

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

**Redução de consumo de energia elétrica na produção de aço em
aciaria elétrica através da reavaliação das temperaturas *liquidus*,
superaquecimento e controle das temperaturas de lingotamento**

Simone Vendruscolo Milesi

Trabalho de Diplomação em Engenharia

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre

2015

II

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha querida irmã pelo apoio incondicional e valores transmitidos, e paciência por todo esse tempo em que permaneci na universidade.

Aos colegas de curso pelos momentos de alegria que compartilhamos juntos e que nunca sairão da minha memória.

Aos amigos que por muitas vezes me ouviram falar sobre um assunto que mal entendiam mas me ajudaram sempre que necessário.

A toda equipe da Aciaria da Gerdau Riograndense, e algumas pessoas que contribuíram de maneira especial na realização deste trabalho e no meu desenvolvimento como profissional e pessoa: Henrique José Bortolotti Martins e José Antonio Carbonell Martins por tornar possível a realização do teste e auxiliar na discussão dos resultados, Luana Silveira de Oliveira e Gustavo Frassini Pelisser pela ajuda na obtenção dos dados, e à toda a equipe do Lingotamento Contínuo que me ajudaram em todos os momentos.

Aos colegas de estagiário Bruno Wartchow Laidens e Gustavo Munhoz, pelo companheirismo e ajuda durante a coleta de dados.

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt pela orientação, disponibilidade e pela incansável dedicação em busca de um curso de graduação de melhor qualidade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	3
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Ciclo da produção de aço em uma aciaria elétrica.....	9
2.1.1 Pátio de Sucatas.....	10
2.1.2 Forno Elétrico a Arco	11
2.1.3 Forno-Panela.....	16
2.1.4 Lingotamento Contínuo.....	18
2.2 Importância do controle da temperatura na fabricação de aço	20
2.3 Influência da composição química no controle de temperatura do aço.....	22
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
Equipamentos Utilizados	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Reavaliação dos valores de $T_{liquidus}$ e superaquecimento	35
4.2 Análise da perda térmica do aço no distribuidor.....	38
4.3 Análise da redução de energia elétrica	39
5. CONCLUSÕES.....	41
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
7. BIBLIOGRAFIA.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de fabricação do aço em aciaria elétrica com lingotamento contínuo (GERDAU, 2007).....	9
Figura 2 – Representação esquemática do forno elétrico a arco. (Curso de aciaria eletrica ABM – 2007).....	12
Figura 3 – Fluxograma de processos realizados no FEA.....	13
Figura 4 – Representação esquemática do forno panela. (GERDAU, 2003)	16
Figura 5- Representação esquemática do Lingotamento Contínuo.	18
Figura 6 - Desenho esquemático de uma estrutura de solidificação típica contendo a zona	20
Figura 7 – Influência da temperatura do aço na estrutura de solidificação. (BRIMACOMBE, 1978)	21
Figura 8 – Região de solidificação do aços no sistema Fe-c(KLIEMANN, 2005) . ^[4] ..	22
Figura 9 – Efeito do teor de carbono na taxa de transferência de calor(SINGH, 1974).	24
Figura 10 – Variação da espessura da camada sólida em função do superaquecimento (GILLES, 2003).	25
Figura 11 – Variação do fluxo de calor em função do super aquecimento(GILLES, 2003).	26
Figura 12 – Efeito do superaquecimento na extensão da zona colunar (COSTA E SILVIA, 1998).	27
Figura 13 - Macrografias no plano longitudinal de placa de lingotamento contínuo. Efeito da temperatura de lingotamento (COSTA E SILVIA, 1998).	27
Figura 14 – Fluxograma explicativo sobre a metodologia usada.....	28
Figura 15 - Variação da temperatura líquidus em função do teor de carbono (BARCELLOS, 2007).	30
Figura 16 – Distribuidor usado no processo de lingotamento contínuo (GERDAU, 2015).	32
Figura 17 – Medida de temperatura utilizando termopar (GERDAU, 2005).	32
Figura 18 – Comparação em temperatura de lingotamento praticada e a ideal.....	37
Figura 19 – Representação da perda térmica do aço X dias de uso do distribuidor.	38

Figura 20 - Representação da perda térmica do distribuidor X dias de uso do distribuidor.....	39
Figura 21 – Comparação entre energia consumida por tonelada na situação normal e na situação de teste no FEA.	40
Figura 22 - Comparação entre energia consumida por tonelada na situação normal e na situação de teste no forno-panela.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de média composição química das últimas 100 corridas do aço SAE 1006.....	31
Tabela 2 – Novos valores T_{liquidus} , superaquecimento e temperatura de lingotamento praticadas.....	35
Tabela 3 – Novos valores de $T_{\text{lingotamento}}$ e ganho teórico de temperatura de lingotamento.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Símbolo/Abreviatura	Descrição
°C	Graus centígrados
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
kg/t	Quilograma por tonelada
kWh/t	Quilowatt hora por tonelada
LD	Linz-Donawitz
m	Metro
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetro
FEA	Forno elétrico à arco

RESUMO

Esse trabalho veio contemplar um projeto de melhoria em uma usina semi-integrada do tipo aciaria elétrica, fornecedora de aços para construção civil e indústria, localizada no Rio Grande do Sul, Brasil. Devido ao presente cenário econômico e visando redução de custos na produção do aço, alguns parâmetros de produção foram reavaliados. O custo em energia elétrica na aciaria contabiliza um grande porcentagem do custo total de produção, tendo em vista isso, tentamos agir de forma a diminuir a mesma, reavaliando os temperaturas praticadas na usina (temperatura de lingotamento, liberação de forno-panela e vazamento no forno elétrico). Devido às mudanças nas composições dos aços produzidos na Gerdau Riograndense ao longo dos anos, e como isso tem influência direta na temperatura de lingotamento, foram recalculadas as temperaturas líquidas ($T_{\text{líquidus}}$) de todos os aços, a partir de fórmulas encontradas na literatura e dados recolhidos na empresa. Após isso, para setarmos novas temperaturas de lingotamento torna-se crucial a análise de perda de temperatura do aço durante o tempo em que o aço permanece no distribuidor. Além da redução da energia elétrica, poderemos reduzir o superaquecimento (diferença em graus entre a $T_{\text{líquidus}}$ e a temperatura de lingotamento), esse parâmetro, se muito elevado, pode intensificar defeitos no lingotamento. Por fim, os objetivos desse estudo são de que estipulando novos valores de $T_{\text{líquidus}}$ e temperaturas de lingotamento aliado com valores menores de superaquecimento, podendo assim diminuir energia elétrica usada na produção do aço em aproximadamente 10 kWh/tonelada e melhorar parâmetros de processo.

ABSTRACT

This work included an improvement project on a semi-integrated electric steelmaking plant, a supplier of steel for the civil engineering construction and the industry, located in Rio Grande do Sul, Brazil. Due to the present economic scenario and aiming to reduce costs in steel production, some production parameters were revalued. Since the cost of electricity in steelmaking represents a large percentage of the production total cost, some actions were taken to try to reduce it by reevaluating the temperatures practiced in the plant (casting temperature, ladle furnace release and leakage in electric arc furnace). Due to changes in the composition of the steel produced over the years at Gerdau Riograndense, and as this has direct influence on the casting temperature, were recalculated the liquidus temperatures ($T_{liquidus}$) of all steels, based on formulas found in the literature and data collected in the company. After that, when setting new casting temperature, it becomes crucial to analyze the loss of steel temperature during the time it remains in tundish. In addition to reducing electricity costs, this projects expects to reduce superheating (the difference in degrees between the $T_{liquidus}$ and the casting temperature), which can intensify defects in casting. Finally, the objectives of this study are that stipulating new $T_{liquidus}$ values and casting temperatures, associated with lower superheat values, can, therefore, reduce electric power used in the production of steel by about 10 kWh/tonne and also improve the process parameters.

1. INTRODUÇÃO

Frente ao cenário de competitividade que o setor de produção vive na atualidade, as indústrias buscam cada vez mais reduzir custos e aumentar produtividade.

Na indústria do aço não é diferente, onde existe a busca constante pela redução do consumo de insumos e de matérias-primas e também o aumento da produtividade, mantendo a qualidade do produto produzido e garantindo lucratividade.

Este trabalho é focado na Aciaria Elétrica, que é responsável pela produção de 1/3 da produção mundial de aço na atualidade (FIGUEIRA, 2007), realizando um papel importante na sociedade utilizando sucata ferrosa de obsolescência como uma de suas principais matérias primas.

A partir dos anos 70, houve uma motivação da substituição do lingotamento convencional pelo lingotamento contínuo dos aços, visando aumentar o rendimento metálico e assim reduzir as perdas metálicas durante o processo.

Segundo Ünal (2006), ao longo dos anos a necessidade de controle de qualidade na produção de aços em aciaria elétricas aumentou, fazendo com que as tecnologias para tal função logo na base da fabricação também evoluíssem. A introdução da etapa do refino secundário teve extrema importância no aumento da qualidade do produto bruto da aciaria.

Os dados deste trabalho foram coletados em uma usina semi-integrada do tipo aciaria elétrica, fornecedora de aços para construção civil e indústria, localizada no Rio Grande do Sul, Brasil.

As crescentes exigências do mercado impõem um ritmo acelerado de aperfeiçoamento do processo siderúrgico. Aços destinados à construção mecânica demandam, atualmente, esforços concentrados das empresas em produzir um material de elevada qualidade, com baixo custo agregado.

Nesse contexto, a avaliação da qualidade de processos e produtos intermediários nas diferentes etapas do processo siderúrgico torna-se essencial para a melhoria de seu rendimento, e conseqüentemente atendimento às propriedades finais do produto.

