde muestra la formación de la corteza solidificada.



Fuente: GILLES, Herbert L. Primary and Secondary Cooling Control (online). Available as pdf. (Pittsburg, U.S.A.), 2003.

[www.Bethlehem\\_Steel\\_Corp.com/resec\\_cons/chap\\_18.html](http://www.Bethlehem_Steel_Corp.com/resec_cons/chap_18.html)

Es fácil imaginar, por otra parte, que una excesiva presión o peso del acero líquido puede fracturar esta delgada piel metálica, produciendo, en casos extremos, escapes de acero líquido, ó, en el mejor de los casos, grietas que determinarán defectos en el producto.

Es posible utilizar un molde estacionario, pero la experiencia ha demostrado que puede aumentarse considerablemente la velocidad del trabajo sin detrimento para el producto, mediante un vaivén del molde; es decir, éste sube y baja durante la colada de una manera prefijada, con un desplazamiento específico. Casi todas las máquinas utilizan este principio denominado **Junghans**, según el nombre de su inventor.

En el método **Junghans**<sup>2</sup>, el ciclo guarda una proporción de velocidad ascendente a descendente de 3:1; la velocidad descendente es aproximadamente igual a la de la banda de acero que sale por el fondo. Durante la carrera hacia abajo, como el molde se mueve a la misma velocidad que la corteza solidificada se obtienen condiciones estáticas adecuadas a la formación de nueva corteza; en estas condiciones la superficie del producto será más firme que si se hubiera deslizado continuamente sobre la superficie del molde fijo. Finalizada su carrera descendente, el molde asciende con relativa rapidez a su punto de partida, despegando rápidamente todo a lo largo de él, la corteza formada en la previa carrera descendente. Esta carrera ascendente origina ciertos trastornos, pero las rupturas parciales tienen una oportunidad de cerrarse por una posterior solidificación sin detrimento del producto.

**2.1.1 Refrigeración secundaria.** Si consideramos el molde como una zona de refrigeración primaria, la refrigeración secundaria comienza apenas sale la barra del fondo del molde hasta la salida de la cámara de enfriamiento. En esta fase, la

---

<sup>2</sup> G. Eberhardt. Curso De Colada Continua. Tomo 1. Buenos Aires: IAS. 1986. 176 p.

barra se enfría directamente por proyección de agua sobre una superficie. En esta zona se realiza la mayor parte de extracción calorífica, del orden de 75 % del total. Se dispone varios chorros de agua que rocían todas las caras de la barra de acero sobre una longitud que depende básicamente del tamaño del producto. Se divide en tres zonas (figura 4a):

- Zona 1, parte inmediata a la salida de los moldes.
- Zona 2, comprende la zona donde se sitúa los rodillos de pie de molde.
- Zona 3, desde rodillos de pie de molde hasta enderezadores.

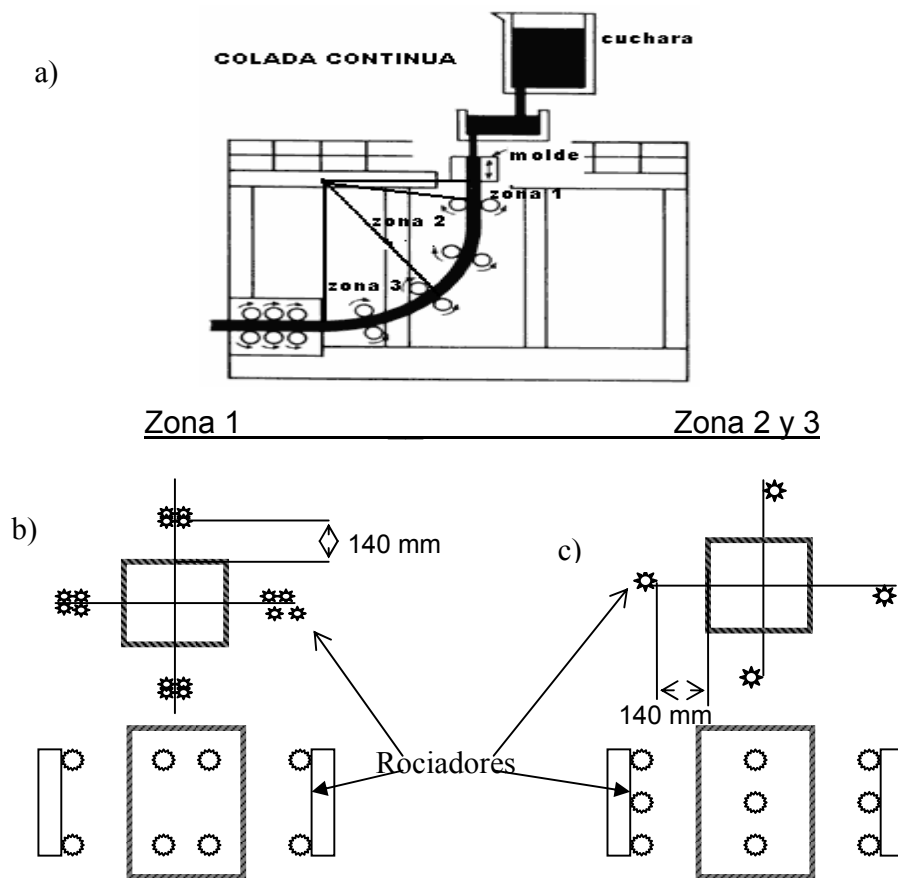
La posición de los pulverizadores es de gran importancia ya que debemos considerar que son de tipo cónico. Estas piezas han sido puestas de forma que el agua incida uniformemente sobre todo el perímetro de la palanquilla tal como de observa en las figuras 4b y 4c.

Es muy importante poder controlar perfectamente el rociado ya que las condiciones refrigerantes son muy precisas y bien adaptadas a la calidad del acero, velocidad de extracción, forma del producto y grado de refrigeración obtenido ya en cada punto. Aún serán necesarios muchos experimentos a fin de determinar las condiciones óptimas para cada planta y producto; cuando largos estudios hayan delimitado las necesidades precisas, existirá aún el problema operativo de asegurar que tales requisitos se mantengan con exactitud a pesar de cualquier variación que pueda producirse durante la colada.

La zona de refrigeración secundaria tiene por objeto proporcionar la refrigeración más rápida posible, dentro de lo que permite la obtención de un producto de buena calidad. Para comprender la operación en esta zona, es esencial recordar

que la barra sale del molde con una corteza exterior sólida, delgada y una superficie relativamente grande de líquido en su interior.

**Figura 4.** Zona de refrigeración. a) Esquema de distribución de las zonas de refrigeración secundaria. b) Diagrama de rociadores en la zona 1. c) Diagrama de rociadores en zonas 2 y 3.

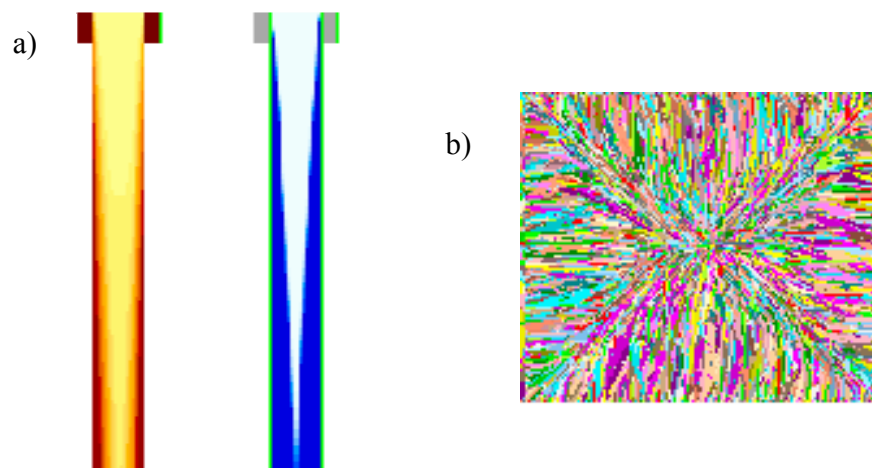


Fuente: ASPECTOS DE FABRICACIÓN Y CALIDAD DE LA OBTENCIÓN POR COLADA CONTINUA DE PALANQUILLA, REDONDOS Y OCTÁGONOS. En: revista Instituto Argentino de Siderurgia. N° 96, p 81. Buenos aires: IAS, Agosto de 1992.

La superficie líquida se solidifica a medida que la barra se mueve hacia abajo y prosigue la refrigeración, de forma que el líquido interior tendrá normalmente la

forma de un largo cono, con un vértice sólido a una distancia considerable del molde, tal como se muestra en la figura 5a. La refrigeración rápida acorta el cono líquido, reduciendo el peligro de solidificaciones fuera de lugar que originaría porosidad central o cavidades de contracción secundaria. También disminuye la segregación y produce una estructura cristalina más fina, ver figura 5b. Por otra parte, un ritmo de solidificación excesivo puede producir grandes tensiones internas originando roturas internas y externas. Para controlar la refrigeración secundaria, la zona de rociado tendrá por lo menos tres secciones regulables por separado. Las secciones de rociado superiores poseerán más boquillas por unidad de superficie que las secciones inferiores. La refrigeración desigual de la barra, además de facilitar la formación de grietas, producirá áreas cóncavas sobre la superficie donde exista refrigeración excesiva y convexas donde la refrigeración no es suficiente.

**Figura 5.** Solidificación de la palanquilla. a) Formación del cono líquido a lo largo de la palanquilla. b) Crecimiento columnar sección transversal de la palanquilla.



Fuente: S.G.R., Brown. The Numerical Simulation of Continuous and Investment Casting (online). (Lausanne, Switzerland). 2002

[www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Brown/Brown-0201.html](http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Brown/Brown-0201.html)

La importancia de la zona de refrigeración secundaria según A. Jackson<sup>3</sup> radica en:

- Que es esencial alcanzar el máximo control posible de cada sección de la zona de refrigeración y disponer de instrumentos que indiquen el funcionamiento correcto de cada una.
- Que las condiciones óptimas de refrigeración deben ser conocidas para cada calidad y tamaño de producto.
- Que debe ser posible ajustar la refrigeración a los cambios en la velocidad de colada que pudieran surgir en la práctica.

**2.1.2 Distribuidores refractarios.** No hay razón fundamental alguna por la que el acero no pueda ser vertido directamente de una cuchara con descarga por el fondo al molde de colada continua en una máquina de una sola línea. En la práctica, la tonelada de producto es menos costosa si se emplea una máquina de varias líneas en lugar de una serie de máquinas de una línea y éste es el método corriente para la producción de palanquilla. Las máquinas de una sola línea se adaptan mejor a las grandes dimensiones a causa del peso y tamaño del lingote, así como del tonelaje relativamente elevado de producción total.

En las máquinas de varias líneas, el acero de la cuchara pasará a uno o varios distribuidores que disponen de diferentes buzas para atender cada una a un molde, como se muestra en la figura 6. También es frecuente emplear distribuidores intermedios aun cuando sólo se suministre acero a una gran máquina de una línea. Los modelos de distribuidores varían desde el que dispone de cuatro buzas, cada una de las cuales suministra acero a un molde diferente,

---

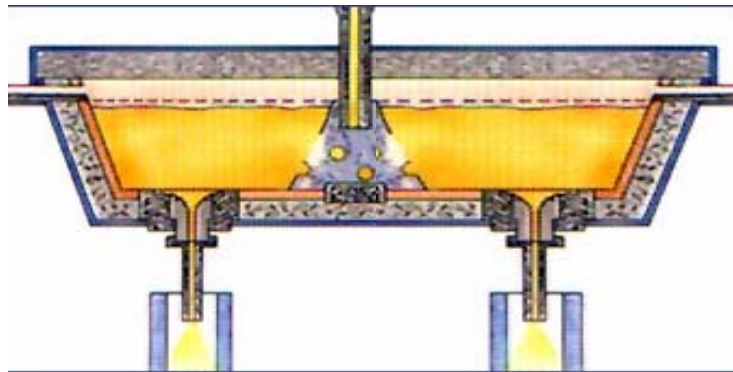
<sup>3</sup> A. JACKSON. Fabricación De Aceros Al Oxígeno. Bilbao: Ediciones URMO, 1966. 278 p

hasta otras, que pueden tener también hasta cuatro buzas pero vierten todas en un mismo molde, aunque en la actualidad, este segundo tipo no se utilice ya. El flujo de acero a través de las buzas del distribuidor se regula de una de las dos formas siguientes:

- La buza dispone de un pequeño obturador dotado a menudo de un extremo de grafito; el operario varía la altura del obturador para mantener un régimen constante de aflujo de metal al molde. El tamaño de la buza debiera calcularse de modo que se redujera al mínimo la necesidad de operar con el obturador parcialmente cerrado, a condición de que si el obturador se desgasta sea posible cambiarlo en unos pocos segundos.
- La buza está siempre abierta y no tiene obturador. La velocidad de vaciado en este caso se controla por medio del tamaño de abertura de la buza, al tiempo que se escoge un material refractario que ofrezca resistencia máxima al desgaste para una particular calidad de acero que se vierta en cualquier momento determinado. La única variante bajo control para el vaciado es la regulación del nivel del metal en el distribuidor, es decir, se llena para imprimir velocidad máxima y se reduce su nivel para reducirla. Si se ha escogido bien el tamaño y tipo de buza, y el acero es de la calidad y temperatura predeterminados, este método será muy satisfactorio; el ligero desgaste de la buza permite que el acero sea vertido algo más rápidamente a medida que desciende la temperatura. Su acción puede también aumentarse elevando el nivel del acero en el distribuidor. En ocasiones surgen algunas dificultades:
  - ✓ La buza se desgasta más rápidamente de lo previsto, por lo que a pesar de rebajar el nivel del acero en el distribuidor, la velocidad de vaciado al molde es aún demasiado grande y se produce la rotura.

- ✓ La escoria, bien sea de la cuchara o de los productos desoxidantes, se concentra sobre la superficie del acero en el distribuidor y cuando se hace descender su nivel para controlar la velocidad de vaciado, es absorbida por el remolino que se forma por encima de la buza; entonces o se concentra sobre la superficie de la barra, si está en pequeña cantidad, u origina una rotura bajo el molde si se concentra en cantidad considerable.

**Figura 6.** Esquema de un distribuidor con dos líneas de colada.



Fuente: FIBRETECH. Applications Continuous Casting (online). 2004  
[http://www.fibretech.com/refractories\\_steel\\_\\_datasheet\\_continuous\\_tundish.htm](http://www.fibretech.com/refractories_steel__datasheet_continuous_tundish.htm).

El efecto de la escoria absorbida por el remolino puede contrarrestarse en gran parte con la construcción de un puente refractario entre el chorro de entrada del metal y la buza; aun así no se vence la dificultad si la buza se desgasta más rápidamente de lo esperado. Una máquina que cuela planchones de 20 cm. de espesor tiene un distribuidor con una buza permanentemente abierta y una segunda cerrada por el obturador. La velocidad de extracción del planchón se regula a una velocidad constante predeterminedada que depende esencialmente de la temperatura del acero al iniciarse la colada. La buza se abre y cierra según sea necesario con objeto de conservar aproximadamente constante el nivel de acero en el molde. Este método proporciona un control excelente pero sólo es posible para los productos de gran tamaño.

**2.1.3 Suministro de acero líquido.** El precalentamiento constituye otro problema. En la producción normal del lingote se utilizan cucharas un tanto caldeadas, pero rara vez se calientan a altas temperaturas. No obstante, en la colada continua el tiempo de vaciado del acero suele ser muy superior al empleado en una colada convencional, aparte de que el acero es sometido a una refrigeración adicional, puesto que tiene que recorrer vertederos de conducción o repartidores antes de llegar al molde propiamente dicho. De emplear una cuchara fría este calor adicional deberá producirse en el horno, lo que puede originar considerables costos extraordinarios ocasionados por los factores siguientes:

- En los procedimientos de soplado de oxígeno la elevación de la temperatura reduce el rendimiento metálico, aumenta el consumo de oxígeno y acorta la duración del refractario.
- En el método de solera abierta la temperatura adicional habrá de obtenerse cuando el horno se encuentra a su mínimo rendimiento térmico y se acerca ya a la máxima temperatura posible. El resultado es un aumento en el tiempo de colada a colada, acentuado desgaste del horno cuando trabaja a temperatura máxima y aumento en el consumo de combustible.
- En el horno de arco, aunque esto no ofrezca probablemente dificultades mayores (porque habitualmente se tiene amplia posibilidad de elevar la temperatura del baño muy rápidamente momentos antes del vaciado, aminorando así el desgaste y deterioro del horno) aún sigue siendo preciso utilizar más tiempo y más energía.

Todas estas pérdidas apoyan el principio de calentar previamente el refractario de la cuchara a una temperatura relativamente alta con anterioridad al sangrado del horno; este método es menos gravoso para el costo del producto que el de generar calor adicional en el horno. El grado de precalentamiento necesario es

variable. Si la cuchara sólo contiene unas pocas toneladas y tiene que colar pequeñas secciones puede ser calentado con ventaja, o quizás por necesidad, a 1.400 °C o más. Sin embargo, si la cuchara tiene una capacidad de 100 ton. será suficiente un corto pero eficaz calentamiento a 700 °C y evitar el costo de calentamiento adicional en el propio horno de la fabricación de acero.

Es también necesario mantener al máximo el calor del acero en la cuchara durante el vaciado a causa del valor económico que supone una duración de colada más larga en el costo de la máquina. En una cuchara con descarga por el fondo, apenas si puede hacerse otra cosa que calentar previamente la cuchara y cubrir la superficie del metal con una capa aislante de escoria u otro material apropiado. También pueden aplicarse quemadores sobre la superficie del metal, pero, de hecho, no representan ventaja alguna y contribuyen a limitar el tiempo máximo de vaciado de dicha cuchara a 45 minutos. Con una cuchara que vierta por el borde, puede aplicarse sobre la superficie del metal una llama intensa que normalmente estará muy próxima al punto de salida por el que se vierte el acero. Es indudable que el acero se calentará de esta forma y que cualquier película solidificada que se forme lo hará en el fondo de la cuchara, donde no afecta para nada al vaciado.

### 3. ASPECTOS METALÚRGICOS

La fabricación de acero para ser colada en continuo sólo se diferencia del proceso normal en que exigía una mayor temperatura de vaciado. Esto tiende a introducir efectos secundarios que será preciso vigilar; por ejemplo, el acero tenderá a estar más gaseado, las escorias más fluidas, el carbono descenderá algo más rápidamente y la refosforización será algo más probable. Se necesita una temperatura superior a la normal porque el período de colada será más largo, sobre todo con las cucharas que vierten por el borde; se requiere mayor fluidez porque el acero tiene que pasar a lo largo de varios pequeños canales en bordes, regueras, artesas y buzas; si la temperatura del acero en el molde no es lo bastante alta puede producirse la “solidificación”<sup>4</sup> de la superficie del producto.

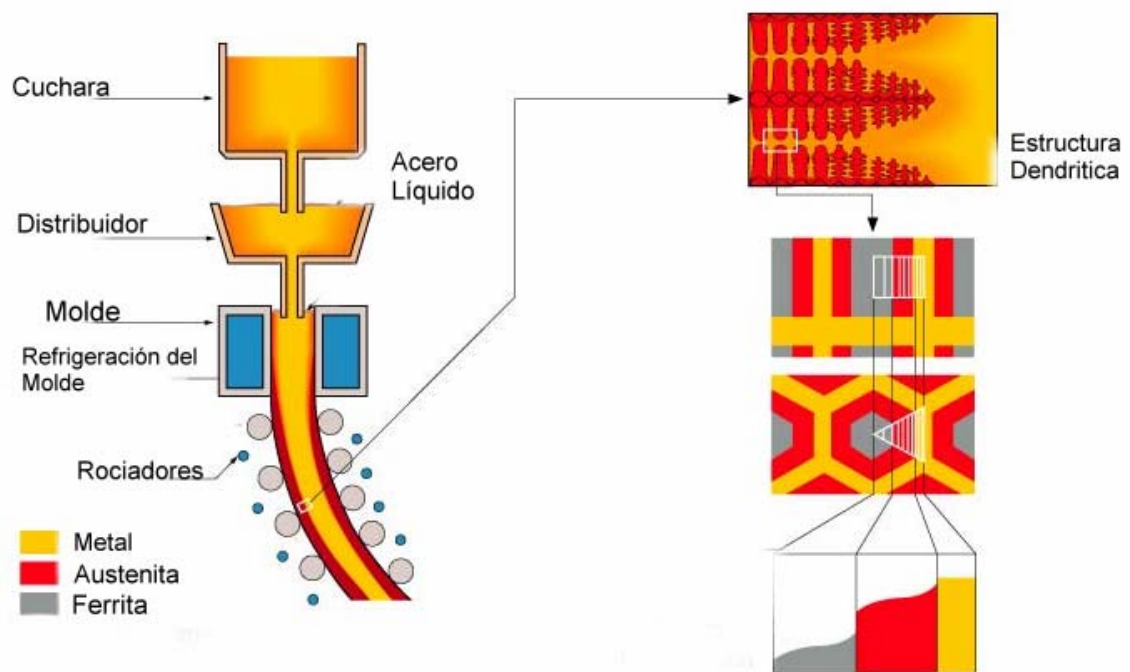
La temperatura real de vaciado depende esencialmente de la calidad de acero que se fabrique pero, sobre todo, del contenido en carbono. Para cada tipo de máquina de colada continua, cada calidad de acero y cada tamaño del producto, existirá una temperatura correcta de vaciado, un régimen exacto de colada y condiciones adecuadas de refrigeración primaria y secundaria. Una vez establecidas las condiciones óptimas en una planta determinada, será preciso atenerse a ellas estrictamente en toda ocasión si se desea producir un producto uniformemente bueno. Las máquinas que producen palanquilla pequeña exigirán los márgenes más altos de temperatura de vaciado porque la cuchara será pequeña, al igual que los canales y distribuidores, que transportan pequeñas cantidades de acero. En cambio, un convertidor pequeño soplado por oxígeno, que produzca planchones, no precisará una temperatura de colada muy superior a la exigida en la colada convencional.

---

<sup>4</sup> THE METALS SOCIETY. Solidification and Casting of Metals. New York: 1979.

La estructura interior de un producto colado en caliente está estrechamente relacionada con la de un lingote normal. Su corteza exterior será de grano fino debido al rápido enfriamiento al contacto con el molde frío; su interior está formado por cristales alargados, posiblemente con cristalización equiaxial en el centro. La estructura cristalizada en las zonas columnar y central es más fina que la estructura de un lingote, mientras que la segregación es menos intensa a causa sobre todo del rápido ritmo de refrigeración, tal como aparece en la figura 7.

**Figura 7.** Esquema de solidificación en colada continua del acero.



Fuente: CEMES. Casting processes. (Online). (Lyon, France).2001  
<http://tmp.cma.fr/tmp/img-tmp/ppt-tmp/Casting.html>

En casi todos los productos obtenidos por colada continua se observarán unas leves señales onduladas debidas al movimiento alternativo del moldeo. A primera vista, las personas acostumbradas a examinar tochos laminados, considerarán la apariencia de tal superficie con considerable recelo en cuanto al futuro producto;

de hecho tales señales no tienen consecuencias graves y desaparecen rápidamente y sin dejar rastro al laminar el semiproducto.

### **3.1 TEMPERATURA DE LIQUIDUS PARA EL ACERO**

Casi todas las calidades de acero se pueden producir con éxito en la máquina de colada continua. Naturalmente los sistemas de distribución del acero líquido tienen que ser diseñados correctamente y racionalmente para que el proceso cumpla con el propósito de obtener aceros de alta calidad.

El acero debe prepararse apropiadamente y traerse en la cuchara a la temperatura correcta donde puede calcularse la temperatura de liquidus usando los coeficientes basados de la composición química en su porcentaje de peso. Los datos se obtienen de Roeser y Wensel<sup>5</sup> donde muestran la variación de la temperatura del líquido en grados centígrados (°C) en función del porcentaje de carbono en el acero. El anexo A muestra un diagrama de la temperatura del liquidus aproximada como una función del porcentaje de Carbono (% C) en una Aleación con Fe sólo.

La temperatura de acero en el distribuidor debe ser necesariamente más alta que la temperatura de liquidus. Los valores aumentados de temperatura por encima de liquidus actualmente usados en la industria son los siguientes:

- De 20 a 40 °C para los aceros normales.
- De 10 a 20 °C para aceros especiales y de alta calidad.

---

<sup>5</sup> CONTINUOUS CASTING OF STEEL. Some Principles and Practical Notes. Udine, Italia: Select Technological Supplies, 1993. 84 p.

**Tabla 1.** Diagrama de porcentajes de carbono y elementos aleantes con su factor de corrección para temperatura de liquidus.

Elemento	Porcentajes	Factor de corrección
Carbono -C-	0.0 – 0.5 %	65
	0.5 – 1.0 %	70
	1.0 – 2.0 %	75
Fósforo -P-	0.0 – 0.07 %	30
Azufre -S-	0.0 – 0.08 %	25
Estaño -Sn-	0.0 – 0.03 %	10
Silicio -Si-	0.0 – 3.0 %	8
Manganeso -Mn-	0.0 – 1.5 %	5
Cobre -Cu-	0.0 – 0.3 %	5
Níquel -Ni-	0.0 – 9.0 %	4
Molibdeno -Mo-	0.0 – 0.3 %	2
Cromo -Cr-	0.0 – 18 %	1.5
Aluminio -Al-	0.0 – 1.0 %	0

Fuente: CONTINUOUS CASTING OF STEEL. Some Principles and Practical Notes. Udine, Italia: Select Technological Supplies, 1993. 84 p

La ecuación para encontrar la temperatura de liquidus viene dada por:

**T. liquidus (°C) =** 1539 - factor C\*(%C) -factor P\*(%P) -factor S\*(%S) - factor Sn\*(%Sn) - factor Si\*(%Si) - factor Mn\*(%Mn) - factor Cu\*(%Cu) - factor Ni\*(%Ni) - factor Mo\*(%Mo) - factor Cr\*(%Cr) - factor Al\*(%Al).

La temperatura del acero en la cuchara debe calcularse teniendo en cuenta las pérdidas de temperatura entre la cuchara y el distribuidor que son normalmente entre 40 y 60 °C. Se debe verificar en la práctica los resultados reales de pérdidas para cada planta.

En cucharas equipadas con tapa se asegura el funcionamiento de la ecuación de temperatura de liquidus, manteniendo las temperaturas bajas y constantes, reduciendo al mínimo las pérdidas de temperatura. Las reglas más elementales a

ser seguidas para obtener un acero de calidad, manteniendo el modelo de temperatura de liquidus, condiciona al proceso de colada continua a que incluya los siguientes parámetros:

- La proporción del manganeso/azufre debe ser superior a 20 (los valores inferiores producirán un valor de alargamiento en caliente casi nulo, entre 1100 °C y 1300 °C con el peligro de grietas exteriores).
- La proporción del manganeso/silicio debe ser superior a 3 sobre todo en los aceros por debajo de 0.20% de Carbono (más de 0,20% C la proporción puede reducirse a 2.5), los valores más bajos producirían más impurezas debido a la formación de escoria por la acción del oxígeno libre sobre el Mn y Si, pero sobre todo en Si, producido por la baja de temperatura entre la cuchara y el distribuidor y el distribuidor y el molde. Los valores de proporción más baja, puede contribuir a la formación de defectos bajo la piel (porosidad).
- Los valores de aluminio altos producen en las buzas de circón un taponamiento, los límites prácticos seguros son los siguientes:
  - ✓ Porcentaje de aluminio en las buzas: 0,002% a 0,003%.
  - ✓ Porcentaje de aluminio en las buzas sumergidas: 0,005%.
  - ✓ Porcentaje de aluminio en el tapón de las buzas: 0,09%.

### **3.2 SOLIDIFICACIÓN**

La importancia de clarificar las condiciones de solidificación de la palanquilla durante su formación en la máquina de colada continua, establece una relación entre la profundidad de la piel refrigerada en varios lugares de la máquina de

colada y la profundidad de la fase líquida (profundidad del cono), a las condiciones que opera la planta, es decir la proporción de velocidad de colada, condiciones de refrigeración y otros factores. Esto es de gran importancia para una producción óptima de la máquina de colada.

La solidificación en el molde de colada es un proceso muy complejo. El modelo de la solidificación en el molde se caracteriza por la formación de la piel sólida que aumenta como una función de tiempo y que puede calcularse con la llamada regla de la raíz cuadrada o ley de **Lighfoot**.<sup>6</sup>

$$S = k\sqrt{t}$$

S: espesor de la piel solidificada, en milímetros.

K: constante de solidificación.

T: tiempo, en minutos.

Para conocer la distancia total de solidificación de la palanquilla se utiliza otro concepto fundamental, donde la distancia metalúrgica es crítica para que la formación de defectos sea minimizados en aumento de la calidad del producto. Esta relación se basa fundamentalmente en el área de la palanquilla y la velocidad de colada:

$$L = \frac{A^2}{4k^2} V$$

L: distancia de solidificación total, en metros.

---

<sup>6</sup> KP., Korotkov, HP. Mayorov, AA Skvortsov y AD Akimenko. The Continuous Casting of Steel Commercial Uses. London: Pergamon Press. 1960. 171 p

A: tamaño del cuadrado, o diámetro del redondo, o espesor del rectángulo, en milímetros.

V: velocidad de colada, en metro / minuto.

k: constante de solidificación.

Los valores de k normalmente utilizados se encuentran entre 23 y 31. Estos valores necesarios para la solidificación de la palanquilla dependen principalmente de la forma, en donde:

- Para formas rectangulares y cuadradas,  $k = 28$ .
- Para redondos,  $k = 31$ .

Es conveniente considerar las características individuales en la secuencia de las siguientes etapas de solidificación:

- Formación inicial de la piel en el menisco.
- Progreso de la formación de la piel en el molde.
- Transición desde el molde hacia la zona de enfriamiento secundario.

**3.2.1 Formación inicial de la piel.** La formación de la piel se inicia exactamente en el menisco. El grado de solidificación depende de la intensidad del flujo local de calor y de un mayor enfriamiento, la piel puede resistir la presión metalostática y contraerse libremente. De este mecanismo depende la calidad de la superficie.

La contracción de la piel reduce el área de contacto entre la superficie de la línea y la pared del molde, lo que redundará en un crecimiento disparejo de la piel y en

estructuras de solidificación irregulares con tendencia al agrietamiento en la superficie y bajo ella. Con la piel contraída también aumenta el riesgo de atrapar las burbujas de gas flotantes y que se produzcan macroinclusiones en este lugar.

Uno de los objetivos para optimizar el proceso, sería una reducción del flujo local de calor en el área del menisco para un mejor contacto entre la línea y el molde.

La solución ideal sería una barrera local en el área del menisco. La formación de la piel puede retardarse con un sobrecalentamiento entre 20 y 40 °C que también beneficia la limpieza del acero debido al aumento de flotación de macroinclusiones. Sin embargo un sobrecalentamiento mayor tendría efectos sobre costos de energía, duración de refractarios y seguridad de derrames.

### **3.3 PROCESOS Y ACABADOS EN LAMINACIÓN**

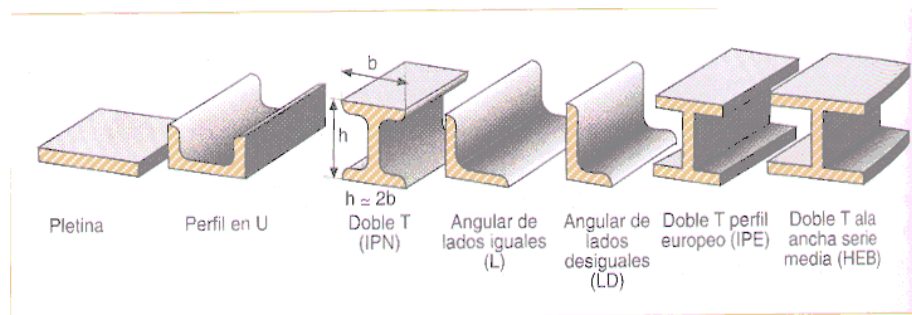
La laminación del acero es la deformación plástica de los metales o aleaciones, realizada por la deformación mecánica entre cilindros.

Existen distintos tipos de acabados para el acero, por lo tanto, tiene una salida al mercado de gran variedad de formas y de tamaños, como varillas, tubos, rieles de ferrocarril o perfiles en H o en T, como se muestra en la figura 8. Estas formas se obtienen en las instalaciones siderúrgicas laminando los lingotes calientes o modelándolos de algún otro modo. El acabado del acero mejora también su calidad al refinar su estructura cristalina y aumentar su resistencia.

El método principal de trabajar el acero se conoce como laminado en caliente. En este proceso, el lingote colado se calienta en un horno donde las palanquillas o tochos, se elevan a una temperatura entre los 900°C y los 1.200°C. Estas se calientan con el fin de proporcionar ductilidad y maleabilidad para que sea más fácil la reducción de área a la cual va a ser sometido. Durante el proceso de calentamiento de las palanquillas se debe tener en cuenta:

- Una temperatura alta de calentamiento del acero puede originar un crecimiento excesivo de los granos y un defecto llamado “quemado” del acero que origina grietas que no se pueden eliminar.
- Una temperatura baja de calentamiento origina la disminución de la plasticidad del acero, eleva la resistencia de deformación y puede originar grietas durante la laminación.