No processo de lingotamento contínuo ocorreram as maiores evoluções tecnológicas recentes na indústria siderúrgica. Juntamente com as constantes atualizações tecnológicas, desde a substituição do lingotamento convencional até os

atuais processos, as solicitações de qualidade nos produtos finais do lingotamento contínuo também evoluíram, aumentando cada vez mais a complexidade do processo.

O lingotamento contínuo é a última etapa de processamento do aço líquido na Aciaria e, por isso, é crítico em relação à qualidade. Com base nisso o presente trabalho está focado na reavaliação das temperaturas *liquidus* praticadas pela empresa, influenciando diretamente no valor do superaquecimento e temperatura de lingotamento.

Através da composição química pode-se setar novas temperaturas *liquidus*, as quais, somadas ao valor ideal de superaquecimento chega-se à novas temperaturas de lingotamento.

A temperatura de lingotamento influencia diretamente nas temperaturas de vazamento do forno elétrico e de liberação do forno panela. Desta forma, reavaliando a temperatura *liquidus* pode-se estabelecer novos valores de temperatura ao longo do processo, relacionando os resultados diretamente com a redução de custo e melhoria da qualidade do produto produzido.

Como objetivo principal do trabalho buscou-se a redução de consumo de energia elétrica de 10 kWh/tonelada, tanto no Forno elétrico como no Forno-panela, e os objetivos específicos já citados acima, funcionam como pilares para atingir a meta de redução de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tópicos que serão abordados na revisão:

- Ciclo da produção de aço em uma aciaria elétrica
- Importância do controle de temperatura na fabricação do aço
- Importância da composição química no controle de temperatura do aço

2.1 Ciclo da produção de aço em uma aciaria elétrica

A Aciaria Elétrica é responsável pela produção de 1/3 do aço bruto em todo o mundo. Sua principal matéria prima é a sucata ferrosa, que em conjunto com fundentes são fundidos no Forno Elétrico a Arco e passam para próxima etapa que é o Forno Panela, onde ocorre o ajuste da composição química e temperatura do aço líquido para liberação para próxima etapa, a solidificação, a qual se dá no Lingotamento Contínuo. A Figura 1 ilustra o fluxograma do processo sequencial de uma aciaria elétrica em uma usina semi integrada.

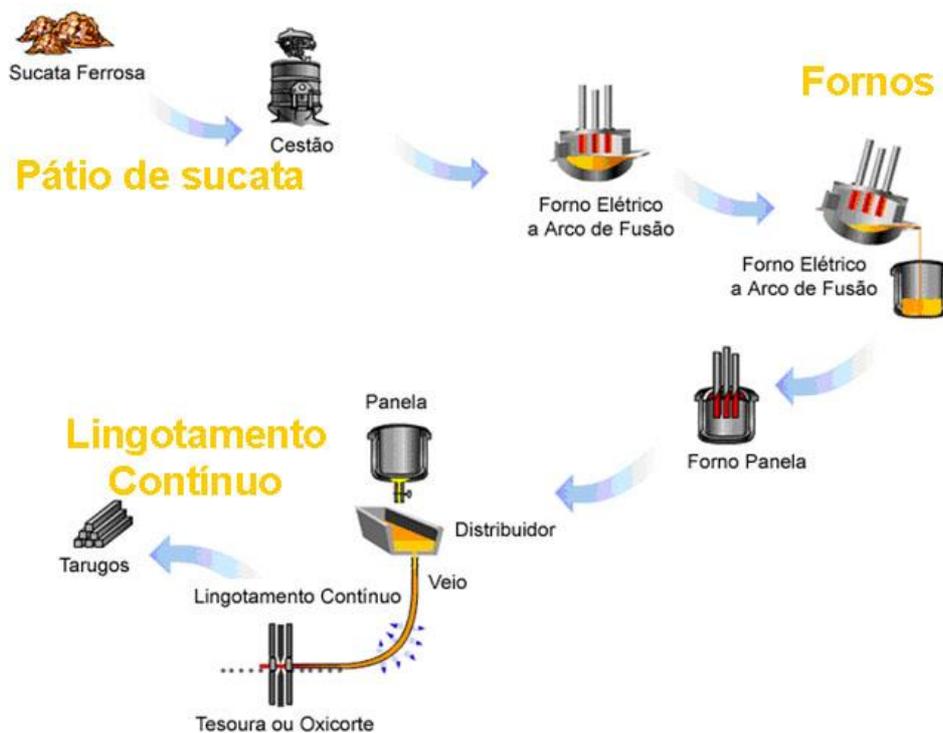


Figura 1 - Fluxograma de fabricação do aço em aciaria elétrica com lingotamento contínuo (GERDAU, 2007).

2.1.1 Pátio de Sucatas

A produção do aço em uma aciaria elétrica inicia-se no Pátio de Sucatas, que é o local onde as matérias primas são recebidas, armazenadas e processadas de acordo com a necessidade.

Segundo a ABNT NBR 16229, as sucatas podem ser classificadas de acordo com os seguintes parâmetros.

Quanto a origem

a) Industrial

Sucata resultante de qualquer processamento industrial.

b) Obsolescência

Sucata resultante de todos os materiais considerados obsoletos e irrecuperáveis para o uso que se destinavam originalmente.

Quanto às características físicas

Quanto à massa específica aparente a sucata (densidade aparente), a sucata pode ser:

a) Leve: massa específica aparente inferior ou igual a $0,6 \text{ t/m}^3$;

b) Pesada: massa específica aparente superior a $0,6 \text{ t/m}^3$.

Quanto aos elementos de liga

a) Não ligada comum

b) Não ligada especial

c) Baixa liga

d) Alta liga

Além da sucata, também ocorre a utilização de ferro-gusa sólido, ferro fundido e ferro esponja como matéria prima ferrosa e carburante (carvão). Este material eleva a produtividade dos fornos sendo utilizado também como fonte energética.

Os principais métodos utilizados no processamento da sucata são:

- a) Prensa-tesoura: Prensa a sucata e, em seguida, através de uma tesoura guilhotina corta a sucata. Em alguns casos a sucata é transferida para um sistema vibratório para a retirada de terra ou outras impurezas.
- b) *Shredder*: Equipamento composto por moinhos de martelos e grelhas, que promovem além da retirada do material orgânico e terra a retirada de materiais não ferrosos como alumínio, cobre, etc.
- c) Prensa pacote: Prensa responsável por gerar pacotes de sucata, normalmente utilizada em embalagens metálicas (latas de alimentos descartadas).
- d) Oxicorte: Equipamento utilizado para cortar sucatas de grande porte. Ex: navios, blocos de máquinas industriais, engrenagens de grandes dimensões, etc.

Após o processamento, as sucatas são dispostas em áreas específicas denominadas de baias. Na maioria das vezes, essas baias, cobertas por uma calha para a proteção da chuva, são carregadas no cestão juntamente com fundentes como as cales calcítica e dolomítica e, em alguns casos, em conjunto com materiais carburantes como por exemplo o coque de petróleo.

2.1.2 Forno Elétrico a Arco

No forno elétrico à arco (Figura 2) é onde ocorre a fusão e refino da carga do cestão. Estes equipamentos possuem uma carcaça metálica coberta por uma abóbada e têm seu interior revestido com material refratário e painéis refrigerados. No caso de fornos de corrente alternada, possuem três colunas de eletrodos de grafita que servem como meio condutor da corrente elétrica para promover a fusão da carga.

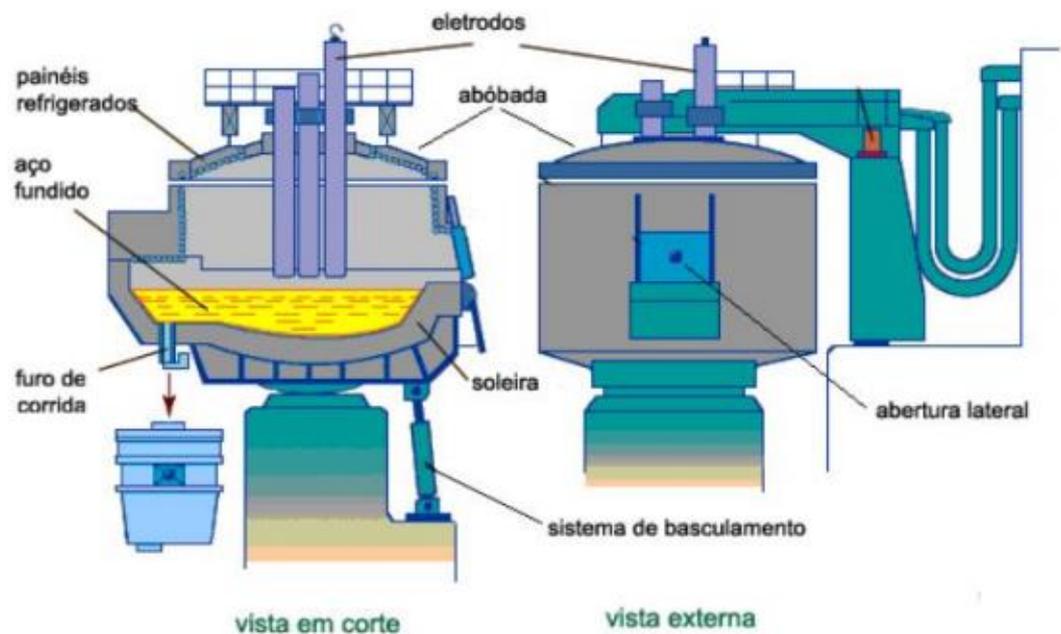


Figura 2 – Representação esquemática do forno elétrico a arco. (Curso de aciaria elétrica ABM – 2007)

Segundo Kliemann (2005), essa etapa é responsável pela fusão da sucata e refino primário do aço. A energia fornecida pelo arco elétrico e pelas reações químicas eleva a temperatura do sistema até a fusão completa da carga adicionada ao forno.