**Figura 8.** Productos terminados por laminado en caliente.



Fuente: MORRAL, Fr.; JIMENO, E. y MOLERA, P. Metalurgia General. Tomo 1. Barcelona: Reverté S.A., 1982. 245 p

Por tanto la temperatura óptima de trabajo no es un solo valor, sino que varía en cierto rango de temperatura entre un límite superior y un límite inferior. En la siguiente etapa se hace pasar entre una serie de rodillos metálicos colocados en pares que lo aplastan hasta darle la forma y tamaño deseado. La distancia entre los rodillos va disminuyendo a medida que se reduce el espesor del acero.

El primer par de rodillos por el que pasa el lingote se conoce como tren de desbaste o de eliminación de asperezas. Después del tren de desbaste, el acero pasa a trenes de laminado en bruto y a los trenes de acabado que lo reducen a

láminas con la sección transversal correcta. Los rodillos para producir rieles de ferrocarril o perfiles en H, en T o en L tienen estrías para proporcionar la forma adecuada.

Los procesos de fabricación modernos requieren gran cantidad de chapa de acero delgada. Los trenes o rodillos de laminado continuo producen tiras y láminas con anchuras de hasta 2,5m. Estos laminadores procesan con rapidez la chapa de acero antes de que se enfríe y no pueda ser trabajada. Las planchas de acero caliente de más de 10 cm. de espesor se pasan por una serie de cilindros que reducen progresivamente su espesor hasta unos 0,1 cm. y aumentan su longitud de 4 a 370 metros. Los trenes de laminado continuo están equipados con una serie de accesorios como rodillos de borde, aparatos de decapado o eliminación y dispositivos para enrollar de modo automático la chapa cuando llega al final del tren.

#### **4. DEFECTOS EN PRODUCTOS DE COLADA CONTINUA**

Los defectos se forman durante el proceso de solidificación y pueden desarrollarse dentro de la palanquilla o en su superficie. La mayoría de las veces los defectos tienen una influencia negativa en la producción, ya que esta se convierte en chatarra o en un aumento de los costos de producción, debido a la necesidad de acondicionar las palanquillas antes de pasar por el proceso de laminación.

La preocupación es la formación de grietas, tanto longitudinales como transversales, que pueden producir rupturas debajo del molde durante la colada. Las grietas superficiales transversales, rara vez constituyen un problema grave, puede producirse si el líquido se pega al molde, ya sea porque éste se encuentra deformado, porque la lubricación es inadecuada, o porque el doblado durante la extracción es demasiado brusco, especialmente con ciertas calidades de acero.

La probabilidad de agrietamiento interno aumenta con la temperatura en la operación de vaciado. Un defecto difícil de eliminar por completo, es la formación de poros de gas en la superficie que, si son de importancia, pueden degenerar en “costuras”, grietas cerradas pero no soldadas. Puede deberse a una lubricación excesiva o a la presencia de agua en el aceite, a una insuficiente desoxidación del acero y posiblemente también a que el producto es alto en hidrógeno. La aparición de poros de gas disminuye aumentando la adición de aluminio.

Las inclusiones, tanto en el acero como en la superficie del metal, pueden atribuirse a malas condiciones del horno, a escorias oxidantes, a un acero intrínsecamente sucio o al empleo de refractarios inadecuados.

La porosidad central procede de la formación de puentes en el líquido interior, lo que se debe por lo general a una refrigeración secundaria incorrecta que, si la

máquina funcionaba en un principio satisfactoriamente, puede ser consecuencia de cambios de velocidad introducidos durante la operación sin que se regulara simultáneamente el flujo de agua en diversas fases de los refrigeradores secundarios.

La siguiente es la clasificación de los defectos más comunes que intentan dar una guía para su solución. La tabla 2 muestra una introducción al análisis del defecto mostrando los principales elementos influenciados y las áreas del proceso.

Los defectos producidos en colada continua, son generalmente divididos en tres grupos principales:

- Los defectos superficiales.
- Los defectos internos.
- Los defectos de forma.

Varios de los elementos no deseados se presentan como impurezas y pueden ser la causa de defectos, según los ejemplos a continuación:

- Cobre, estaño, plomo, Como: grietas en la superficie.
- Oxígeno, azufre: inclusiones no metálicas.
- Azufre, fósforo: grietas internas o bajo la piel de las palanquillas y segregación interna.
- Oxígeno, nitrógeno, hidrógeno: porosidad superficial, y porosidad internas.

**Tabla 2.** Influencia de los procesos en la calidad de la palanquilla.

ETAPA DEL PROCESO	CAUSA	ÁREA DE INFLUENCIA		
		INCLUSIONES	DEFECTOS SUPERFICIALES	DEFECTOS INTERNOS
Distribuidor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de acero</li> <li>• Buza sumergida entre cuchara y distribuidor</li> <li>• Forma y capacidad</li> <li>• Alineado del refractario</li> <li>• Tapa</li> <li>• Buza (forma, chorro de protección)</li> </ul>	* *  * * * *	*   * * *	*     *
Molde	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma y geometría</li> <li>• Oscilación</li> <li>• Lubricación</li> <li>• Control del polvo lubricador</li> <li>• Calidad del polvo</li> <li>• Análisis del acero y solidificación</li> <li>• Nivel de control</li> <li>• Alineación de los rodillos guía</li> </ul>		* * * *  * * *	     *  *
Refrigeración secundaria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo y control de la refrigeración secundaria</li> <li>• Temperatura de la superficie</li> <li>• Análisis del acero y modelo de solidificación</li> <li>• Convección</li> <li>• Alineación y geometría de las guías</li> </ul>		*  *	*  *  * *
Rodillos enderezadores y de extracción				*

Fuente: CONTINUOUS CASTING OF STEEL. Some Principles and Practical Notes. Udine, Italia: Select Technological Supplies, 1993. 84 p

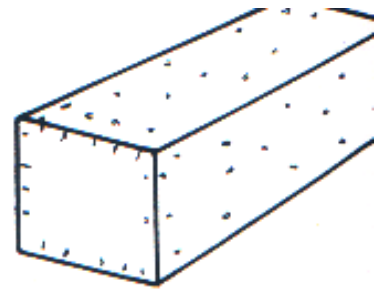
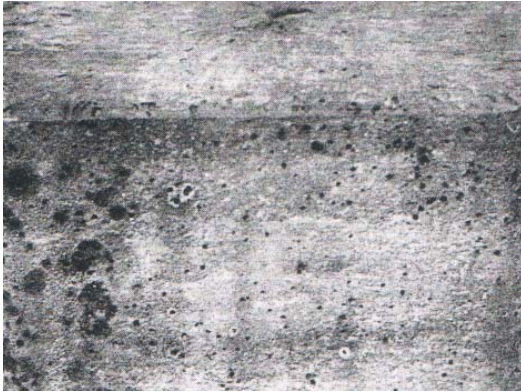
## **4.1 DEFECTOS SUPERFICIALES**

### **4.1.1 Porosidad superficial y subcutánea (pinholes).**

- Identificación del defecto. Este defecto es frecuente y solamente visible después de un acondicionamiento superficial por granallado o arenado y esmerilado.
  
- Posibles causas.
  - Desoxidación insuficiente del acero.
  
  - Alto contenido de gases (oxígeno, nitrógeno, hidrógeno).
  
  - Excesivo aceite de lubricación en el proceso de colada.
  
- Otras causas asociadas. Uso de nitrógeno en la agitación.
  
- Soluciones sugeridas.
  - Mejorar el proceso de afino del acero (desoxidar).
  
  - Usar protección del chorro de acero líquido entre cuchara-distribuidor y entre distribuidor-molde.
  
  - Usar aluminio en alambre durante la colada en el molde.
  
- Solución por acondicionamiento. Acondicionamiento parcial o total de la superficie de la palanquilla por esmerilado.
  
- Posibles defectos producidos en laminación.
  - Grietas a lo largo de la superficie en alambres.
  
  - Defectos en los productos maquinados en frío.

En la figura 9 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 9.** Porosidad superficial y subcutánea, en palanquillas.



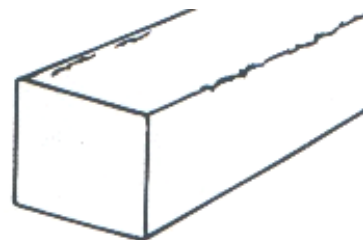
#### **4.1.2 Grieta longitudinal en la esquina de la palanquilla.**

- Identificación del defecto. Fácilmente detectable después de granallado.
  
- Posibles causas.
  - Lingotera deteriorada por el uso.
  
  - Radio de curvatura muy grande en la esquina de la lingotera.
  
  - Temperatura de vaciado muy alta.
  
  - Exceso de enfriamiento en el molde o enfriamiento no uniforme.
  
- Otras causas asociadas.
  - Alto nivel de impurezas (S, P, As, Sn, Sb).
  
  - Alta velocidad de colada.

- Depósitos sobre superficie externa de la lingotera.
- Soluciones sugeridas.
  - Reemplazar el molde.
  - Revisar geometría del molde.
  - Revisar temperatura de vaciado.
  - Revisar alineación de la máquina.
- Solución por acondicionamiento. Acondicionamiento es requerido para poder usar la palanquilla.
- Posibles defectos producidos en laminación. Grietas superficiales profundas y largas en el producto laminado.

En la figura 10 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 10.** Grietas longitudinales en las esquinas, en palanquillas.



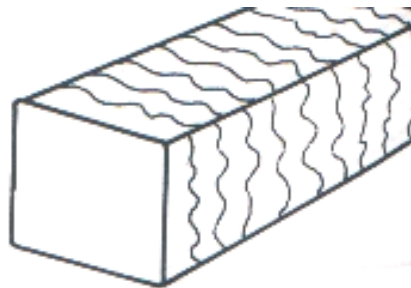
#### **4.1.3 Marcas de oscilación.**

- Identificación del defecto. Visibles en la superficie de la palanquilla, se observa mejor después de un granallado.
  
- Posibles causa.
  - Bajo contenido de carbono en el acero.
  
  - Exceso de conicidad en el molde.
  
  - Choques del molde a lo largo de la oscilación.
  
  - Relación no apropiada entre frecuencia de oscilación y velocidad de colada.
  
  - Oscilaciones irregulares.
  
  - Lubricación incorrecta del molde.
  
- Otras causas asociadas.
  - Lingotera deteriorada por el uso.
  
  - Baja velocidad de colada.
  
  - Baja velocidad de vaciado.
  
- Soluciones sugeridas.
  - Revisar oscilaciones, tanto los movimientos mecánicos como la correcta relación entre amplitud y frecuencia.
  
  - Revisar lubricación del molde.

- Solución por acondicionamiento. El acondicionamiento por esmerilado es necesario para los aceros especiales e inoxidables.
- Posibles defectos producidos en laminación.
  - Raras veces las marcas de oscilación causarían defectos superficiales en los productos laminados.
  - Algunas veces dependiendo de la profundidad de las marcas se pueden convertir en pequeñas grietas.

En la figura 11 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 11.** Marcas de oscilación, en palanquillas.



## **4.2 DEFECTOS INTERNOS**

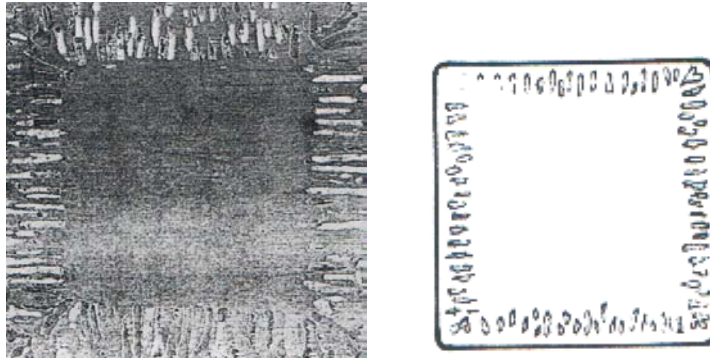
### **4.2.1 Porosidad interna (blowholes).**

- Identificación del defecto. Fácilmente detectable después de un corte transversal de la palanquilla.
- Posibles causa.

- Desoxidación no apropiada del acero.
  - Presencia excesiva de hidrógeno debido a un secado deficiente del revestimiento de la cuchara.
  - Enfriamiento primario inadecuado.
- Soluciones sugeridas.
- Desoxidar mejor el acero.
  - En la mayoría de los casos el problema se soluciona con la adición de aluminio en alambre durante la colada en el molde a razón de 150 gr/ ton. de acero.
- Solución por acondicionamiento. Inútil.
- Posibles defectos producidos en laminación.
- Estos defectos pueden expandirse durante la laminación causando grietas en el producto final.
  - Cuando son pequeños y en poca cantidad normalmente quedan soldados durante la laminación.

En la figura 12 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 12.** Porosidad interna, en palanquilla.



#### **4.2.2 Grietas tipo estrella.**

- Identificación del defecto. Fácilmente detectable, después de macroataque.
- Posibles causa. Enfriamiento secundario muy alto o irregular.
- Otras causas asociadas.
  - Boquillas de rociadores en refrigeración no alineadas.
  - Boquillas de rociadores en refrigeración tapadas.
  - Canal guía desalineado.
- Soluciones sugeridas.
  - Revisar el enfriamiento secundario.
  - Revisar boquillas de los rociadores.
  - Revisar canal guía.
- Solución por acondicionamiento. Inútil.

- Posibles defectos producidos en laminación. Origina defectos cuando el semiproducto es usado en forja y laminado en caliente.

En la figura 13 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 13.** Grieta estrella, en palanquilla.



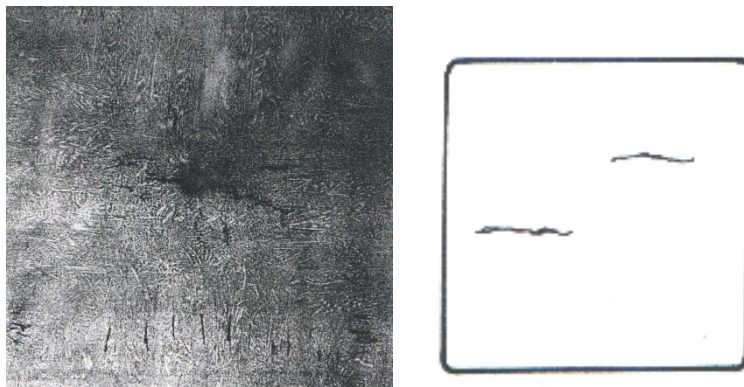
#### **4.2.3 Grietas centrales.**

- Identificación del defecto. Visible después de macroataque.
- Posibles causa.
  - Composición química.
  - Presión muy alta en enderezadores.
  - Temperatura de vaciado muy alta.
  - Velocidad de colada muy alta.
- Otras causas asociadas. Excesivo o irregular enfriamiento secundario.
- Soluciones sugeridas.
  - Revisar temperatura de vaciado.

- Reducir velocidad de colada.
  - Reducir la presión de los rodillos extractores.
- Posibles defectos producidos en laminación. Se generan problemas cuando la palanquilla es cortada por oxicorte.

En la figura 14 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 14.** Grietas centrales, en palanquillas.



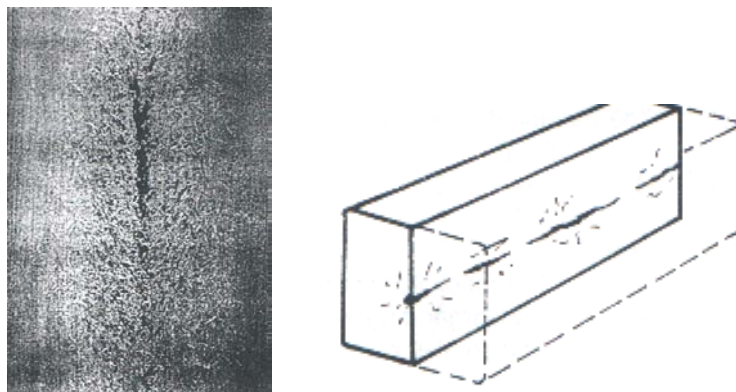
#### **4.2.4 Cavidad o porosidad en el centro de la palanquilla.**

- Identificación del defecto. Visible después de macroataque.
- Posibles causa.
- Debido a la alta temperatura del acero o excesiva variación en la velocidad de colada.
  - Temperatura de vaciado muy alta.
- Otras causas asociadas.

- Alto contenido de carbono en el acero.
- Enfriamiento secundario excesivo.
- Soluciones sugeridas.
  - Colar a la temperatura más baja posible.
  - Mantener constante la velocidad de colada.
  - Revisar las boquillas de los rociadores de refrigeración.
- Solución por acondicionamiento. Generalmente desaparece cuando la reducción en laminación es alta.
- Posibles defectos producidos en laminación. Estas grietas pueden causar defectos en las palanquillas laminadas en caliente.

En la figura 15 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 15.** Porosidad en el centro de la palanquilla.



### **4.3 DEFECTOS DE FORMA**

#### **4.3.1 Romboides: desigualdades entre las diagonales de la palanquilla**

- Identificación del defecto. Fácilmente detectable, a simple vista.
  
- Posibles causas.
  - Enfriamiento primario y secundario no uniforme.
  
  - Alta velocidad de colada.
  
  - Alta temperatura del acero.
  
  - Alineación incorrecta.
  
  - Guía de rodillos insuficientes.
  
- Otras causas asociadas. Frecuente variación en la velocidad de colada.
  
- Soluciones sugeridas.
  - Revisar el enfriamiento primario y secundario.
  
  - Revisar temperatura del acero.
  
  - Revisar alineación de la máquina.
  
- Posibles defectos producidos en laminación.
  - Romboides superior al 5% puede causar dificultades en laminación.
  
  - La romboides viene asociada con grietas en los ángulos obtusos.

Para calcular el porcentaje de romboides se utiliza la siguiente relación:

$$R = \frac{D-d}{D} * 100$$

R: romboides.

D: diagonal mayor.

d: diagonal menor.

En la figura 16 se muestra una fotografía y un esquema ilustrativo, de este tipo de defecto.

**Figura 16.** Romboides, en palanquilla.



#### **4.3.2 Concavidad: distorsión cóncava en una o más caras de la palanquilla**

- Identificación del defecto. Fácilmente detectable, a simple vista.
- Posibles causas. Enfriamiento secundario no uniforme.
- Otras causas asociadas. Alta velocidad de colada.
- Soluciones sugeridas.
  - Revisar el enfriamiento secundario.

- Revisar el flujo de agua en los rociadores.
- Posibles defectos producidos en laminación. Estos defectos vienen frecuentemente asociados con grietas internas.

En la figura 17 se muestra un esquema de este defecto.

**Figura 17.** Concavidad, en palanquillas.



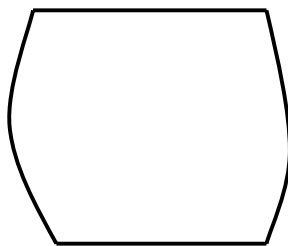
#### **4.3.3 Convexidad: distorsión convexa en una o más caras de la palanquilla**

- Identificación del defecto. Fácilmente detectable, a simple vista.
- Posibles causas.
  - Debido a la presión metalostática, cuando la piel delgada del acero se deforma al solidificarse.
  - Alta velocidad de colada.
  - Alta temperatura del acero.
  - Pie de rodillos no guiados efectivamente.
- Otras causas asociadas. Insuficiente enfriamiento primario y secundario.
- Soluciones sugeridas.
  - Revisar velocidad de colada.

- Revisar temperatura del acero.
  - Revisar el flujo de agua en los rociadores.
  - Revisar pie de rodillos usados en el molde.
- Posibles defectos producidos en laminación. Estos defectos vienen frecuentemente asociados con grietas internas.

En la figura 18 se muestra un esquema de este defecto.

**Figura 18.** Convexidad, en palanquillas.



## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN LA MÁQUINA DE COLADA CONTINUA**

La experiencia industrial de la colada continua ha demostrado que los esfuerzos térmicos excesivos que se producen a raíz de las condiciones de mala refrigeración en la zona de enfriamiento secundario, pueden originar grietas internas y externas del producto. Por esta razón, el enfriamiento secundario debe controlarse a manera de mejorar el perfil térmico del sistema.

Las máquinas de colada continua modernas operan con un sistema de enfriamiento secundario controlado por computador. Los cambios en la velocidad de colada deberán ser ajustados con el flujo de agua atomizada, debido a que la tasa de enfriamiento deberá permanecer constante por razones metalúrgicas. Diferentes clases de aceros requieren diferentes parámetros de enfriamiento, esto lleva a que a cada cambio de acero y destino en laminación, se debe modificar el caudal de agua aplicado.

La cantidad de agua que cae en la superficie de la palanquilla se da normalmente en unidades de volumen/ peso de acero o en volumen/ área\*min. El flujo de agua se reduce a medida que la palanquilla va pasando por la zona de refrigeración secundaria, por lo tanto, los flujos de agua en las boquillas son distintos. Por esta razón, el sistema secundario de enfriamiento está dividido en zonas para tener mejor control del caudal.

## 5.2 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE INICIO DE COLADA Y PÉRDIDAS DE TEMPERATURA EN EL PROCESO

**5.2.1 Temperatura de liquidus.** Para determinar la temperatura liquidus será necesario conocer la composición química de los aceros en los que se basa la investigación, esta composición se hará con base en los porcentajes de elementos aleantes para cada tipo de acero según la norma técnica colombiana (NTC). Estas composiciones químicas se muestran en el anexo B.

La tabla 1, donde se muestran los rangos de los elementos aleantes con sus respectivos factores de corrección, será utilizada para calcular la temperatura de liquidus a partir de la siguiente ecuación:

**T. liquidus (°C)=** 1539 - factor C\*(%C) -factor P\*(%P) -factor S\*(%S) - factor Sn\*(%Sn) - factor Si\*(%Si) - factor Mn\*(%Mn) - factor Cu\*(%Cu) - factor Ni\*(%Ni) - factor Mo\*(%Mo) - factor Cr\*(%Cr) - factor Al\*(%Al).

Donde se obtendrá la temperatura óptima en el distribuidor para inicio de colada necesariamente más alta que la temperatura de liquidus. Los valores aumentados de temperatura por encima de liquidus actualmente usados en la industria son los siguientes:

- De 20 a 40 °C para los aceros normales.
- De 10 a 20 °C para aceros especiales y de alta calidad.

Para esta investigación los aceros normales utilizados son A-572 y el A-36 y los aceros especiales utilizados son 1020, 1045 y el 1060.

Se utilizará un cuadro en Excel para las tablas 3, 4, 5, 6 y 7 en el cálculo de la temperatura de liquidus para cada tipo de acero:

**Tabla 3.** Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero A-36.

ELEMENTO	RANGO	FACTOR	COMPOSICIÓN A-36	
			% MIN.	% MÁX.
% carbono	0,0 - 0,5 %	65	0,12	0,23
	0,5 - 1,0 %	70		
	1,0 - 2,0 %	75		
% fósforo	0,0 - 0,07%	30	0,015	0,030
% azufre	0,0 - 0,08%	25	0,025	0,035
% estaño	0,0 - 0,03%	10	0,02	0,09
% silicio	0,0 - 3,0%	8	0,17	0,2
% manganeso	0,0 - 1,5%	5	0,45	0,55
% cobre	0,0 - 0,3%	5	0,30	0,50
% níquel	0,0 - 9,0%	4	0,11	0,15
% molibdeno	0,0 - 0,3%	2	0,02	0,05
% cromo	0,0 - 18%	1,5	0,11	0,15
% aluminio	0,0 - 1,0%	0	0,005	0,007
<b>Temperatura de liquidus (°C)</b>			1524	1514
<b>Temperatura del acero en distribuidor (°C)</b>		<b>Min.</b>	1544	1534
		<b>Máx.</b>	1564	1554

**Tabla 4.** Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero A-572.

ELEMENTO	RANGO	FACTOR	COMPOSICIÓN A-572	
			% MIN.	% MÁX.
% carbono	0,0 - 0,5 %	65	0,12	0,23
	0,5 - 1,0 %	70		
	1,0 - 2,0 %	75		
% fósforo	0,0 - 0,07%	30	0,015	0,030
% azufre	0,0 - 0,08%	25	0,025	0,035
% estaño	0,0 - 0,03%	10	0,02	0,09
% silicio	0,0 - 3,0%	8	0,17	0,2
% manganeso	0,0 - 1,5%	5	0,60	0,80
% cobre	0,0 - 0,3%	5	0,25	0,45
% níquel	0,0 - 9,0%	4	0,11	0,15
% molibdeno	0,0 - 0,3%	2	0,02	0,05
% cromo	0,0 - 18%	1,5	0,11	0,15
% aluminio	0,0 - 1,0%	0	0,005	0,007
<b>Temperatura de liquidus (°C)</b>			1524	1513
<b>Temperatura del acero en distribuidor (°C)</b>		<b>Min.</b>	1544	1533
		<b>Máx.</b>	1564	1553

**Tabla 5.** Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero 1020.

ELEMENTO	RANGO	FACTOR	COMPOSICIÓN 1020	
			% MIN.	% MÁX.
% carbono	0,0 - 0,5 %	65	0,18	0,23
	0,5 - 1,0 %	70		
	1,0 - 2,0 %	75		
% fósforo	0,0 - 0,07%	30	0,015	0,030
% azufre	0,0 - 0,08%	25	0,025	0,035
% estaño	0,0 - 0,03%	10	0,02	0,03
% silicio	0,0 - 3,0%	8	0,18	0,2
% manganeso	0,0 - 1,5%	5	0,3	0,55
% cobre	0,0 - 0,3%	5	0,25	0,30
% níquel	0,0 - 9,0%	4	0,11	0,15
% molibdeno	0,0 - 0,3%	2	0,02	0,03
% cromo	0,0 - 18%	1,5	0,11	0,15
% aluminio	0,0 - 1,0%	0	0,005	0,007
<b>Temperatura de liquidus (°C)</b>			1521	1515
<b>Temperatura del acero en distribuidor (°C)</b>		<b>Min.</b>	1531	1525
		<b>Máx.</b>	1541	1535

**Tabla 6.** Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero 1045.

ELEMENTO	RANGO	FACTOR	COMPOSICIÓN 1045	
			% MIN.	% MÁX.
% carbono	0,0 - 0,5 %	65	0,43	0,5
	0,5 - 1,0 %	70		
	1,0 - 2,0 %	75		
% fósforo	0,0 - 0,07%	30	0,015	0,030
% azufre	0,0 - 0,08%	25	0,025	0,035
% estaño	0,0 - 0,03%	10	0,02	0,03
% silicio	0,0 - 3,0%	8	0,17	0,2
% manganeso	0,0 - 1,5%	5	0,6	0,8
% cobre	0,0 - 0,3%	5	0,25	0,30
% níquel	0,0 - 9,0%	4	0,11	0,15
% molibdeno	0,0 - 0,3%	2	0,02	0,03
% cromo	0,0 - 18%	1,5	0,11	0,15
% aluminio	0,0 - 1,0%	0	0,005	0,007
<b>Temperatura de liquidus (°C)</b>			1504	1496
<b>Temperatura del acero en distribuidor (°C)</b>		<b>Min.</b>	1514	1506
		<b>Máx.</b>	1524	1516

**Tabla 7.** Temperatura de liquidus y en distribuidor para el acero 1060.

ELEMENTO	RANGO	FACTOR	COMPOSICIÓN 1060		
			% MIN.	% MÁX.	
% carbono	0,0 - 0,5 %	65			
	0,5 - 1,0 %	70	0,55	0,65	
	1,0 - 2,0 %	75			
% fósforo	0,0 - 0,07%	30	0,015	0,025	
% azufre	0,0 - 0,08%	25	0,025	0,03	
% estaño	0,0 - 0,03%	10	0,02	0,03	
% silicio	0,0 - 3,0%	8	0,18	0,2	
% manganeso	0,0 - 1,5%	5	0,6	0,9	
% cobre	0,0 - 0,3%	5	0,25	0,30	
% níquel	0,0 - 9,0%	4	0,11	0,15	
% molibdeno	0,0 - 0,3%	2	0,02	0,03	
% cromo	0,0 - 18%	1,5	0,11	0,15	
% aluminio	0,0 - 1,0%	0	0,005	0,007	
<b>Temperatura de liquidus (°C)</b>			1493	1483	
<b>Temperatura del acero en distribuidor (°C)</b>			<b>Min.</b>	1503	1493
			<b>Máx.</b>	1513	1503

**5.2.2 Pérdidas de temperatura durante el proceso.** Para que el sistema de refrigeración sea parte integral del proceso de fabricación del acero, se debe relacionar cada etapa del mismo, con el fin de que las temperaturas críticas como lo son las de vaciado del horno en la cuchara y la de inicio de colada sean lo más ajustadas a los rangos, para que el sistema de refrigeración cumpla con el propósito específico de refrigerar las palanquillas con la menor cantidad de defectos, originados por una defectuosa solidificación de las palanquillas a causa del sistema de refrigeración.

El precalentamiento constituye otro problema. En la producción normal del lingote se utilizan cucharas un tanto caldeadas, pero rara vez se calientan a altas temperaturas. No obstante, en la colada continua el tiempo de vaciado del acero suele ser muy superior al empleado en una colada convencional, aparte de que el acero es sometido a una refrigeración adicional, puesto que tiene que recorrer

vertederos de conducción o repartidores antes de llegar al molde propiamente dicho. De emplear una cuchara fría este calor adicional deberá producirse en el horno, lo que puede originar considerables costos extraordinarios ocasionados por los factores siguientes:

- En el soplado de oxígeno la elevación de la temperatura reduce el rendimiento metálico, aumenta el consumo de oxígeno y acorta la duración del refractario.
- La temperatura adicional habrá de obtenerse cuando el horno se encuentra a su mínimo rendimiento térmico y se acerca ya a la máxima temperatura posible. El resultado es un aumento en el tiempo de colada a colada, acentuado desgaste del horno cuando trabaja a temperatura máxima y aumento en el consumo de combustible.

En el horno de arco, aunque esto no ofrezca probablemente dificultades mayores (porque habitualmente se tiene amplia posibilidad de elevar la temperatura del baño muy rápidamente momentos antes del vaciado, aminorando así el desgaste y deterioro del horno) aún sigue siendo preciso utilizar más tiempo y más energía.

Todas estas pérdidas apoyan el principio de calentar previamente el refractario de la cuchara a una temperatura relativamente alta, aproximadamente 1200 °C con anterioridad al sangrado del horno; este método es menos gravoso para el costo del producto que el de generar calor adicional en el horno. El grado de precalentamiento necesario es variable.

Para realizar este estudio se hizo necesario hacer un seguimiento en planta de cada colada fabricada en ACASA, para tener un número significativo de coladas y con esto analizar las pérdidas de temperatura reales para la planta, este análisis

se divide para cada tipo de acero fabricado, ya que las pérdidas de temperatura serán diferentes en cada acero debido a la composición química.

La planta de ACASA tiene un horno eléctrico “Electromel” de capacidad 20 toneladas, las cucharas con revestimiento refractario de alumina y con capacidad 20 toneladas de acero líquido.

La toma de temperaturas de cuchara vacía se hace por medio de un pirómetro óptico marca opmax y del acero líquido con termocuplas de inmersión.

Inicialmente se tomará la temperatura de la cuchara la cual será precalentada antes de dirigirse al foso de vaciado. Esta temperatura debe estar comprendida entre 900 y 1200 °C para que el acero líquido durante el proceso de colada no reduzca su temperatura rápidamente ocasionando problemas de cierre de válvulas y buzas.

**Figura 19.** Inicio de vaciado de acero a la cuchara.



Se debe medir la temperatura del acero en horno en el instante que éste empiece a bascular para vaciar el acero en la cuchara, la medida se realiza por medio de termocuplas que se introducen en el acero líquido.

La siguiente medición se efectúa cuando la cuchara sale del foso de vaciado con el acero depositado por el horno (figura 20) ya que el tiempo de permanencia de la cuchara desde la zona de precalentamiento hasta el momento que sale con el acero es aproximadamente de 14 min. y se necesita conocer que temperatura perdió el acero desde que sale del horno hasta que llegue a la máquina de colada continua.

**Figura 20.** Cuchara con acero saliendo del foso de vaciado.



La siguiente toma de temperatura se hará a la llegada del acero a la máquina de colada, después de haber recorrido un trayecto entre el foso de vaciado y la máquina de colada continua (figura 21). La medición de la temperatura del acero será por medio de termocuplas introducidas en la cuchara con el acero líquido como se observa en la figura 22. Esta temperatura es de gran importancia ya que se utiliza para saber si es la correcta para proseguir con la etapa de apertura de válvulas y dar inicio a la colada.