No forno elétrico, sob atmosfera oxidante, também são realizados os processos de descarburização, desfosforação, elevação e homogeneização da temperatura até a faixa ideal de vazamento para a panela.

Operação do Forno Elétrico a Arco

A operação do Forno Elétrico a Arco pode ser dividida em 4 etapas: carregamento, fusão, refino (ou oxidação) e vazamento de acordo com o fluxograma explicativo do processo de operação do FEA, representado abaixo pela Figura 3.

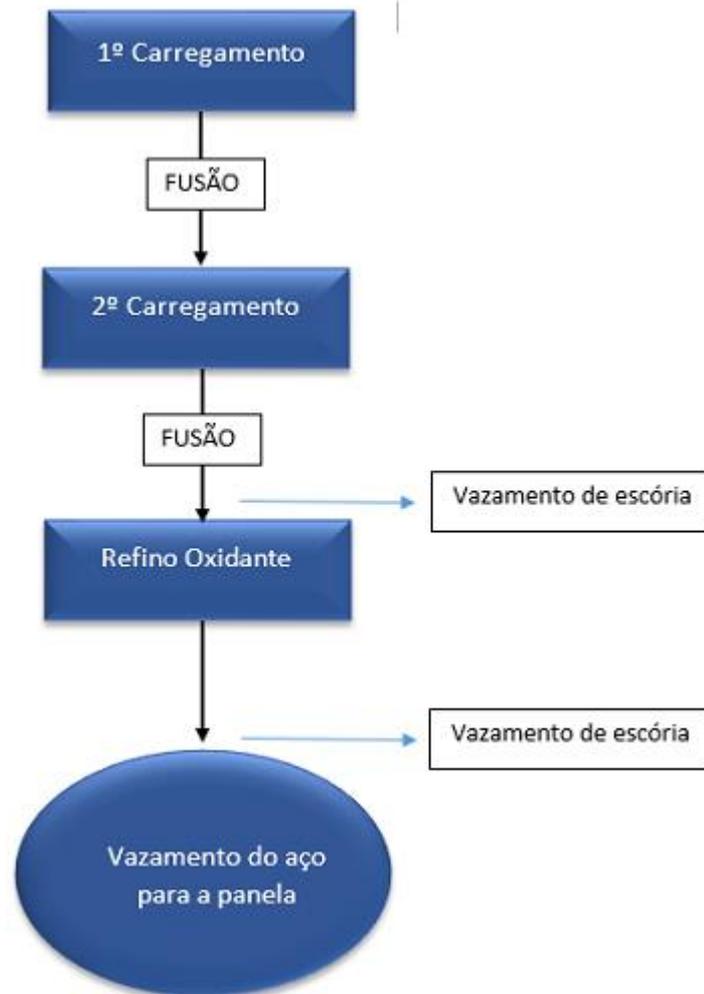


Figura 3 – Fluxograma de processos realizados no FEA.

Carregamento

A sucata previamente preparada (corte e limpeza) é colocada em baias próximas ao forno, separada de acordo com o tipo e composição. A partir destas baias, a sucata é colocada em cestões por meio de pontes rolantes equipadas com eletroimãs, os quais são posteriormente transportados até as proximidades do forno. Uma ponte rolante eleva o cestão de sucata sobre o forno, ao mesmo tempo em que a abóbada é deslocada lateralmente. O operador da ponte rolante eleva o cestão de sucata sobre o forno, baixando-o dentro do mesmo. Nesse momento, um cilindro hidráulico movimentado lateralmente o fundo bipartido, abrindo-o e despejando a sucata dentro do forno.

Devido à baixa densidade da sucata, comparada com a do aço líquido, são necessários dois ou mais carregamentos para a produção de aço líquido o suficiente para uma corrida. Após o carregamento, a abóbada volta para sua posição original e é fechado o forno.

Fusão

A fusão se inicia após o abaixamento dos eletrodos dentro da sucata quando se dá a ignição do arco. Após a ignição, utilizando-se uma potência mais baixa, os eletrodos vão gradativamente penetrando o leito de sucata e o metal líquido vai se acumulando no fundo do forno. Após um período inicial de fusão a baixa potência, quando os eletrodos já penetraram na sucata por cerca de 30 a 50 cm, a potência é elevada até a completa fusão da carga. Nesse momento desliga-se o transformador, elevam-se os eletrodos e abre-se novamente a abóbada para outro carregamento. Para acelerar a fusão injeta-se oxigênio para corte da sucata e oxidação de parte do ferro, gerando calor. Oxigênio também pode ser injetado no metal líquido acumulado no fundo do forno para oxidação do carbono como fonte adicional de calor. Maçaricos oxi-óleo ou oxi-gás, colocados nas paredes laterais, são também utilizados como fontes térmicas para fusão da sucata, principalmente daquela localizada entre eletrodos, este trabalho apresenta um capítulo direcionado à utilização destas ferramentas de injeção. Durante a fusão inicia-se a formação de escória.

A escória é formada a partir da oxidação das impurezas e de aditivos colocados na carga como fundentes (cal e dolomita) ou injetados durante a fusão. Essa escória terá um importante papel na etapa seguinte de refino.

Refino

Após a etapa de fusão, teoricamente o banho já se encontra no estado líquido, com a possível exposição das paredes e abóbada à irradiação do arco. A prática até meados da década de 80 era diminuir o comprimento de arco e, conseqüentemente, a potência para elevar o banho até a temperatura de vazamento, gerando perda de eficiência e produtividade.

Dessa forma, foi desenvolvida a prática de escória espumante, que consiste em criar uma escória que envolva o arco elétrico, absorvendo sua irradiação e funcionando como uma barreira de proteção para os painéis refrigerados e refratários.

Controlando a tensão superficial e a viscosidade da escória é possível reter o monóxido de carbono (CO) gerado no interior da mesma. Essa retenção de gás faz com que o volume da escória aumente, formando uma espuma que vai gradativamente envolvendo os eletrodos e o arco elétrico. A expansão da escória ocorre devido à dificuldade do gás em escoar através da mesma.

A escória de aciaria tem um papel fundamental nas reações de refino, influenciando tanto na cinética das reações quanto na composição final do tarugo. A evolução de sua composição ao longo de uma corrida varia e deve seguir um caminho adequado, para que possibilite a correta formação da espuma e seja capaz de absorver as impurezas envolvidas no processo de fabricação do aço (GUMIERI, 2002).

Os principais objetivos da etapa de refino são a adequação dos teores de fósforo e carbono de vazamento do tipo de aço a ser fabricado e o aquecimento do aço até sua temperatura de vazamento.

Vazamento

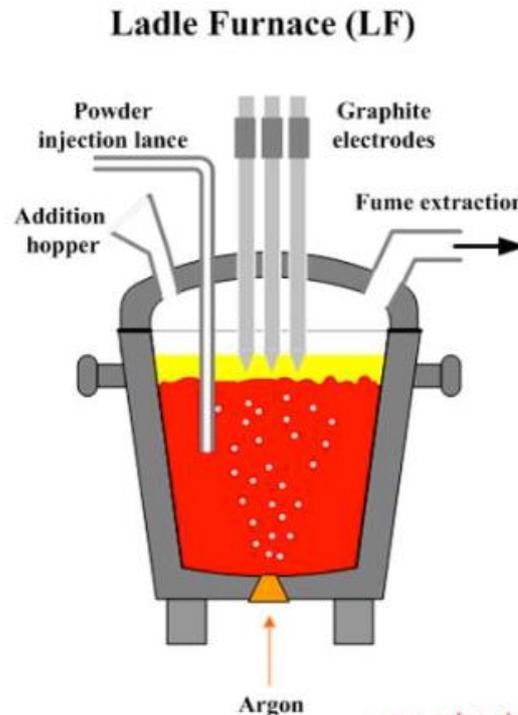
Uma vez que a composição química e a temperatura estão corretas, o aço é vazado em uma panela pré aquecida inclinando-se o forno.

O aço é vazado através de um sistema de vazamento excêntrico (*EBT-Eccentric Bottom Tapping*) que consiste em um furo vertical localizado excêntricamente em um dos lados do forno. Esse sistema, além de permitir um maior controle da passagem de escória para a panela, pelo fato do jato de aço ser mais fechado, reduz a absorção de nitrogênio e hidrogênio durante o vazamento. O controle do fluxo de aço é realizado através de uma válvula gaveta que controla a abertura do furo. Durante o vazamento, desoxidantes e algumas ligas são adicionadas no jato de aço para aproveitar o efeito de turbulência.

Ao término do vazamento, em algumas, parte do aço líquido é deixado no forno para formar o chamado fundo úmido, para acelerar a fusão da sucata e o refino na corrida seguinte, fato que aumenta a eficiência da operação do Forno Elétrico a Arco.

2.1.3 Forno-Panela

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática do Forno-Panela:



**Figura 4 – Representação esquemática do forno panela.
(GERDAU, 2003)**

O refino secundário tem como principal função o refino secundário que é a desoxidação do metal líquido proveniente do Forno Elétrico a Arco, dessulfuração e desgaseificação (retirada do Hidrogênio e do Nitrogênio).

Nessa etapa são realizadas as operações de injeção de gases inertes para a homogeneização do banho, ajustes térmicos da corrida e correção da composição química. Além disso, são feitos ajustes na escória para garantir uma eficaz remoção do enxofre (dessulfuração) e um menor consumo dos refratários das panelas. Essa etapa também é conhecida como refino redutor, por ser aquela onde há a desoxidação do aço.

O aquecimento do banho metálico é realizado por eletrodos de grafita similares aos utilizados no forno elétrico, porém, normalmente de menor diâmetro. Para garantir uma boa homogeneização da temperatura e aceleração das reações que ocorrem no

seio do banho, é feita a agitação do mesmo com a injeção de gases inertes pelo fundo da panela (rinsagem).