La información obtenida para pérdidas reales en planta de cada tipo de acero se muestra en las tablas 8, 9, 10, 11 y 12

**Figura 21.** Transporte de la cuchara desde el foso de vaciado hacia máquina de colada continua.



**Figura 22.** Toma de temperatura en cuchara para dar inicio a la colada.



**Tabla 8.** Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero A-36.

<b>ACERO A-36</b>				
Temperatura de cuchara sin acero		Instante de bascular el horno para vaciado	Llegada del acero a la M.C.C	En el distribuidor a 10 min. de apertura
Pirómetro		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
Pre calentamiento °C	En el foso °C			
1000	858	1687	1620	1575
964	820	1688	1615	1560
1020	896	1670	1607	1555
950	815	1665	1595	1548
1000	856	1672	1610	1553
890	760	1678	1600	1550
965	845	1681	1620	1567
800	665	1673	1603	1558
886	763	1682	1596	1549
912	779	1671	1601	1542

**Tabla 9.** Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero A-572.

<b>ACERO A-572</b>				
Temperatura de cuchara sin acero		Instante de bascular el horno para vaciado	Llegada del acero a la M.C.C	En el distribuidor a 10 min. de apertura
Pirómetro		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
Pre calentamiento °C	En el foso °C			
980	838	1678	1612	1565
886	743	1662	1590	1546
950	881	1668	1615	1570
821	798	1681	1612	1555
909	899	1670	1615	1570
895	755	1688	1608	1542
1000	825	1691	1621	1571
883	705	1690	1615	1546
928	812	1672	1600	1556
1010	905	1676	1606	1561

**Tabla 10.** Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero 1020.

<b>ACERO 1020</b>				
Temperatura de cuchara sin acero		Instante de bascular el horno para vaciado	Llegada del acero a la M.C.C	En el distribuidor a 10 min. de apertura
Pirómetro		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
Pre calentamiento °C	En el foso °C			
912	825	1668	1605	1558
935	840	1675	1628	1565
1100	1006	1701	1631	1581
816	729	1681	1618	1572
800	716	1680	1552	1520
720	631	1678	1596	1546
915	819	1699	1632	1575
898	800	1683	1613	1563
825	739	1671	1601	1555
952	868	1669	1605	1548

**Tabla 11.** Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero 1045.

<b>ACERO 1045</b>				
Temperatura de cuchara sin acero		Instante de bascular el horno para vaciado	Llegada del acero a la M.C.C	En el distribuidor a 10 min. de apertura
Pirómetro		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
Pre calentamiento °C	En el foso °C			
880	788	1680	1600	1532
901	810	1699	1598	1521
885	800	1682	1625	1566
950	860	1686	1600	1541
870	769	1683	1596	1524
900	812	1689	1616	1540
998	889	1690	1610	1528
886	765	1699	1625	1545
921	860	1662	1587	1515
936	844	1660	1610	1538

**Tabla 12.** Temperaturas para las diferentes etapas del proceso en acería para el acero 1060.

<b>ACERO 1060</b>				
Temperatura de cuchara sin acero		Instante de bascular el horno para vaciado	Llegada del acero a la M.C.C	En el distribuidor a 10 min. de apertura
Pirómetro		Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
Pre calentamiento (°C)	En el foso (°C)			
900	801	1692	1620	1525
880	798	1690	1620	1530
966	879	1695	1629	1552
1000	910	1688	1613	1520
890	789	1689	1598	1526
978	876	1695	1615	1528
975	895	1675	1592	1518
900	810	1702	1627	1539
921	853	1682	1631	1542
890	750	1680	1602	1520

Para determinar las pérdidas de temperatura en el proceso durante el vaciado del horno y la llegada de la cuchara a la máquina de colada continua y entre cuchara y distribuidor en la máquina de colada continua, utilizamos la información de las tablas 8, 9, 10, 11 y 12

Donde para obtener los resultados de pérdidas durante vaciado del horno y la llegada de la cuchara a la máquina de colada continua y entre cuchara y distribuidor en la máquina de colada se debe:

Restar la temperatura de llegada de la cuchara a la máquina de colada a la temperatura del horno antes de vascular y restar la temperatura del distribuidor a la temperatura de llegada de la cuchara, al tener una muestra representativa se promedia los resultados para que las pérdidas sean una muestra real del proceso. Este procedimiento se cumple para cada tipo de acero. Estos resultados se muestran en las tablas 13, 14, 15, 16 y 17

**Tabla 13.** Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero A-36.

<b>ACERO A-36</b>				
Temperatura del horno (°C)	Temperatura de llegada de la cuchara (°C)	Pérdidas de temperatura entre horno y cuchara (°C)	Temperatura en distribuidor (°C)	Pérdidas de temperatura entre cuchara y distribuidor (°C)
1687	1620	67	1575	45
1688	1615	73	1560	55
1670	1607	63	1555	52
1665	1595	70	1548	47
1672	1610	62	1553	57
1678	1600	78	1550	50
1681	1620	61	1567	53
1673	1603	70	1558	45
1682	1596	86	1549	47
1671	1601	70	1542	59
Promedio de pérdidas de temperaturas (°C)		70		51

**Tabla 14.** Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero A-572.

<b>ACERO A-572</b>				
Temperatura del horno (°C)	Temperatura de llegada de la cuchara (°C)	Pérdidas de temperatura entre horno y cuchara (°C)	Temperatura en distribuidor (°C)	Pérdidas de temperatura entre cuchara y distribuidor (°C)
1678	1612	66	1575	47
1662	1590	72	1560	44
1668	1615	53	1555	45
1681	1612	69	1548	57
1670	1615	55	1553	45
1688	1608	80	1550	66
1691	1621	70	1567	50
1690	1615	75	1558	69
1672	1600	72	1549	44
1676	1606	70	1542	45
Promedio de pérdidas de temperaturas (°C)		68.2		51.2

**Tabla 15.** Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero 1020.

<b>ACERO 1020</b>				
Temperatura del horno (°C)	Temperatura de llegada de la cuchara (°C)	Pérdidas de temperatura entre horno y cuchara (°C)	Temperatura en distribuidor (°C)	Pérdidas de temperatura entre cuchara y distribuidor (°C)
1668	1605	63	47	47
1675	1628	47	63	63
1701	1631	70	50	50
1681	1618	63	46	46
1680	1552	128	32	32
1678	1596	82	50	50
1699	1632	67	57	57
1683	1613	70	50	50
1671	1601	70	46	46
1669	1605	64	57	57
Promedio de pérdidas de temperaturas (°C)		72.4		49,8

**Tabla 16.** Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero 1045.

<b>ACERO 1045</b>				
Temperatura del horno (°C)	Temperatura de llegada de la cuchara (°C)	Pérdidas de temperatura entre horno y cuchara (°C)	Temperatura en distribuidor (°C)	Pérdidas de temperatura entre cuchara y distribuidor (°C)
1680	1600	80	1532	68
1699	1598	101	1521	77
1682	1625	57	1566	59
1686	1600	86	1541	59
1683	1596	87	1524	72
1689	1616	73	1540	76
1690	1610	80	1528	82
1699	1625	74	1545	80
1662	1587	75	1515	72
1660	1610	50	1538	72
Promedio de pérdidas de temperaturas (°C)		76.3		71.7

**Tabla 17.** Temperaturas de pérdidas durante el proceso de fabricación de acero para un acero 1060.

<b>ACERO 1060</b>				
Temperatura del horno (°C)	Temperatura de llegada de la cuchara (°C)	Pérdidas de temperatura entre horno y cuchara (°C)	Temperatura en distribuidor (°C)	Pérdidas de temperatura entre cuchara y distribuidor (°C)
1692	1620	72	1532	95
1690	1620	70	1521	90
1695	1629	66	1566	77
1688	1613	75	1541	93
1689	1598	91	1524	72
1695	1615	80	1540	87
1675	1592	83	1528	74
1702	1627	75	1545	88
1682	1631	51	1515	89
1680	1602	78	1538	82
Promedio de pérdidas de temperaturas (°C)		74.1		84.7

Con la información obtenida a partir de las temperaturas de pérdidas en el proceso de fabricación del acero, de liquidus y de acero en distribuidor, se obtendrán parámetros para estandarizar el proceso de fabricación del acero.

En la tabla 18 se muestran las diferentes temperaturas y pérdidas reales en planta en las etapas del proceso de fabricación, de los diferentes tipos de acero en los que la investigación se basó.

**Tabla 18.** Temperaturas en planta para controlar parámetros de funcionamiento.

		A-36		A-572		1020		1045		1060	
		Composición		Composición		Composición		Composición		Composición	
		% Min.	% Máx.	% Min.	% Máx.	% Min.	% Máx.	% Min.	% Máx.	% Min.	% Máx.
Temperatura de liquidus (°C)		1524	1514	1524	1513	1521	1515	1504	1496	1493	1483
Temperatura del acero en distribuidor (°C)	Min.	1544	1534	1544	1533	1531	1525	1514	1506	1503	1493
	Máx.	1564	1554	1564	1553	1541	1535	1524	1516	1513	1503
Pérdida de temperatura entre cuchara y distribuidor (°C)		50	50	50	50	50	50	72	72	85	85
Temperatura en cuchara para iniciar colada (°C)	Min.	1594	1584	1594	1583	1581	1575	1586	1578	1588	1578
	Máx.	1614	1604	1614	1603	1591	1585	1596	1588	1598	1588
Pérdida de temperatura entre horno(vaciado) y cuchara (en MCC) (°C)		70	70	70	70	70	70	75	75	75	75
Temperatura de inicio de vaciado en horno (°C)	Min.	1664	1654	1664	1653	1651	1645	1661	1653	1663	1653
	Máx.	1684	1674	1684	1673	1661	1655	1671	1663	1673	1663

### 5.3 PARÁMETROS DE SOLIDIFICACIÓN

**5.3.1 Longitud metalúrgica.** La necesidad de conocer la solidificación total de la palanquilla durante el proceso de colada en la máquina de colada continua, se debe a que la mayor cantidad de defectos son originados en esta etapa del proceso de fabricación de acero, por lo tanto realizar la medida de longitud metalúrgica conlleva a un conocimiento de cómo la refrigeración está actuando frente a la formación de la piel en la solidificación de la palanquilla.

El estudio se realiza a palanquillas con tamaño de 115\*115 mm. y de 130\*130 mm, a una velocidad de colada promedio de 1.5 m/ min., esta velocidad de colada no es constante pero si es la más representativa a la que funciona la máquina de colada.

$$L = \frac{A^2}{4k^2} V$$

Donde:

L: distancia de solidificación total, en metros.

La constante k viene dada para palanquillas de forma cuadrada con un valor de 28. Para palanquillas de 115\*115 mm la longitud metalúrgica viene dada así:

$$L = \frac{115^2}{(4 \times 28^2)} \times 1.5; \quad \mathbf{L = 6.32 m}$$

Para palanquillas de 130\*130 mm la longitud metalúrgica viene dada

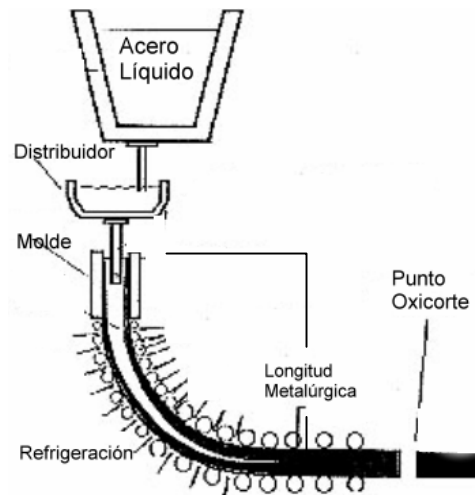
$$L = \frac{130^2}{(4 \times 28^2)} \times 1.5; \quad \mathbf{L = 8 m}$$

El esquema de la longitud metalúrgica se muestra en la figura 23.

**5.3.2 Formación de la piel en la palanquilla (ley de Lighfoot).** La formación de la piel solidificada se inicia a partir del contacto que tiene el acero con las paredes del molde, el crecimiento prosigue a lo largo de toda la zona de refrigeración hasta el límite de la longitud metalúrgica donde el acero se encuentra totalmente solidificado.

La ley de **Lighfoot** hace una aproximación del comportamiento que ocurre dentro de la palanquilla, esta piel sólida ira aumentando su espesor con respecto al tiempo.

**Figura 23.** Esquema de longitud metalúrgica en la palanquilla.



$$S = k\sqrt{t}$$

Donde:

S: espesor de la piel solidificada, en milímetros.

La constante k viene dada para palanquillas de forma cuadrada con un valor de 28, el tiempo transcurrido durante el paso de la palanquilla en la máquina de colada viene dado en minutos. El tiempo de solidificación total del acero líquido en la máquina de colada se obtiene relacionando la longitud metalúrgica con la velocidad de colada.

$$t \equiv \frac{L}{V};$$

t: tiempo máximo de solidificación, en minutos.

L: longitud metalúrgica, en metros.

V: velocidad de colada, en metros/ minutos.

Donde:

Para palanquilla de 115\*115 mm:

$$t \equiv \frac{6.32}{1.5}; \quad t = 4.2 \text{ min.}$$

Para palanquilla de 130\*130 mm:

$$t \equiv \frac{8}{1.5}; \quad t = 5.33 \text{ min.}$$

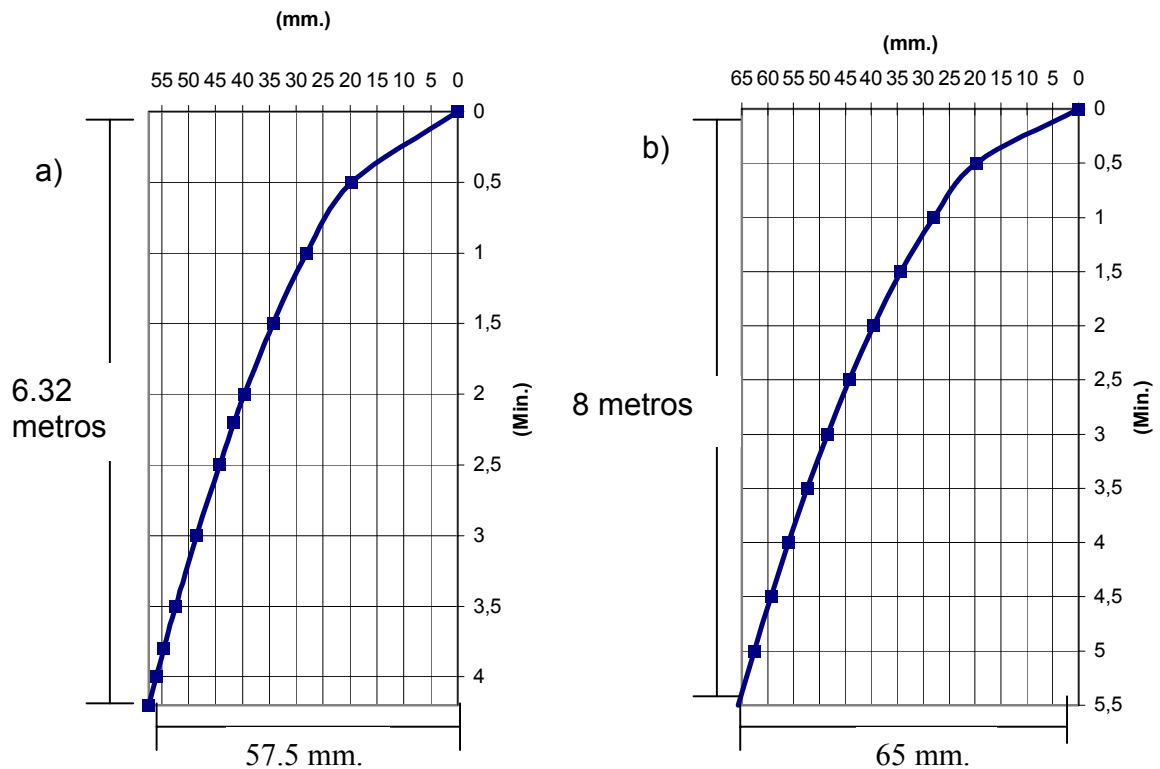
Estos resultados para la ley **Lighfoot** se muestran en la tabla 19.

**Tabla 19.** Ley de **Lighfoot** para palanquillas de 115\*115mm. y 130\*130mm.

Palanquilla 115*115 mm		Palanquilla 130*130 mm.	
Tiempo. (min)	Espesor de piel solidificada. (mm)	Tiempo. (min)	Espesor de piel solidificada. (mm)
0	0	0	0
0,5	19,80	0,5	19,80
1	28,00	1	28,00
1,5	34,29	1,5	34,29
2	39,60	2	39,60
2,2	41,53	2,5	44,27
2,5	44,27	3	48,50
3	48,50	3,5	52,38
3,5	52,38	4	56,00
3,8	54,58	4,5	59,40
4	56,00	5	62,61
4,2	57,38	5,5	65,67

El perfil de solidificación que se muestra en la figura 24, refleja la formación del espesor de piel durante el paso por la zona de refrigeración hasta la longitud metalúrgica.

**Figura 24.** Perfil de solidificación del acero. a) para palanquilla de 115\*115 mm.  
b) para palanquilla de 130\*130 mm.



### 5.3.3 Caudales de agua en la zona de refrigeración secundaria.

➤Requerimientos de agua del circuito secundario. Estos requerimientos básicos tienen como fundamento principal la experiencia acumulada en otras plantas siderúrgicas que utilizan el proceso de colada continua y en ella un sistema automático de refrigeración, a pesar de que cada planta cumple con sus propias exigencias y diferentes productos de fabricación estos parámetros se toman como punto de partida.

**Tabla 20.** Caudales de agua en diferentes tipos de acero.

ACERO	Entre (Litro por minuto/ kilogramo)
ALTO CARBONO	1.0 - 1.3
MEDIO CARBONO	1.4 - 1.7
BAJO CARBONO	1.8 - 2.2

Fuente: STEELMAKING AND REFINING. The Making, Shaping, and Treating of Steel. 11th Edition, Pittsburgh PA: AISE Steel Foundation, 1998. 234 p

**Tabla 21.** Distribución de agua según ubicación en el sistema de refrigeración.

DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL SECUNDARIO	
UBICACIÓN	PORCENTAJES
Zona 1 (corona)	20 % al 25 %
Zona 2 (medio)	55 % al 60 %
Zona 3 (final)	20 % la 30 %

Fuente: STEELMAKING AND REFINING. The Making, Shaping, and Treating of Steel. 11th Edition, Pittsburgh PA: AISE Steel Foundation, 1998. 234 p

**Tabla 22.** Equivalencia de velocidades según diámetro de buza y tipo de palanquilla.

EQUIVALENCIA DE VELOCIDADES			
Diámetro de la Buza (mm)	Peso palanquilla por minuto (Kg/min)	Velocidad (m/min)* 115x115 mm. peso de palanquilla por metro(99.8 kg/m)	Velocidad (m/min)* 130x130 mm peso de palanquilla por metro(129 kg/m)
12,5	155	1,55	1,20
13,5	180	1,80	1,40
14,0	192	1,92	1,50
14,5	205	2,05	1,60
15,0	220	2,20	1,70

\* Para obtener la velocidad, se divide el peso de palanquilla por minuto por el peso de palanquilla por metro.

➤Determinación de las constantes teóricas. Se diseñó una hoja de Excel para la ecuación cuadrática que administra el caudal necesario para la refrigeración de la palanquilla.

$$Q \equiv V^2 * K_1 + V * K_2 + K_3$$

Donde:

Q: caudal de agua (litros/minutos).

V: velocidad de colada (metros/minuto).

K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>: constantes.

Esta ecuación rige para cada una de las tres zonas de refrigeración, por lo que es necesario obtener 9 constantes que manejen los caudales de agua que se rociarán en la palanquilla.

**Figura 25.** Zona 1 de refrigeración.



**Figura 26.** Zona 2 de refrigeración.



**Figura 27.** Zona 3 de refrigeración.



En la figura 25, 26 y 27 se muestra la refrigeración y los rociadores de tipo cónico de la zona de refrigeración. La determinación de las constantes de la fórmula cuadrática, se realiza a partir de lo establecido en las tablas 20 y 21.

Para el acero A-572 y producto final en laminación de perfiles angulares, de lados iguales de 3 pulgadas, en palanquilla de 115\*115 mm, las constantes de operación son las siguientes:

**Tabla 23.** Constantes para caudales en refrigeración, para perfil 3" y acero A-572.

Constantes	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
Zona 1 (Corona)	2	25	7
Zona 2	5	60	23
Zona 3	1	25	7

Para definir los litros por minuto por kilogramo (LPM/Kg) tenemos:

$$LPM / Kg \equiv \frac{Q}{V * d}$$

Q: caudal total, en litros/ min.

V: velocidad de colada, en metros/ min.

d: peso de palanquilla por metro.

Para palanquilla de 115\*115 mm. el peso es de 99.8 Kg/ m. y en palanquilla de 130\*130 mm. el peso es de 129 Kg/ m.

La tabla 24 muestra el caudal de agua para cada zona de refrigeración específica y la relaciona con la velocidad de colada.

**Tabla 24.** Caudal de agua circuito secundario, para perfil 3" y acero A-572, en palanquilla de 115\*115 mm.

Velocidad Colada m/min.	CAUDAL DE AGUA CIRCUITO SECUNDARIO									Caudal total (Lts/min.)	LPM/Kg.
	CORONA			ZONA 2			ZONA 3				
	Lts/min.	GPM*	%	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%		
1	34	9,0	22%	88	23,2	57%	33	8,7	21%	155	1,55
1,1	37	9,8	22%	95	25,1	57%	36	9,4	21%	168	1,53
1,2	40	10,5	22%	102	27,0	57%	38	10,2	21%	181	1,51
1,3	43	11,3	22%	109	28,9	57%	41	10,9	21%	194	1,49
1,4	46	12,1	22%	117	30,9	57%	44	11,6	21%	207	1,48
1,5	49	12,9	22%	124	32,8	56%	47	12,4	21%	220	1,47
1,6	52	13,8	22%	132	34,8	56%	50	13,1	21%	233	1,46
1,7	55	14,6	22%	139	36,8	56%	52	13,8	21%	247	1,46
1,8	58	15,5	22%	147	38,9	56%	55	14,6	21%	261	1,45
1,9	62	16,3	22%	155	41,0	56%	58	15,4	21%	275	1,45
2	65	17,2	22%	163	43,1	56%	61	16,1	21%	289	1,45
2,1	68	18,1	23%	171	45,2	56%	64	16,9	21%	303	1,45
2,2	72	18,9	23%	179	47,3	56%	67	17,7	21%	318	1,45
Distribución Teórica (%)	20 % al 25%			55 % al 60%			20% al 30%				

Para el acero A-572 y producto final en laminación de perfiles angulares, de lados iguales de 4 pulgadas, en palanquilla de 130\*130 mm, las constantes de operación son las siguientes:

**Tabla 25.** Constantes para caudales en refrigeración, para perfil 4" y acero A-572.

Constantes	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
Zona 1 (Corona)	6	22	10
Zona 2	16	56	29
Zona 3	3	30	18

La tabla 26 muestra el caudal de agua para cada zona de refrigeración específica y la relaciona con la velocidad de colada.

\* GPM: Galones por minuto.

**Tabla 26.** Caudal de agua circuito secundario, para perfil 4" y acero A-572, en palanquilla de 130\*130 mm.

Velocidad Colada m/min.	CAUDAL DE AGUA CIRCUITO SECUNDARIO									Caudal total (Lts/min.)	LPM/Kg.
	CORONA			ZONA 2			ZONA 3				
	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%		
1	38	10,0	20%	101	22,2	53%	51	13,5	27%	190	1,47
1,1	41	11,0	20%	110	24,2	53%	55	14,4	27%	206	1,45
1,2	45	11,9	20%	119	26,2	54%	58	15,4	26%	223	1,44
1,3	49	12,9	20%	129	28,3	54%	62	16,4	26%	240	1,43
1,4	53	13,9	20%	139	30,5	54%	66	17,4	26%	257	1,42
1,5	57	14,9	21%	149	39,4	54%	70	18,4	25%	275	1,42
1,6	61	16,0	21%	160	42,2	54%	74	19,5	25%	294	1,42
1,7	65	17,1	21%	170	45,0	54%	78	20,5	25%	313	1,43
1,8	69	18,2	21%	182	48,0	55%	82	21,6	25%	332	1,43
1,9	73	19,4	21%	193	51,0	55%	86	22,7	24%	352	1,44
2	78	20,6	21%	205	54,2	55%	90	23,8	24%	373	1,45
2,1	83	21,8	21%	217	57,4	55%	94	24,9	24%	394	1,45
2,2	87	23,1	21%	230	60,7	55%	99	26,0	24%	416	1,46
Distribución Teórica (%)	20 % al 25%			55 % al 60%			20% al 30%				

Para el acero A-36 y producto final en laminación de canales de 3 y 4 pulgadas en palanquilla de 115\*115 mm, las constantes de operación son las siguientes:

**Tabla 27.** Constantes para caudales en refrigeración, para canal de 3" y 4" en acero A-36.

Constantes	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
Zona 1 (Corona)	4	21	10
Zona 2	18	27	38
Zona 3	6	15	13

La tabla 28 muestra el caudal de agua para cada zona de refrigeración específica y la relaciona con la velocidad de colada.

**Tabla 28.** Caudal de agua circuito secundario, para canal de 3" y 4" en acero A-36, en palanquilla de 115\*115 mm.

Velocidad Colada m/min.	CAUDAL DE AGUA CIRCUITO SECUNDARIO									Caudal total (Lts/min.)	LPM/Kg.
	CORONA			ZONA 2			ZONA 3				
	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%		
1	35	9,2	23%	83	21,9	55%	34	9,0	22%	152	1,52
1,1	38	10,0	23%	89	23,6	55%	37	9,7	22%	164	1,50
1,2	41	10,8	23%	96	25,4	54%	40	10,5	22%	177	1,48
1,3	44	11,6	23%	104	27,4	54%	43	11,3	22%	190	1,47
1,4	47	12,5	23%	111	29,3	54%	46	12,1	22%	204	1,46
1,5	51	13,3	23%	119	31,4	54%	49	12,9	22%	219	1,46
1,6	54	14,2	23%	127	33,6	55%	52	13,8	22%	233	1,46
1,7	57	15,1	23%	136	35,9	55%	56	14,8	22%	249	1,47
1,8	61	16,1	23%	145	38,3	55%	59	15,7	22%	265	1,48
1,9	64	17,0	23%	154	40,8	55%	63	16,7	22%	282	1,49
2	68	18,0	23%	164	43,3	55%	67	17,7	22%	299	1,50
2,1	72	19,0	23%	174	46,0	55%	71	18,7	22%	317	1,51
2,2	76	20,0	23%	185	48,8	55%	75	19,8	22%	335	1,53
Distribución Teórica (%)	20 % al 25%			55 % al 60%			20% al 30%				

Para el acero 1020 con producto final en laminación de redondos calibrados de, 1 1/8 de pulgada en palanquilla de 115\*115 mm, las constantes de operación son las siguientes:

**Tabla 29.** Constantes para caudales en refrigeración, para redondo calibrado de 1 1/8" en acero 1020.

Constantes	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
Zona 1 (Corona)	7	14	15
Zona 2	9	50	22
Zona 3	5	12	12

La tabla 30 muestra el caudal de agua para cada zona de refrigeración específica y la relaciona con la velocidad de colada.

**Tabla 30.** Caudal de agua circuito secundario, para redondo calibrado 1 1/8" en acero 1020, en palanquilla de 115\*115 mm.

Velocidad Colada m/min.	CAUDAL DE AGUA CIRCUITO SECUNDARIO									Caudal total (Lts/min.)	LPM/Kg.
	CORONA			ZONA 2			ZONA 3				
	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%		
1	36	9,5	25%	81	21,4	55%	29	7,7	20%	146	1,46
1,1	39	10,3	25%	88	23,2	56%	31	8,3	20%	158	1,44
1,2	42	11,1	25%	95	25,1	56%	34	8,9	20%	170	1,42
1,3	45	11,9	25%	102	27,0	56%	36	9,5	20%	183	1,41
1,4	48	12,8	25%	110	29,0	56%	39	10,2	20%	197	1,41
1,5	52	13,7	25%	117	31,0	56%	41	10,9	20%	210	1,40
1,6	55	14,6	25%	125	33,0	56%	44	11,6	20%	224	1,41
1,7	59	15,6	25%	133	35,1	56%	47	12,4	20%	239	1,41
1,8	63	16,6	25%	141	37,3	56%	50	13,2	20%	254	1,41
1,9	67	17,7	25%	149	39,5	56%	53	14,0	20%	269	1,42
2	71	18,8	25%	158	41,7	55%	56	14,8	20%	285	1,43
2,1	75	19,9	25%	167	44,0	55%	59	15,7	20%	301	1,44
2,2	80	21,1	25%	176	46,4	55%	63	16,5	20%	318	1,45
Distribución Teórica (%)	20 % al 25%			55 % al 60%			20% al 30%				

Para los aceros 1045 y 1060 con producto final en laminación de redondos calibrados, de 1 1/8 de pulgada en palanquilla de 115\*115 mm, las constantes de operación son las siguientes:

**Tabla 31.** Constantes para caudales en refrigeración, para redondo de calibración de 1 1/8" en acero 1045 y 1060.

Constantes	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
Zona 1 (Corona)	2	21	8
Zona 2	16	25	35
Zona 3	5	12	11

La tabla 32 muestra el caudal de agua para cada zona de refrigeración específica y la relaciona con la velocidad de colada.

**Tabla 32.** Caudal de agua circuito secundario, para redondo calibrado de 1 1/8” en acero 1045 y 1060, en palanquilla de 115\*115 mm.

Velocidad Colada m/min.	CAUDAL DE AGUA CIRCUITO SECUNDARIO									Caudal total (Lts/min.)	LPM/Kg.
	CORONA			ZONA 2			ZONA 3				
	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%	Lts/min.	GPM	%		
1	31	8,2	23%	76	20,1	56%	28	7,4	21%	135	1,35
1,1	34	8,9	23%	82	21,6	56%	30	8,0	21%	146	1,33
1,2	36	9,5	23%	88	23,3	56%	33	8,6	21%	157	1,31
1,3	39	10,2	23%	95	25,0	56%	35	9,3	21%	168	1,30
1,4	41	10,9	23%	101	26,8	56%	38	9,9	21%	180	1,29
1,5	44	11,6	23%	109	28,7	56%	40	10,6	21%	193	1,29
1,6	47	12,3	23%	116	30,6	56%	43	11,4	21%	206	1,29
1,7	49	13,1	23%	124	32,7	56%	46	12,1	21%	219	1,29
1,8	52	13,8	22%	132	34,8	57%	49	12,9	21%	233	1,30
1,9	55	14,6	22%	140	37,1	57%	52	13,7	21%	247	1,30
2	58	15,3	22%	149	39,4	57%	55	14,5	21%	262	1,31
2,1	61	16,1	22%	158	41,8	57%	58	15,4	21%	277	1,32
2,2	64	16,9	22%	167	44,2	57%	62	16,3	21%	293	1,33
Distribución Teórica (%)	20 % al 25%			55 % al 60%			20% al 30%				

## 5.4 REGISTRO DE DEFECTOS PRESENTES EN PALANQUILLAS

### 5.4.1 Análisis macroestructural.

Usualmente los datos metalúrgicos que se obtienen a través de metalografía microscópica y de análisis químico no son representativos de la totalidad de la pieza debido a la naturaleza heterogénea de los metales. Los análisis antes mencionados no proporcionan una idea adecuada acerca la uniformidad de la estructura producida por solidificación o deformación plástica, la localización y extensión de la segregación, la presencia de defectos de manufactura como grietas, rechupes, porosidad gaseosa, etc.

El procedimiento de observación macroscópica más utilizado es el macroataque, el cual puede clasificarse en dos tipos, a temperaturas altas y a temperaturas bajas y en general sólo se necesita que la superficie esté esmerilada. Los tiempos

de ataque son, en general, muy superiores a los empleados en el microataque. Las estructuras que mayormente se revelan a través del uso de esta técnica son las resultantes de la solidificación, denominada también estructura de lingote, las líneas de flujo producidas por el proceso de forja, la estructura generada por colada continua y la determinación de la zona afectada por el calor en soldaduras, entre otros.

El estudio se basó en las Normas ASTM E340-00e1 “Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys” y ASTM E381-01 “Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings”

#### **5.4.2 Resultados de macroataques**

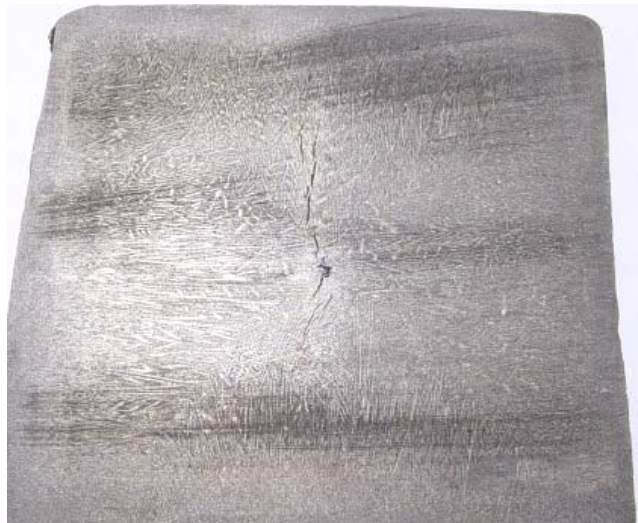
Los resultados de estas pruebas se realizaron teniendo como punto de partida la puesta en marcha del sistema automático de refrigeración. Se analizaron las palanquillas antes y después de la puesta en marcha del sistema.