Dentre as inúmeras vantagens da utilização deste equipamento (JOHN, 2009) destacam-se as seguintes:

- a) Aumento da produtividade do Forno Elétrico a Arco por reduzir os tempos de refino no interior do forno, além de favorecer vazamentos a temperaturas mais baixas;
- b) Melhora do ajuste da composição química, principalmente em aços alta liga;
- c) Melhora a qualidade dos aços, pela remoção dos gases O_2 , N_2 e H_2 ;
- d) Aumento do rendimento de ligas adicionadas.

2.1.4 Lingotamento Contínuo

A Figura 5 mostra uma representação esquemática do sistema de Lingotamento Contínuo, em uma usina semi integrada.

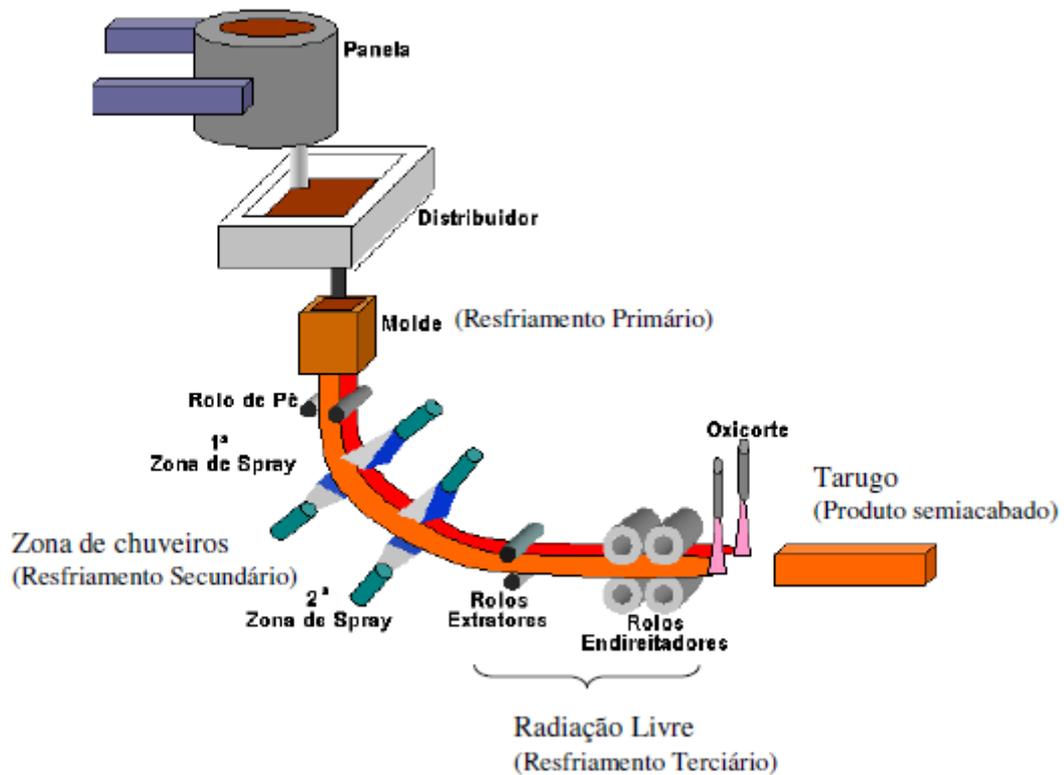


Figura 5- Representação esquemática do Lingotamento Contínuo.

(GERDAU, 2003)

O processo de lingotamento contínuo do aço constitui-se da solidificação contínua do aço líquido num produto semiacabado (placas de seção transversal retangular e barras de seção transversal quadrada ou circular) por meio da extração de calor e é o último estágio onde se trabalha com o aço ainda no estado líquido (ASSUNÇÃO,2007).

É através do sequenciamento de corridas que se dá a continuidade deste processo, aonde o aço líquido da panela é transferido para um distribuidor e deste para os moldes nos veios. A solidificação se dá nos moldes, que possibilita a produção contínua de tarugos, placas, blocos ou tiras, cujas dimensões podem variar de

equipamento para equipamento. A continuidade do processo está diretamente relacionada ao controle dos tempos e temperaturas de processamento, evitando-se interrupções e aumentando a produtividade.

A função mais importante do molde, além de dar forma ao veio e suportá-lo nos estágios iniciais da solidificação (SAMARASEKERA, 1982), é a de remover o calor do aço para permitir a formação de uma pele solidificada com espessura suficiente para suportar o metal líquido no interior do veio. É também importante que o molde seja capaz de remover o calor uniformemente para evitar a formação de regiões menos espessas localizadas na pele, que podem romper ou causar trincas superficiais.

Como a solidificação é uma transformação de fase, controlada essencialmente pela transferência de calor, o primeiro problema que se deve focar no estudo do processo de lingotamento contínuo é a descrição do perfil térmico que se desenvolve no veio durante o processo. Como o aço é lingotado a uma temperatura superior à temperatura *liquidus*, a energia representada pelo calor sensível de superaquecimento deve ser removida antes de se iniciar a solidificação.

Assim que o superaquecimento seja removido nesta região, inicia-se o processo de solidificação do aço, devido às diferenças de densidade entre o aço sólido e líquido e às transformações de fase no estado sólido, a contração sofre uma pressão contrária, também conhecida como: “pressão ferrostática” do aço líquido. Como a resistência mecânica do aço em temperaturas próximas do ponto de fusão é baixa, o sólido permanece em contato com o molde. Com os resfriamentos posteriores ocorre a redução da temperatura do sólido e um aumento em sua espessura até um instante tal que ele seja resistente o bastante para vencer a pressão ferrostática, momento em que a pele solidificada desloca-se da parede do molde.

Como o veio está em movimento descendente, dado pela velocidade de extração, a força imposta pela pressão ferrostática aumenta continuamente à medida que o veio desce, podendo superar a resistência do sólido obrigando-o a um novo contato com o molde, que novamente melhora as condições de extração de calor promovendo um novo afastamento da interface sólido-molde.

2.2 Importância do controle da temperatura na fabricação de aço

A temperatura exerce grande influência na solidificação do aço dentro do molde do lingotamento contínuo. Devido ao grande gradiente térmico, assim que o aço entra no molde, forma-se uma zona coquilhada constituída de dendritas finas próximas da superfície.

Uma zona colunar é formada, onde as dendritas crescem quase que perpendicularmente à superfície da peça lingotada. Uma terceira zona é, então, formada na região central da seção lingotada. Nesta região, as dendritas estão aleatoriamente orientadas ou distribuídas em grãos equiaxiais.

As três zonas descritas acima descrevem a estrutura de solidificação, que pode ser visualizada na **Figura 6**. Esta estrutura influencia significativamente a qualidade do produto lingotado, sendo a estrutura colunar bastante sensível à formação de defeitos e macrosegregações (KLIEMANN, 2005).

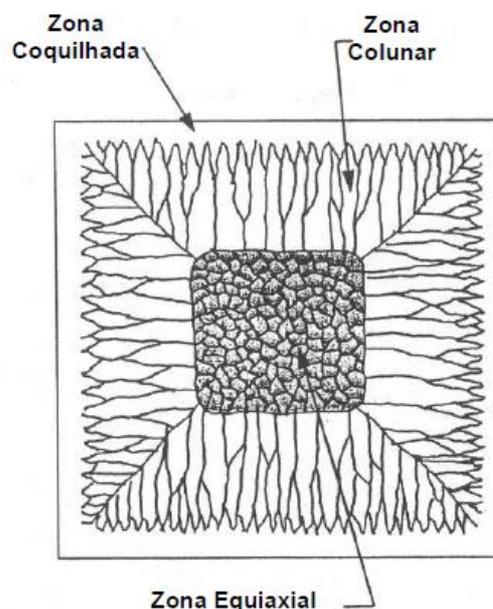


Figura 6 - Desenho esquemático de uma estrutura de solidificação típica contendo a zona coquilhada, zona colunar e equiaxial. (SZEKERES, 2005).

A estrutura final gerada no lingote é influenciada pela temperatura de lingotamento, assim como o número de inclusões e segregação. O nível de inclusões apresenta-se inversamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura do aço líquido no banho, a flotação das inclusões é favorecida (GARCIA,2006).

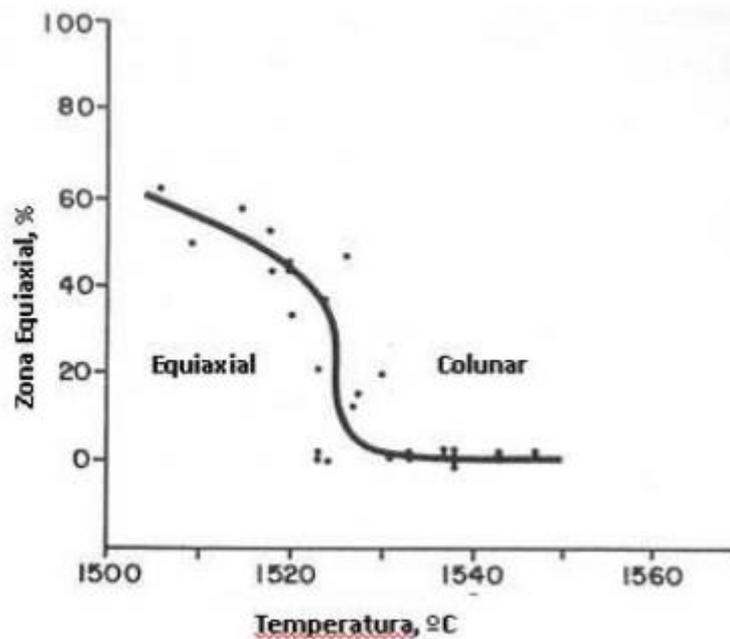


Figura 7 – Influência da temperatura do aço na estrutura de solidificação. (BRIMACOMBE, 1978)

Entre outros fatores a temperatura influencia na deformação de seção de tarugos. Segundo Brimacombe (1977), defeitos como romboidade e convexidade em tarugos de lingotamento contínuo são ligados diretamente à temperatura e essas peças acabam sendo sucateadas.

Alguns estudos relatam que a formação de diversos tipos de trincas internas e superficiais aparecem devido as altas temperaturas de lingotamento, sendo esse um dos principais fatores responsáveis por esse tipo de não conformidade. Esse tipo de defeito acaba gerando problemas no decorrer do processo, ou seja, nas laminações, levando a perda de produtividade e rendimento (KONISHI, 2002).

Outro problema recorrente no processo de lingotamento contínuo é conhecido como “freezing”, isso acontece quando o aço líquido dentro do distribuidor não está com a viscosidade adequada para permitir a transferência para o molde sem que ocorra a solidificação do aço na passagem das válvulas. Esse fenômeno ocorre unicamente pela baixa temperatura dentro do distribuidor devido as perdas térmicas do processo (MATOS, 1983).

As perfurações podem ter como motivo principal de ocorrência as altas temperatura de lingotamento somadas com alta velocidade de lingotamento. Esse fenômeno também conhecido como “break out” consiste no rompimento da pele solidificada na saída do molde, a qual causa um derramamento de aço líquido do

interior do tarugo, ocasionando uma parada de produção. Segundo estudos já realizados, aliando fatores como baixa velocidade de lingotamento e temperaturas elevadas fará com que o aço permaneça por mais tempo dentro do molde, fazendo com que essa pele aumente sua espessura, dificultando as perfurações (IRVING, 1993).

2.3 Influência da composição química no controle de temperatura do aço.

A solidificação do aço é interferida diretamente pela composição química do mesmo. Alguns estudos realizados enfatizam a diferença de comportamento térmico com as diversas reações de transformação de fase que ocorrem no aço durante a solidificação e o posterior resfriamento. Essas reações são muito estudadas e podem ser visualizadas no diagrama Fe-C, visto na Figura 8.

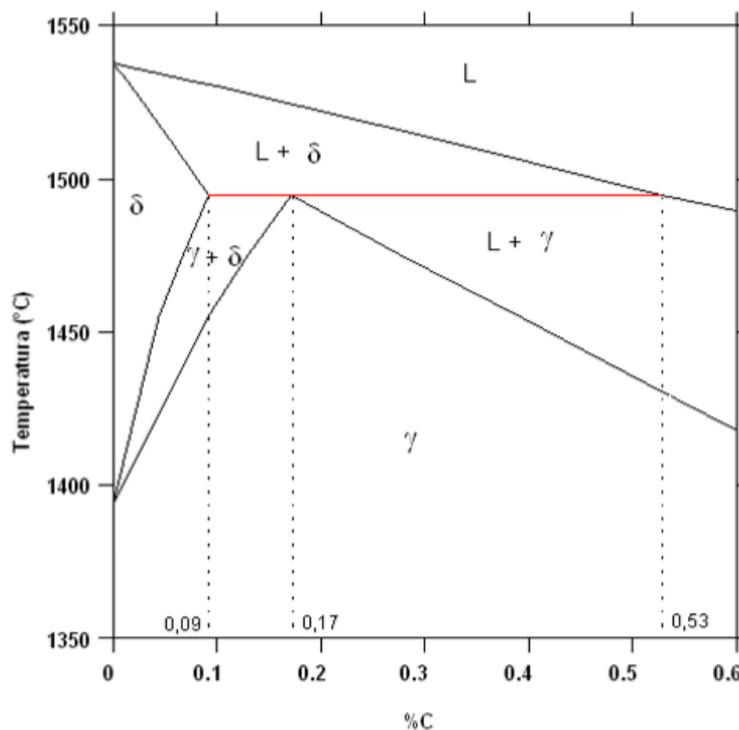


Figura 8 – Região de solidificação do aços no sistema Fe-c(KLIEMANN, 2005) .[Erro! Indicador não definido.]

A solidificação pode acontecer em diferentes trajetórias, como mostrado no diagrama acima. As quais podem ser divididas em grupos, de acordo com a porcentagem de carbono.

No primeiro grupo temos aços com teor de carbono menor ou igual a 0,09%, denominados de hipoperitéticos, possuem temperatura liquidus acima de 1530°C e, conforme a temperatura vai diminuindo, inicia-se a formação da fase sólida denominada ferrita delta (δ -Fe). Para esta composição, não ocorre nenhuma outra transformação até a solidificação completa.

O segundo grupo de aços o qual apresenta um teor de carbono entre 0,09% e 0,53%, denominados peritéticos, a solidificação ocorre a 1493°C e se caracteriza pela reação da ferrita delta com o líquido gerando austenita. Pode-se dividir este grupo em 2 outros subgrupos em função do tipo de estrutura resultante da reação peritética. O primeiro subgrupo, hipoperitéticos, abrange os aços com teores de carbono entre 0,09 e 0,17%. Para esta composição, a estrutura resultante da reação peritética é ferrita delta (δ -Fe) e austenita (γ). No segundo subgrupo, hiperperitéticos, são considerados os aços com teor de carbono acima de 0,17%, onde após a reação peritética, estes apresentam ainda, fase líquida e austenita.

No terceiro grupo, hiperperitéticos, temos os aços com teores de carbono acima de 0,53%, onde a solidificação é totalmente austenítica, ocorrendo apenas com fase líquida e austenita presente.

Estudos (SINGH, 1974) revelaram que o fluxo de calor médio na região do molde é função da porcentagem de carbono (até 1,7 % C). Então, conclui-se que para concentrações até 0,12 %, o fluxo de calor diminui (valor mínimo), como consequência do aumento do gap de ar na interface metal/molde. Acima de 0,12%C, o fluxo de calor volta a aumentar mantendo aproximadamente constante para concentrações acima de 0,25%, como mostra a Figura 9. Outros autores concluíram que o efeito do carbono na transferência de calor no molde mostra que o fluxo de calor para aços peritéticos é muito menor que para outros aços carbono.

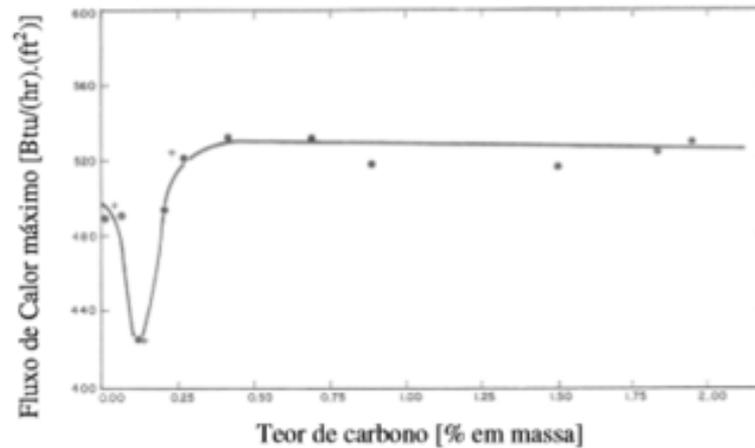


Figura 9 – Efeito do teor de carbono na taxa de transferência de calor(SINGH, 1974).

2.3.1 Temperatura líquidus e superaquecimento

A temperatura liquidus descreve a máxima temperatura na qual cristais podem coexistir com o material em fusão em equilíbrio termodinâmico. Acima da dessa temperatura o material é homogêneo, abaixo dela os cristais começam a se formar no material fundido. As temperaturas de transformação Solidus e Liquidus dos aços são parâmetros dependentes da composição e seus valores são de grande importância em qualquer modelo teórico de simulação de processos, pois define as temperaturas iniciais e finais da solidificação.

O superaquecimento pode ser definido como a diferença entre a temperatura de lingotamento e a sua temperatura liquidus, a qual representa a força motriz da transferência de calor da porção líquida do aço para a zona pastosa, onde a solidificação está iniciando. Estudos (GILLES, 2003) mostram que o calor sensível do superaquecimento e o calor latente de fusão são transferidos através da camada sólida de aço e, portanto, quanto maior for o superaquecimento, menor será a taxa de solidificação e, conseqüentemente, menor será a espessura da camada de sólida, conforme mostrado na Figura 10.

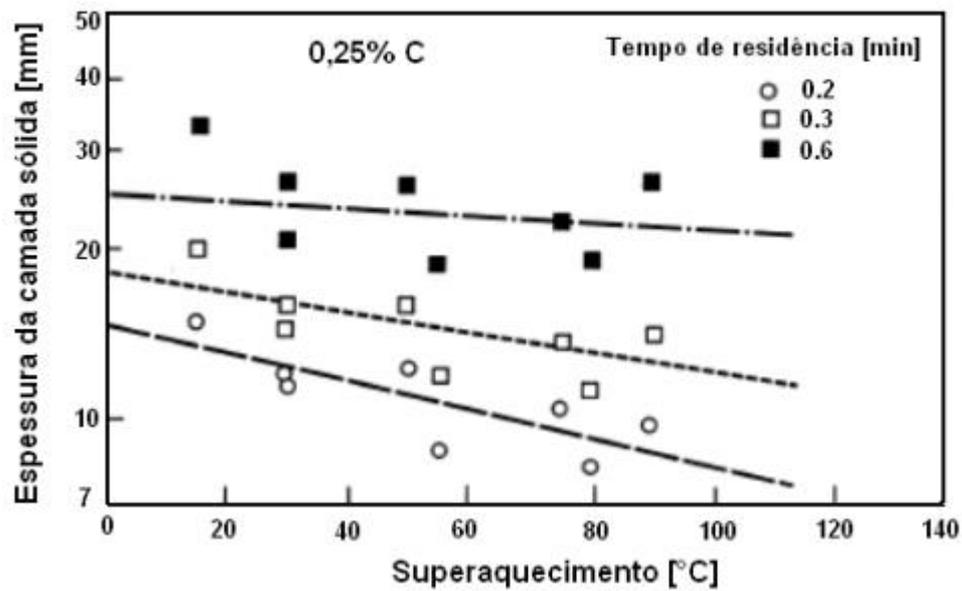


Figura 10 – Variaç33o da espessura da camada s33lida em funç33o do superaquecimento (GILLES, 2003).