Al analizar las muestras antes de la puesta en marcha del sistema automático éste presentaba defectos en palanquilla de forma, internos y en menor proporción externos en la totalidad de los aceros. En las figuras 28, 29 y 31 se muestra unos ejemplos de macroataques hechos a estas palanquillas:

**Figura 28.** Grieta central en palanquilla 115\*115 mm para acero A-572.



**Figura 29.** Grieta central en palanquilla 115\*115 mm para acero 1020.



En la figura 29 se muestra una grieta central en palanquilla de 115\*115mm con destino a perfiles de alas iguales de dimensiones de 3\* 3/8". En laminación estos defectos se traducen en grietas en las alas del perfil, en la figura 30 se observa esta consecuencia.

**Figura 30.** Grieta presente en ala de perfil de 3 3/8" para acero A-572.



Este tipo de defecto se hace presente en la mayoría de los productos fabricados en laminación, pero en mayor cantidad en los perfiles de 3 y 4 pulgadas dando un alto porcentaje de productos que tienen que ser reorientados al patio de chatarra.

Para acero A-36 en perfil de 4 pulgadas, uno de los más críticos, debido a su menor compactación en laminación el producto final tendrá mayor posibilidad de mala calidad. En la figura 31 se muestra el defecto en palanquilla.

**Figura 31.** Rechufe y grietas en zona central en palanquilla de 130\*130 mm para acero A-36.

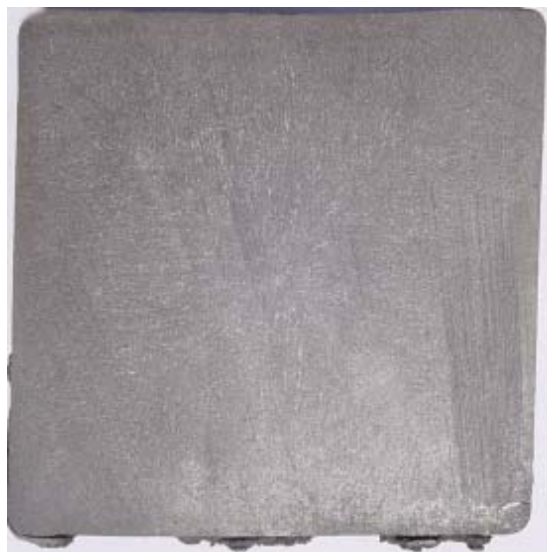


Las muestras analizadas después de la puesta en marcha del sistema, en las que se observa una mejora en la reducción de defectos, estas mejoras se ven reflejadas en la calidad de la palanquilla. En las figura 32, 33 y 34 se presentan las muestras macroatacadas.

**Figura 32.** Macroataque a palanquilla de 115\*115 mm. para acero A-36.



**Figura 33.** Macroataque a palanquilla de 130\*130 mm. para acero A-572.



**Figura 34.** Macroataque a palanquilla 115\*115 mm. para acero 1045.



El comportamiento de los defectos en palanquilla ha disminuido considerablemente esto se observa en la limpieza de las muestras analizadas anteriormente y en el análisis estadístico del porcentaje de grietas en productos obtenidos de laminación durante el tiempo en que el sistema no estaba acondicionado y después de la puesta en marcha del sistema en el mes de octubre del año 2004, ver anexo D. Lo que da como resultado una disminución en costos de mala calidad en los perfiles más críticos como son los de dimensiones más altas 3 y 4 pulgadas para perfiles de alas iguales, canales y redondos calibrados.

## 6. CONCLUSIONES

1. La adecuación de un sistema automático de refrigeración es de suma importancia para una siderúrgica donde se utilice la máquina de colada continua, ya que esto asegura un comportamiento estable de la refrigeración disminuyendo los defectos que se originan a causa de una refrigeración irregular.
2. El sistema automático de refrigeración requiere para su adecuado funcionamiento parámetros definidos como lo son temperatura del acero, composición química y caudales de agua en refrigeración, sabiendo que cualquier alteración de ellos puede causar fallas en el proceso, provocando un deterioro en la estabilidad del sistema.
3. Para determinar la temperatura de liquidus los elementos aleantes que componen un acero son de gran importancia. Se debe tener en cuenta que un aumento en el porcentaje en cada uno de los elementos aleantes conducirá a una reducción drástica en la temperatura de liquidus para el acero.
4. La división de los aceros en normales y de alta calidad o especiales, es fundamental para establecer la temperatura a la cual se debe trabajar en el distribuidor, ya que una mala escogencia acarrearía un proceso donde el molde no pueda solidificar una corteza de grosor adecuado originando una ruptura en la palanquilla que ocasionaría un derrame del líquido.
5. Las mayores pérdidas de temperatura en el proceso se realizan en los aceros con alto contenido de carbono (1045 y 1060 (NTC 243)), como se pudo demostrar en los seguimientos hechos a las coladas de estos aceros las mayores pérdidas provienen de los aceros con alto porcentaje de carbono, se

refleja en la menor cantidad de agua con la que estos aceros deben ser refrigerados.

6. Uno de los métodos más eficaces para controlar la temperatura del acero es por medio de la inyección de Argón, un gas inerte que no reacciona con ningún elemento aleante y además ayuda en la limpieza del acero.
7. Para definir los parámetros de caudal de agua es necesario conocer el proceso de solidificación que ocurre en la palanquilla, para que durante la refrigeración, el proceso de solidificación no sobrepase los límites de la longitud metalúrgica ni tampoco se acorte el cono líquido, originando tensiones en la palanquilla que es causal de defectos.
8. La formación del espesor de la corteza en la palanquilla varía de acuerdo con las características propias de la máquina de colada continua, dimensiones grandes de palanquilla necesita una máquina ajustada a las condiciones específicas de fabricación, esto significa que una máquina donde se fabrique palanquillas de dimensiones pequeñas no podría fabricar palanquilla de dimensiones superiores sin originar problemas de solidificación.
9. El mantenimiento del sistema de refrigeración debe ser constante por parte de los operarios, debido a que las condiciones de trabajo a que son sometidos elementos tales como boquillas de rociado, mangueras de transporte de agua, puntos de soldadura en las flautas de agua, etc. implican un deterioro rápido y en detrimento de la estabilidad del sistema de refrigeración.
10. El análisis de las palanquillas por medio de macroataque después de hecha la modificación en los caudales de agua, muestra que los defectos asociados a refrigeración disminuyeron considerablemente, ya que anteriormente el sistema tenía un manejo irregular en las temperaturas y los caudales de agua eran los

mismos para todos los aceros, comprometiendo el mecanismo óptimo de solidificación.

11. La estandarización del proceso de colada continua llevó a que los operarios de ésta parte de la acería redujeran su responsabilidad en la manipulación de los parámetros operativos del sistema de refrigeración, el cual conducía a seguidas variaciones en el manejo del proceso de fabricación del acero.

## 7. RECOMENDACIONES

1. Los parámetros utilizados concretamente para ésta investigación, son propios para la planta en la que se analizaron las condiciones de trabajo, en la mayoría de los casos éstas condiciones son diferentes para cada planta, debido a diferencias en la temperatura del acero, sistemas de refrigeración y composición química del acero. Por consiguiente, se recomienda no utilizar los mismos parámetros en otra planta.
2. Uno de los problemas que se presentan en la refrigeración es la calidad del agua que es rociada en la superficie de la palanquilla. Por lo tanto, debe ser según los parámetros establecidos para el agua de refrigeración. Se recomienda realizar un tratamiento especial antes de que entre al sistema y una limpieza continua a los tanques de agua donde se almacena.
3. Se recomienda que los factores críticos sean manejados de tal manera que el sistema de refrigeración sea parte integral del proceso de fabricación del acero, estandarizando cada etapa antes de comenzar la colada, ésta estandarización se debe cumplir aunque se presenten problemas durante el proceso.
4. Si se sospecha que hay algún daño físico en el sistema de refrigeración como mangueras rotas, boquillas tapadas, etc. que disminuyan la presión de salida de agua, es recomendable cambiar el sistema de funcionamiento de automático a manual, manteniendo en lo posible los caudales de agua en las zonas de refrigeración en las que no se presenta el problema y tratando de compensar ésta pérdida de presión con la apertura manual de las válvulas.

## BIBLIOGRAFÍA

A. JACKSON. Fabricación De Aceros Al Oxígeno. Bilbao: Ediciones URMO, 1966.  
278 p

ACERÍAS DE CALDAS S.A. Diagramas de Máquina de Colada Continua.  
Manizales: Departamento de diseño, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method  
for Macroetching Metals and Alloys. (ASTM E340-00e1). 1996

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Method of  
Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings. (ASTM E381-01).  
1990.

ASPECTOS DE FABRICACIÓN Y CALIDAD DE LA OBTENCIÓN POR COLADA  
CONTINUA DE PALANQUILLA, REDONDOS Y OCTÁGONOS. En: revista  
Instituto Argentino de Siderurgia. N° 96, p 81. Buenos aires: IAS, Agosto de 1992.

BRIAN, Thomas. Curso Sobre Colada Continua. En: Revista Instituto Argentino de  
Siderurgia N° 165, p 55. Buenos Aires: IAS, Abril de 1999.

CEMES. Casting processes. (Online). (Lyon, France).2001  
<http://tmp.cma.fr/tmp/img-tmp/ppt-tmp/Casting.html>

COLADA CONTINUA Y METALURGIA EN CUCHARA. En: Revista Instituto  
Argentino de Siderurgia N° 56, p 62. Buenos Aires: IAS, Enero de 1981.

CONTINUOUS CASTING OF STEEL. Some Principles and Practical Notes. Udine, Italia: Select Technological Supplies, 1993. 84 p

DICCIONARIO SIDERÚRGICO TRILINGÜE. Tercera Edición. Buenos Aires: ILAFA, 1994. 639 p.

FIBRETECH. Applications Continuous Casting (online). 2004  
[http://www.fibretech.com/refractories\\_steel\\_\\_datasheet\\_continuous\\_tundish.htm](http://www.fibretech.com/refractories_steel__datasheet_continuous_tundish.htm)

G. Eberhardt. Curso De Colada Continua. Tomo 1. Buenos Aires: IAS. 1986. 176p.

GILLES, Herbert L. Primary and Secondary Cooling Control (online). Available as pdf. (Pittsburg, U.S.A.), 2003.  
[www.Bethlehem\\_Steel\\_Corp.com/resec\\_cons/chap\\_18.html](http://www.Bethlehem_Steel_Corp.com/resec_cons/chap_18.html)

JEREMY Jones. Electric Arc Furnace Steelmaking. En: Revista American Iron and steel Institute. N° 235, p 88. Pittsburg: Nupro Corporation, 1999

KP., Korotkov; HP. Mayorov; AA Skvortsov y AD Akimenko. The Continuous Casting of Steel Commercial Uses. London: Pergamon Press. 1960. 171 p

MORRAL, Fr.; JIMENO, E. y MOLERA, P. Metalurgia General. Tomo 1. Barcelona: Reverté S.A., 1982. 245 p

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Tomo 2. Barcelona: Reverté S.A., 1982. 298 p

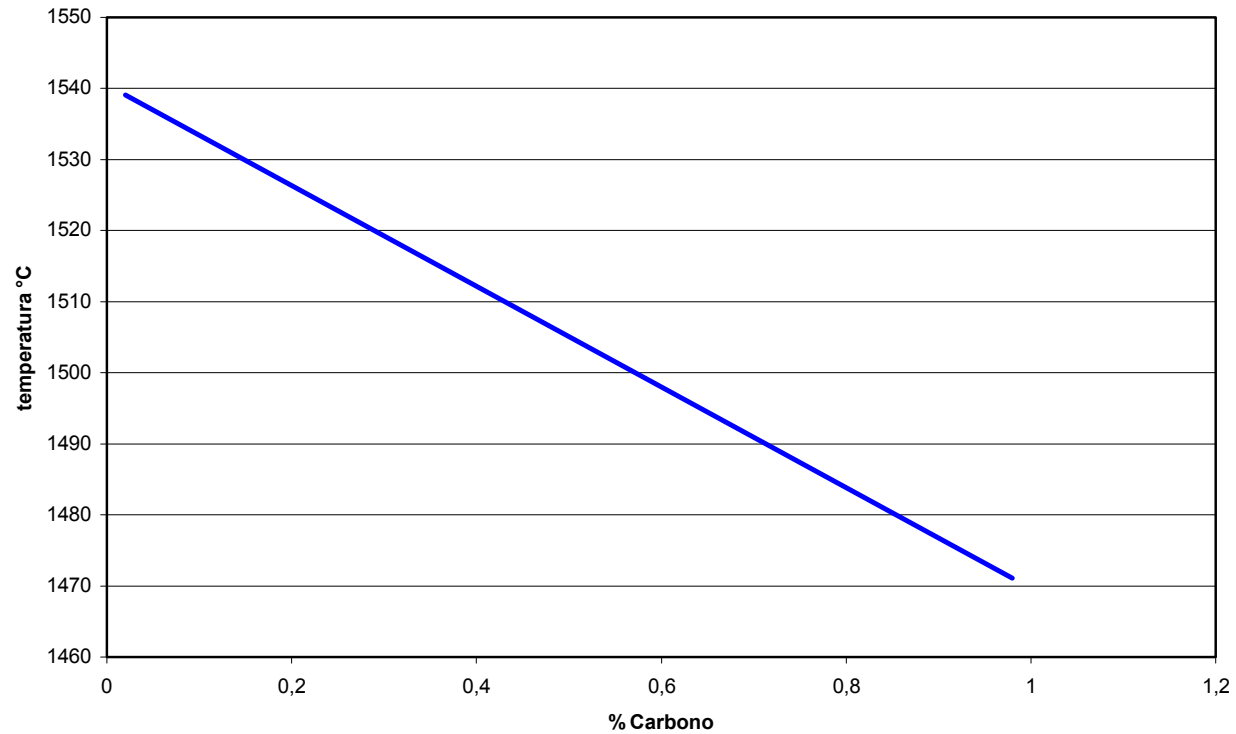
S.G.R., Brown. The Numerical Simulation of Continuous and Investment Casting (online). (Lausanne, Switzerland). 2002  
[www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Brown/Brown-0201.html](http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0201/Brown/Brown-0201.html)

STEELMAKING AND REFINING. The Making, Shaping, and Treating of Steel.  
11th Edition, Pittsburgh PA: AISE Steel Foundation, 1998. p. 180-263.

THE METALS SOCIETY. Solidification and Casting of Metals. New York. 1994.

## Anexo A

**Figura 35.** Temperatura de liquidus del acero en función del porcentaje de carbono sin elementos aleantes.



Fuente: CONTINUOUS CASTING OF STEEL. Some Principles and Practical Notes. Udine, Italia: Select Technological Supplies, 1993. 84 p

## Anexo B

**Tabla 33:** Cuadro de composición química de aceros.

<b>Acero A-572 grado 50</b>		
<b>ELEMENTO</b>	<b>NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC (1985)</b>	<b>NORMA ACASA</b>
% carbono	0.23 máx.	0.18-0.21
% manganeso	1.35 máx.	0.65-0.70
% silicio	0.40 máx.	0.18-0.20
% azufre	0.05 máx.	0.030 máx.
% fósforo	0.04 máx.	0.030 máx.
% níquel + cromo	-----	0.40 máx.
% cobre	-----	0.40 máx.
% niobio	0.005 – 0.05	0.010-0.020
% vanadio	-----	0.010-0.020
<b>Acero A-36</b>		
<b>ELEMENTO</b>	<b>NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC (1920)</b>	<b>NORMA ACASA</b>
% carbono	0.26 máx.	0.16-0.21
% manganeso	-----	0.45-0.50
% silicio	0.40 máx.	0.15-0.18
% azufre	0.05 máx.	0.025max
% fósforo	0.04 máx.	0.025 máx.
% níquel + cromo	-----	0.50 máx.
% cobre	0.20 min. Cuando se especifique	0.55 máx.
% niobio	-----	-----
% vanadio	-----	-----
<b>Acero 1020</b>		
<b>ELEMENTO</b>	<b>NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC (243)</b>	<b>NORMA ACASA</b>
% carbono	0.18-0.23	0.18-0.21
% manganeso	0.30-0.60	0.45-0.55
% silicio	-----	0.18-0.20
% azufre	0.050 máx.	0.030 máx.
% fósforo	0.040 máx.	0.025 máx.
% níquel + cromo	-----	-----
% cobre	-----	-----
% niobio	-----	-----

<b>Acero 1045</b>		
<b>ELEMENTO</b>	<b>NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC (243)</b>	<b>NORMA ACASA</b>
% carbono	0.43-0.50	0.44-0.46
% manganeso	0.60-0.90	0.62-0.70
% silicio	-----	0.18-0.20
% azufre	0.050 máx.	0.030 máx.
% fósforo	0.040 máx.	0.025 máx.
% níquel + cromo	-----	-----
% cobre	-----	-----
% niobio	-----	-----
% vanadio	-----	-----
<b>Acero 1060</b>		
<b>ELEMENTO</b>	<b>NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC (243)</b>	<b>NORMA ACASA</b>
% carbono	0.55-0.65	0.56-0.64
% manganeso	0.60-0.90	0.62-0.70
% silicio	-----	0.18-0.20
% azufre	0.050 máx.	0.030 máx.
% fósforo	0.040 máx.	0.025 máx.
% níquel + cromo	-----	-----
% cobre	-----	0.30 máx.
% niobio	-----	0.30 máx.
% vanadio	-----	-----

Fuente: Norma Técnica Colombiana.