Uma camada s33lida mais fina tem a capacidade de proporcionar uma resist33ncia t33rmica menor, devido 33 um *gap* (camada de separaç33o f33sica entre o metal e o molde) menor entre o veio e o molde, e eleva a taxa de transfer33ncia de calor. A Figura 11 mostra que um aumento de 10°C no superaquecimento pode aumentar a transfer33ncia de calor em 1% a 2%, dependendo das condiç33es de lingotamento.

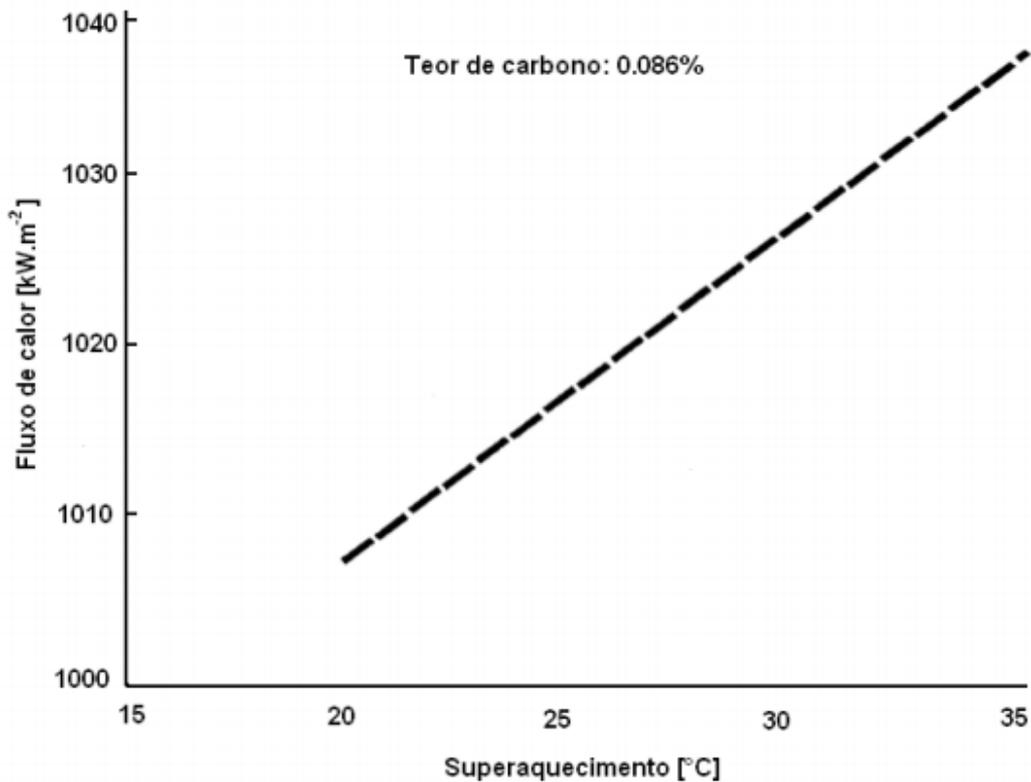


Figura 11 – Variação do fluxo de calor em função do super aquecimento(GILLES, 2003).

A temperatura de lingotamento está diretamente ligada aos defeitos gerados no lingotamento. Normalmente, esta temperatura é expressa como um superaquecimento acima da temperatura liquidus do aço. Como mostra na Figura 12 e Figura 13, com o aumento do superaquecimento temos um aumento da zona colunar, e é nessa zona onde podemos observar uma maior concentração dos defeitos que ocorrem durante o lingotamento.

Além de influenciar diretamente a estrutura do produto solidificado a definição desta temperatura tem impacto na definição de todas as temperaturas de processo (temperatura de liberação de forno panela e temperatura de vazamento do forno elétrico).

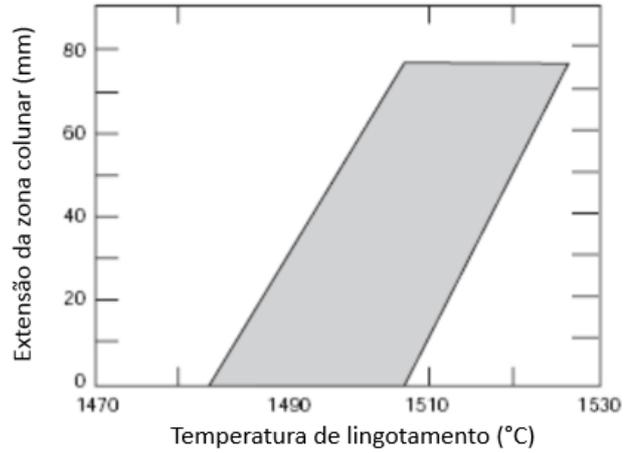
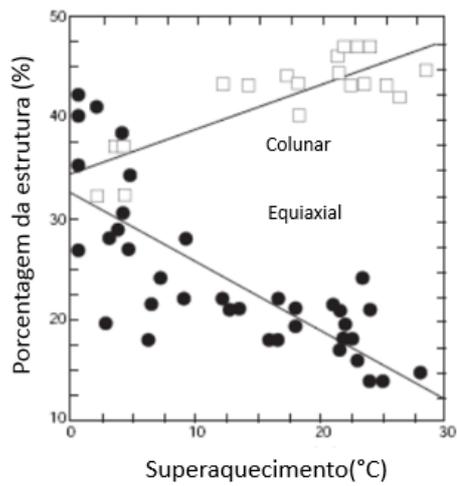


Figura 12 – Efeito do superaquecimento na extensão da zona colunar (COSTA E SILVIA, 1998).

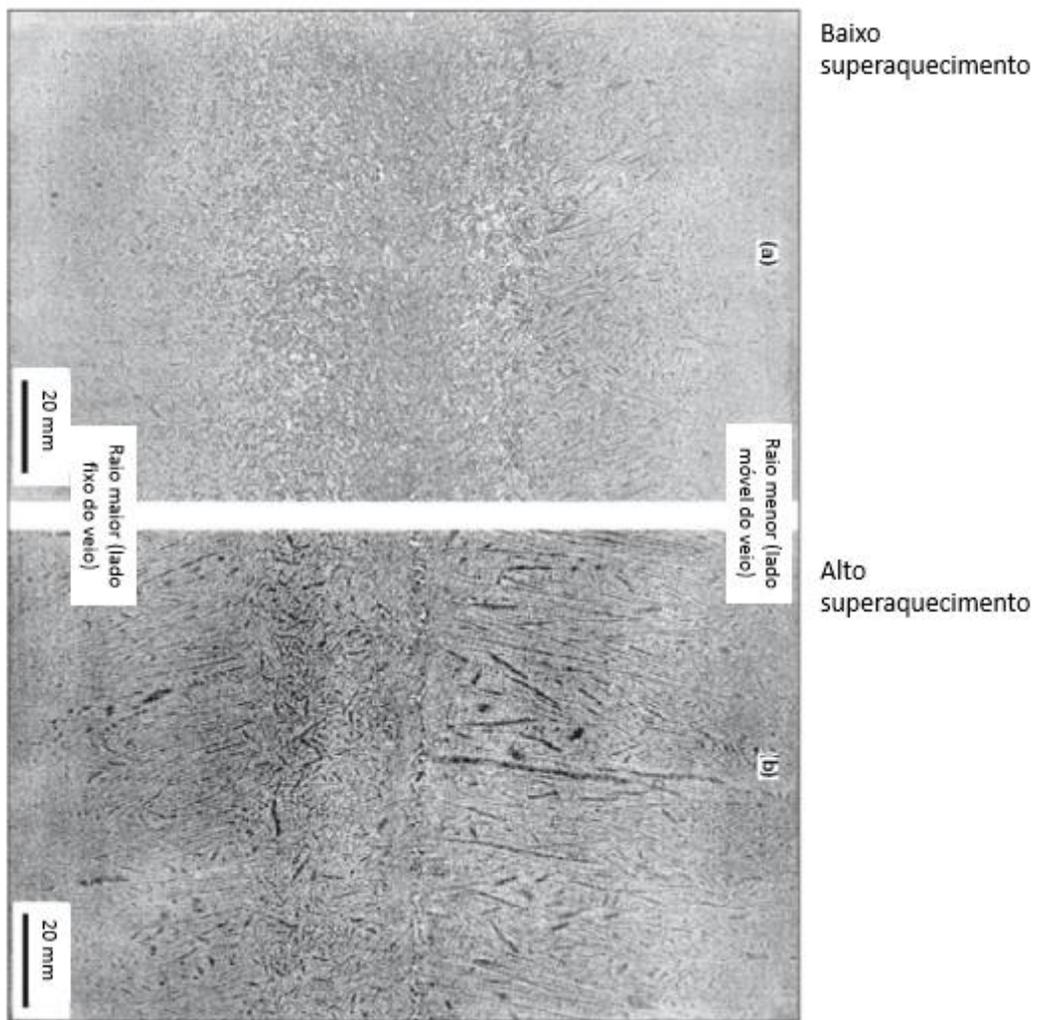


Figura 13 - Macrografias no plano longitudinal de placa de lingotamento contínuo. Efeito da temperatura de lingotamento (COSTA E SILVIA, 1998).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente trabalho foi dividido em três etapas de acordo com a Figura 14 abaixo:

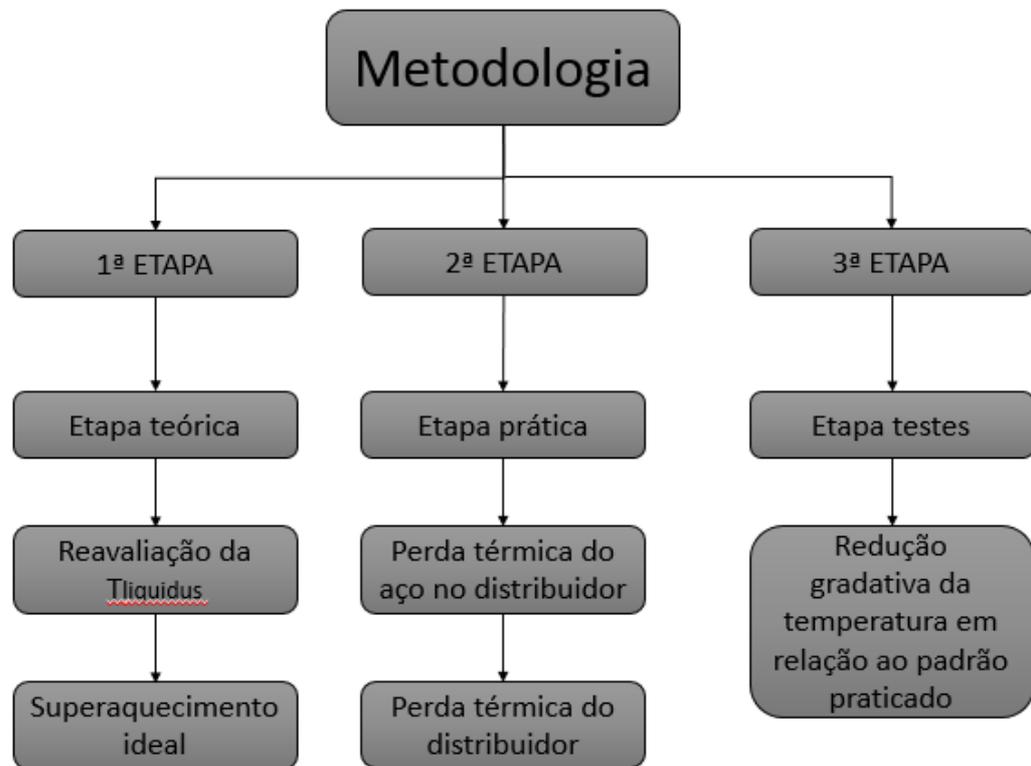


Figura 14 – Fluxograma explicativo sobre a metodologia usada.

1ª etapa: Reavaliação da temperatura liquidus e o superaquecimento utilizado no lingotamento de aços.

Nessa etapa foram recalculadas as temperaturas liquidus de todos os aços produzidos na Gerdau Riograndense. A literatura apresenta algumas equações empíricas derivadas de análises de regressão que fornecem valores aproximados das temperaturas solidus e liquidus. Como essas equações foram obtidas para determinadas ligas, a aplicação de diferentes equações pode gerar resultados diferentes. A

Equação 1:

$$T_L = 1537 - 88(\%C) - 25(\%S) - 5(\%Cu) - 8(\%Si) - 5(\%Mn) - 2(\%Mo) - 4(\%Ni) - 1,5(\%Cr) - 18(\%Ti) - 30(\%P) - 2(\%V)$$

Para o cálculo da Tliquidus, foram recolhidos os seguintes dados disponíveis no histórico do sistema de armazenamento de dados da Gerdau:

- a) Composição química da amostra tirada no distribuidor do lingotamento contínuo;
- b) Média de temperatura do aço no distribuidor (temperatura de lingotamento).

Esses valores foram recolhidos para todos os tipos de aço, a amostragem foi feita com valores referentes as 100 últimas corridas de cada tipo de aço. Por motivos de sigilo de valores, abaixo na Tabela 1 segue exemplo com valores fictícios para ilustrar o modo como foram recalculadas as novas Tliquidus.

Tabela 1 – Exemplo de média composição química das últimas 100 corridas do aço SAE 1006.

Média da composição química	Composição Química (em massa) – Aço SAE 1006										Tliquidus
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	V	
	0,06	0,4	0,1	0,01	0,01	0,07	0,06	0,03	0,008	0,0007	1527

Após, esse valores de composição são inseridos na Equação 1 e então chegamos à um valor para Tliquidus, para cada tipo aço.

é mais usada pelos estudiosos desenvolvida por Thomas (1987) para cálculo das temperaturas liquidus em °C) em função da composição química do aço (expressa em massa).

Podemos observar na Figura 15 a curva de variação da temperatura liquidus do aço em função do teor de carbono obtida por Jackson, citado por Barcellos(2007). É possível observar uma relação quase linear entre a temperatura liquidus e o teor de carbono no aço.

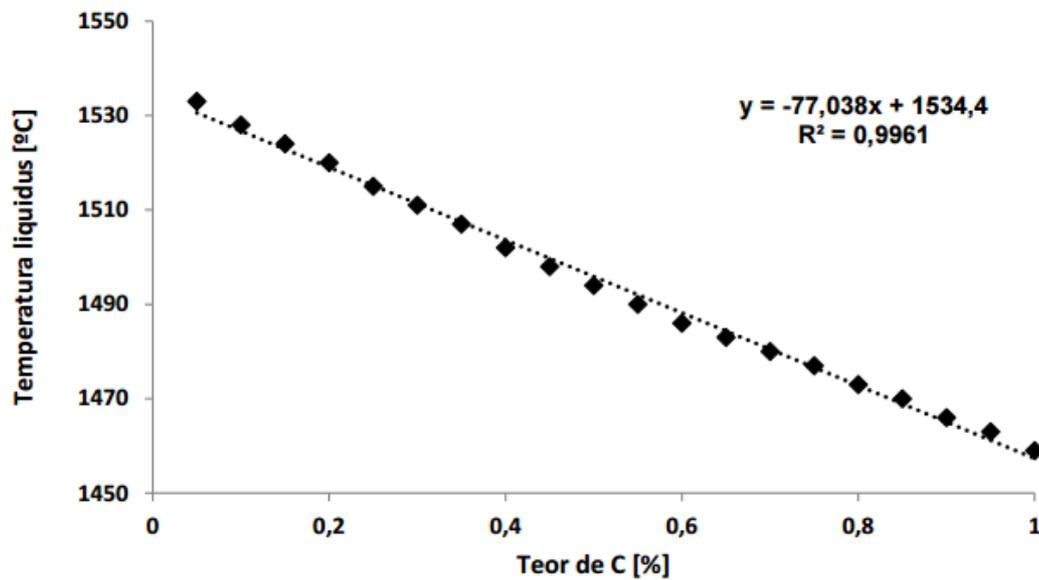


Figura 15 - Variação da temperatura líquidus em função do teor de carbono (BARCELLOS, 2007).

EQUAÇÃO 1:

$$T_L = 1537 - 88(\%C) - 25(\%S) - 5(\%Cu) - 8(\%Si) - 5(\%Mn) - 2(\%Mo) - 4(\%Ni) - 1,5(\%Cr) - 18(\%Ti) - 30(\%P) - 2(\%V)$$

Para o cálculo da T_{liquidus} , foram recolhidos os seguintes dados disponíveis no histórico do sistema de armazenamento de dados da Gerdau:

- b) Composição química da amostra tirada no distribuidor do lingotamento contínuo;
- b) Média de temperatura do aço no distribuidor (temperatura de lingotamento).

Esses valores foram recolhidos para todos os tipos de aço, a amostragem foi feita com valores referentes as 100 últimas corridas de cada tipo de aço. Por motivos de sigilo de valores, abaixo na Tabela 1 segue exemplo com valores fictícios para ilustrar o modo como foram recalculadas as novas T_{liquidus} .

Tabela 1 – Exemplo de média composição química das últimas 100 corridas do aço SAE 1006.

Média da composição química	Composição Química (em massa) – Aço SAE 1006										T _{liquidus}
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	V	
	0,06	0,4	0,1	0,01	0,01	0,07	0,06	0,03	0,008	0,0007	1527

Após, esse valores de composição são inseridos na Equação 1 e então chegamos à um valor para T_{liquidus}, para cada tipo aço.

2ª etapa: Perda térmica do aço no distribuidor ao longo de uma corrida.

Através dessa análise pode-se prever quantos graus o aço perde durante a permanência no distribuidor, desde o momento em que a panela é aberta até finalizar a corrida. A metodologia escolhida para a coleta de dados seguiu de modo que foram analisadas 40 corridas durante o período do mês de outubro de 2015, de diferentes aços. Em cada corrida foram retiradas 3 medidas de temperatura do aço dentro do distribuidor, a primeira medida em 5 minutos de lingotamento, a segunda em 15 e a terceira, depois de fechada a panela, essas medidas foram feitas com ajuda de um termopar.

Outra temperatura que foi coletada, foi da carcaça do distribuidor na parte externa, no local indicado com o círculo de acordo com a



Figura 16, utilizando um pirômetro (Laser Dual 50”, Extech Instruments). Foram tiradas duas medidas de temperatura da maneira como mostra Figura 17, uma em 5

minutos de lingotamento e a outra no final da corrida, para analisar a perda da temperatura da estrutura do distribuidor. Dados como tempo que a panela ficou esperando antes de começar a lingotar e tempo total de lingotamento também foram coletados.



Figura 16 – Distribuidor usado no processo de lingotamento contínuo (GERDAU, 2015).



Figura 17 – Medida de temperatura utilizando termopar (GERDAU, 2005).