## Anexo C

**Tabla 34.** Perfiles de productos fabricados en laminación (NTC 4537).

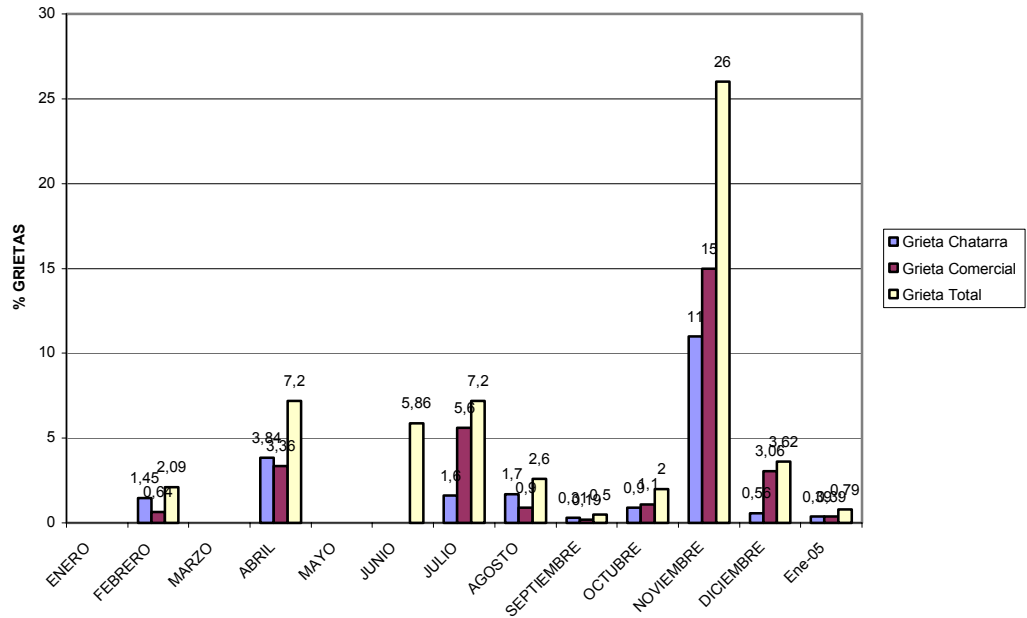
PERFIL Alas iguales		LONGITUD PALANQUILLA (M)	LONGITUD FINAL LAMINADO (M)	
1 ½"	1/8	1.71	91.10	
	3/16	1.99	72.56	
	1/4	1.95	54.71	
1 ¾"	1/8	1.65	72.23	
	3/16	1.95	60.20	
	1/4	2.07	48.22	
2"	1/8	1.81	72.10	
	3/16	2.02	54.31	
	1/4	2.08	42.12	
2 ½"	3/16	2.02	42.98	
	1/4	1.87	30.28	
3"	1/4	1.84	24.58	
	5/16	1.70	18.40	
	3/8	2.02	18.19	
	1/2	1.98	18.08	
4"	1/4	1.48	18.11	
	5/16	1.80	18.36	
	3/8	2.12	18.13	
	1/2	1.92	12.76	
PERFIL Canal U	LONGITUD PALANQUILLA (M)	LONGITUD FINAL LAMINADO (M)	LONGITUD ALMA (mm)	
3" * 4.1 Lb/ pie	1.74	24	75-78.9	
4" * 5.4 Lb/ pie	1.65	18	100.6-104.4	
PERFIL Redondos	LONGITUD DE CORTE (M)			
1 1/8"	1.70			
	4.20			
	6.00			

Fuente: departamento de aseguramiento y control de calidad ACASA.

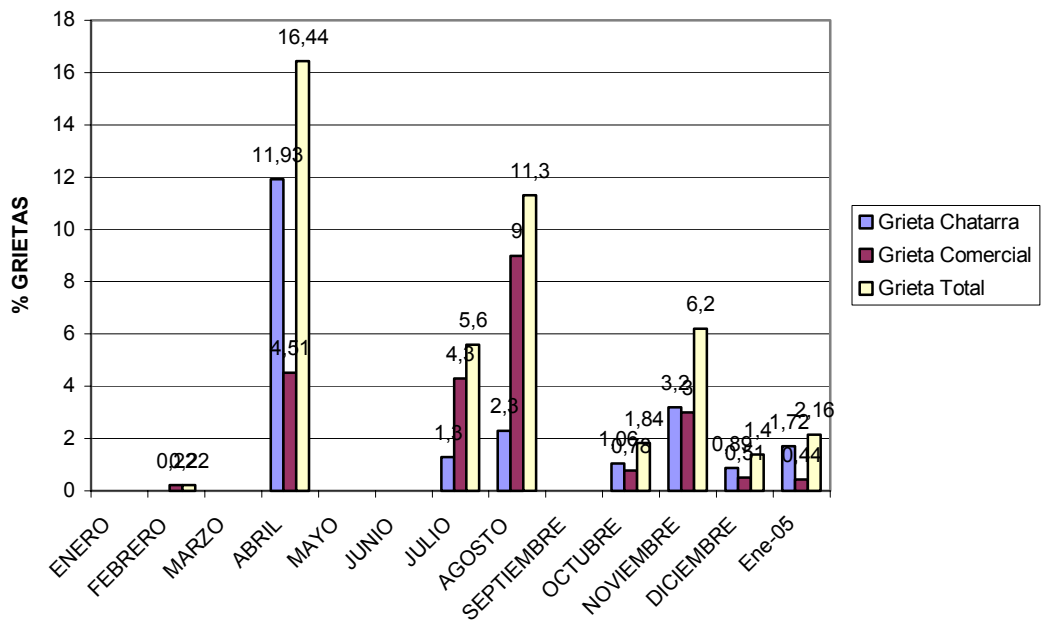
## Anexo D

**Figura 36.** Porcentaje anual de grietas en los productos de laminación.

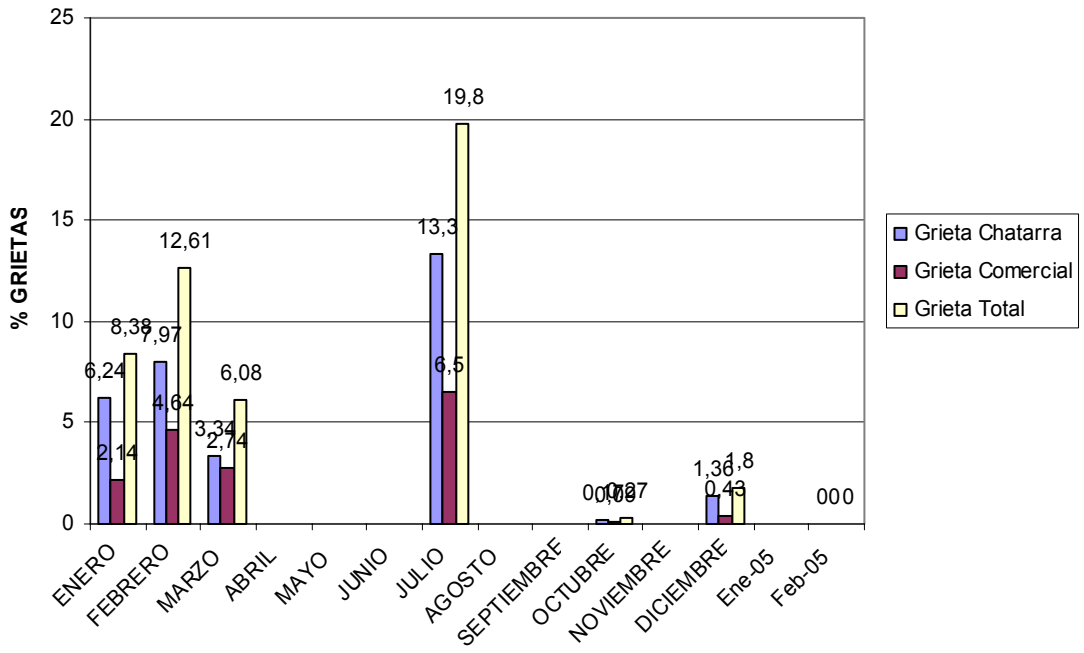
ANGULO 3 \* 5/16



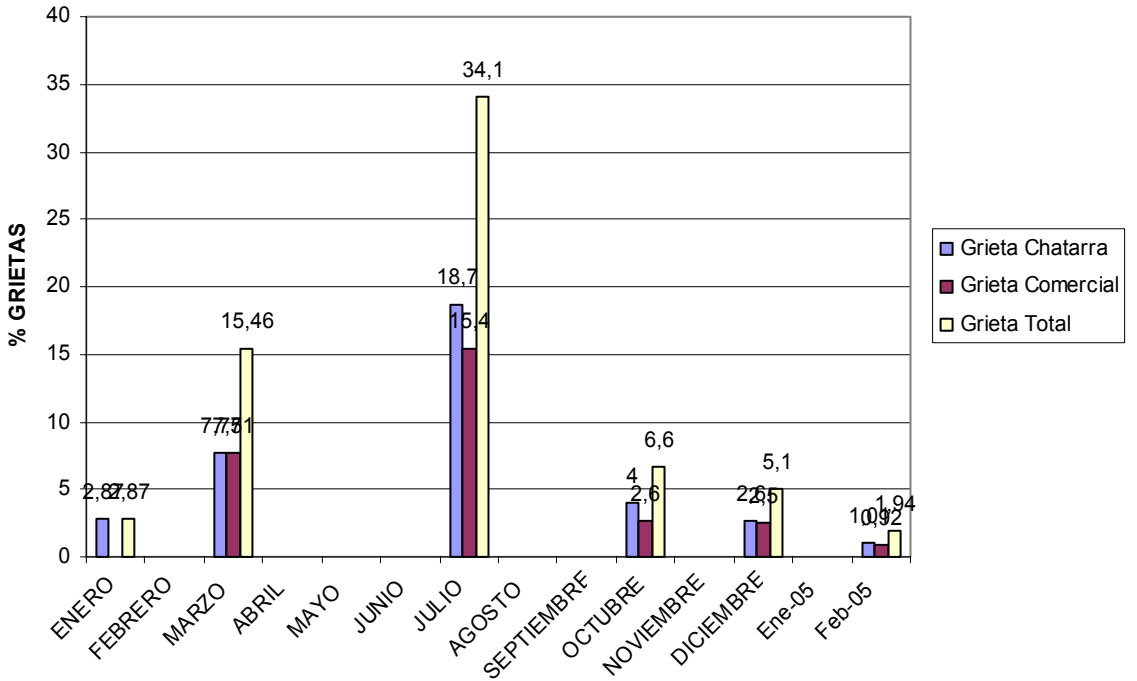
ANGULO 3 \* 3/8



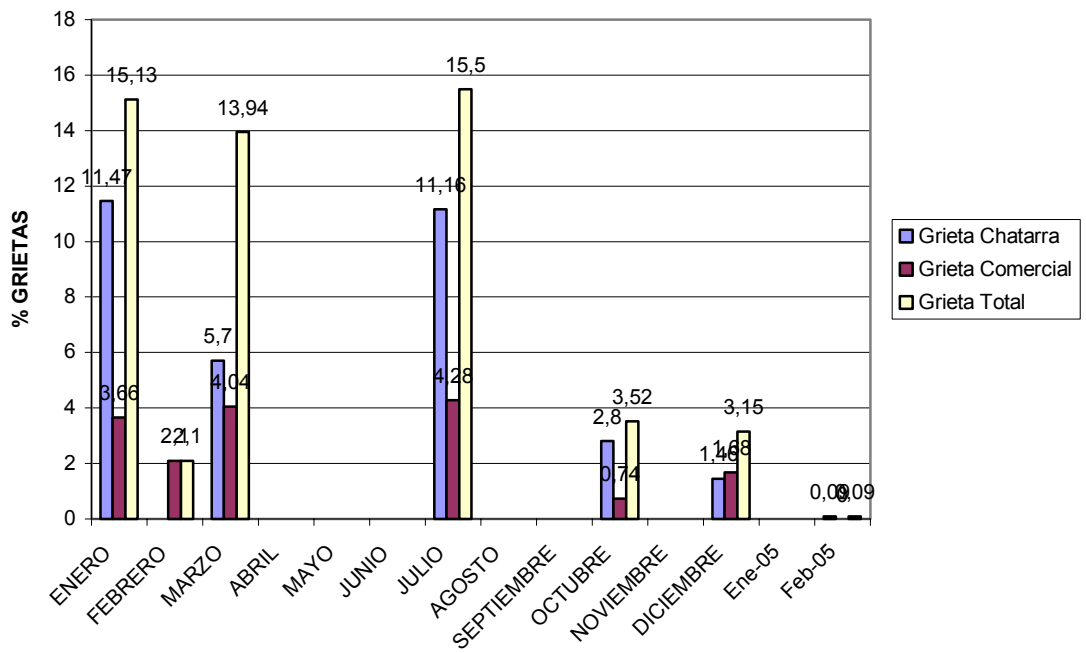
ANGULO 4 \* 1/4



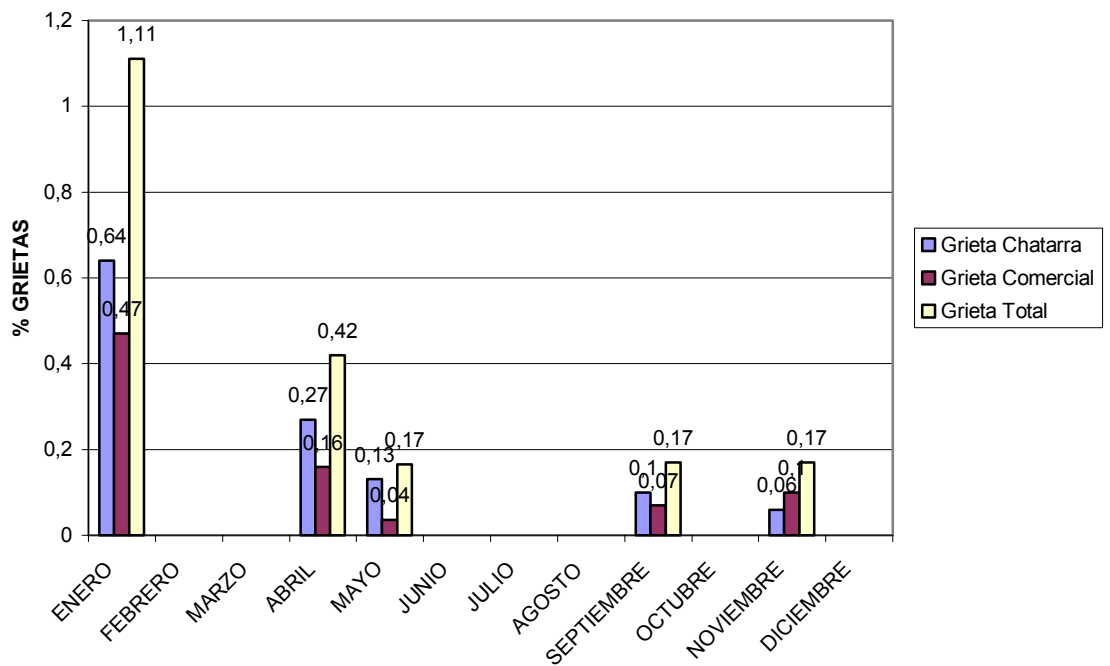
ANGULO 4 \* 1/2



ANGULO 4 \* 5/16



CANAL 3" \* 4.1



CANAL 4" \* 5.4