3ª etapa: Testes de redução de temperatura de lingotamento.

Foram realizados testes em 15 corridas dos aços SAE 1015E, 1015A, e 1013A. O teste funcionou da seguinte forma:

Foi estabelecido um novo padrão de temperaturas para estes aços citados acima. Esse padrão contempla uma redução de 10°C em relação ao padrão atual usado na usina, nas temperaturas de vazamento no FEA, liberação no forno panela e lingotamento.

Essa redução inicia no FEA, o qual vai vazar o aço com 10°C à menos, conseqüentemente a próxima etapa, que é do forno panela, irá liberar a corrida para o lingotamento com 10°C à menos que o normal de operação e o lingotamento segue o mesmo padrão de redução que as células anteriores.

Durante o teste, é observado no lingotamento, a perda de temperatura ao longo da corrida e possíveis sinais visíveis de irregularidades no lingotamento. A energia elétrica gasta por tonelada de aço, durante o teste, é avaliada em relação à energia gasta durante a operação com o padrão normal de temperatura.

Equipamentos Utilizados

A planta da unidade industrial onde foram realizados os testes conta com os seguintes equipamentos:

a)Forno Elétrico a Arco

Com capacidade para 26 toneladas este equipamento recebe duas cargas de sucata e ainda a adição de elementos para o refino do aço.

b)Forno - Panela

Este equipamento de refino secundário possui capacidade de 23 toneladas, possuindo sistema de rinsagem por argônio via plug poroso, promovendo a homogeneidade de temperatura e composição química, além de acelerar a flotação das inclusões.

c)Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo, onde foi realizado os estudo, apresenta as seguintes características básicas:

- Capacidade do distribuidor: 4,8 toneladas
- Número de veios: 2;
- Raio de curvatura: 4,5 m
- Seção quadrada: 120 mm;
- Velocidade média de lingotamento: 1,8 à 2,5 m/min
- Sistema de corte: tesoura
- Válvula: zirconita de diâmetro de 13,5 -15 mm
- Proteção de jato pela injeção de nitrogênio para evitar reoxidação do aço.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Reavaliação dos valores de $T_{liquidus}$ e superaquecimento

Na Tabela 2 abaixo, podemos observar os valores de $T_{liquidus}$ calculada de acordo com Thomas, a partir das composições químicas médias de cada aço, que por motivos de sigilo não estão apresentadas nesse trabalho. Também pode-se observar na tabela abaixo a média de temperatura de lingotamento praticada atualmente e utilizando a Equação 2 obtém-se os valores de superaquecimento praticados pela usina.

EQUAÇÃO 2

$$\text{Superaquecimento } (^{\circ}\text{C}) = \text{temperatura de lingotamento} - T_{liquidus}$$

Tabela 2 – Novos valores $T_{liquidus}$, superaquecimento e temperatura de lingotamento praticadas.

Grupo de Aço	Tipo Aço	T Liquidus ($^{\circ}\text{C}$)	Temp lingotamento praticada($^{\circ}\text{C}$)	Superaquecimento praticado ($^{\circ}\text{C}$)
AC	1045-A	1491	1532	41
	1045-B	1492	1531	39
	1045-D	1489	1520	31
	1045-E	1491	1528	37
	1050-A	1486	1529	43
	1060-A	1479	1532	52
	1070-A	1489	1520	31
	1540-B	1489	1530	41
	1547-A	1486	1529	43
	1547-B	1487	1532	45
MC	1020-A	1512	1541	29
	1022-A	1512	1551	39
	1524-A	1510	1530	20
	1025-A	1507	1528	20
	1028-A	1506	1546	40
	1030-A	1503	1530	27
	1030-B	1506	1574	68
	1035-A	1500	1542	42
BC	1006-A	1527	1540	13
	1008-A	1526	1557	31
	1008-X	1526	1564	38
	1009-A	1522	1541	19
	1010-C	1518	1555	37
	1011-G	1519	1555	36
	1013-A	1519	1537	18
	1013-B	1518	1562	43
	1013-X	1520	1566	45
	1015-A	1517	1529	12
	1015-E	1517	1543	26

	1514-A	1515	1555	40
--	--------	------	------	----

Na Tabela 3 que vem que a seguir mostra que depois de setado um valor de superaquecimento ideal, calcularam-se os novos valores de temperatura de lingotamento, com ajuda da Equação 2. E utilizando a Equação 3 quantificou-se o possível ganho teórico em temperatura de lingotamento.

EQUAÇÃO 3

$$\text{Ganho teórico em temperatura} = T_{\text{lingotamento prática}} - T_{\text{lingotamento ideal}}$$

Tabela 3 – Novos valores de $T_{\text{lingotamento}}$ e ganho teórico de temperatura de lingotamento.

Grupo de Aço	Tipo Aço	Superaquecimento ideal (°C)	Temp lingotamento ideal(°C)	Ganho teórico em temperatura(°C)
AC	1045-A	20	1511	21
	1045-B	20	1512	19
	1045-D	20	1509	11
	1045-E	20	1511	17
	1050-A	20	1506	23
	1060-A	20	1499	32
	1070-A	20	1509	11
	1540-B	20	1509	21
	1547-A	20	1506	23
1547-B	20	1507	25	
MC	1020-A	20	1532	9
	1022-A	20	1532	19
	1524-A	20	1530	0
	1025-A	20	1527	0
	1028-A	20	1526	20
	1030-A	20	1523	7
	1030-B	20	1526	48
1035-A	20	1520	22	
BC	1006-A	20	1547	-7
	1008-A	20	1546	11
	1008-X	20	1546	18
	1009-A	20	1542	-1
	1010-C	20	1538	17
	1011-G	20	1539	16
	1013-A	20	1539	-2
	1013-B	20	1538	23
	1013-X	20	1540	25
	1015-A	20	1537	-8
	1015-E	20	1537	6
1514-A	20	1535	20	

Legenda das tabelas acima:

- BC = Baixo Carbono;

- MC = Médio Carbono;
- AC = Alto Carbono;
- Temp lingotamento praticada = Temperatura média de lingotamento contínuo das últimas 100 corridas de cada aço;
- Temp liquidus = Temperatura liquidus calculada a partir das médias de composição química das últimas 100 corridas de cada aço;

Após observados o valores de $T_{\text{lingotamento}}$ atualmente usados, podemos comparar com o valor teórico ideal de temperatura de lingotamento, ou seja, para um superaquecimento de 20°C. Abaixo segue gráfico comparativo entre as temperaturas praticadas e as temperaturas teóricas ideais.

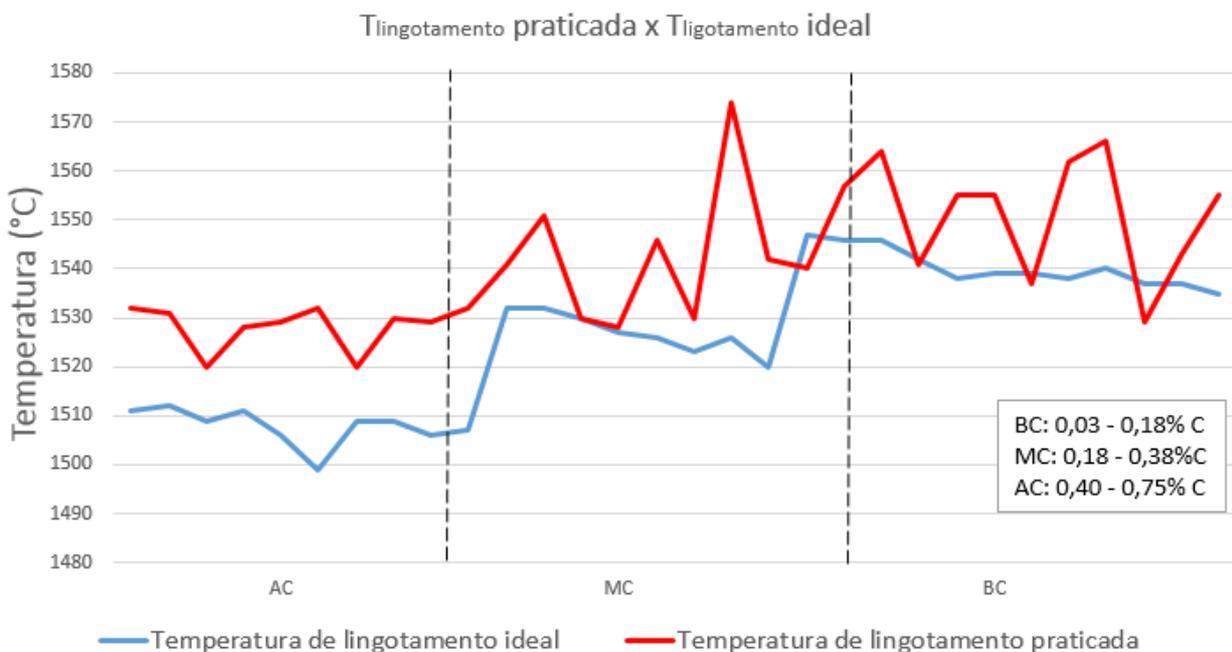


Figura 18 – Comparação em temperatura de lingotamento praticada e a ideal.

Através do gráfico representado na Figura 18, podemos observar que a temperatura praticada se mostra mais alta que a temperatura ideal ao longo de quase todo o gráfico, mostrando assim que a redução da temperatura de lingotamento se torna viável em alguns aços.

Pode-se afirmar também que existe a dependência da temperatura de lingotamento com o teor de carbono do aço, ou seja, quanto maior a porcentagem de carbono presente no aço, menor será a temperatura liquidus e conseqüentemente menor será a temperatura de lingotamento (BARCELLOS, 2007).

4.2 Análise da perda térmica do aço no distribuidor

Esta análise é de extrema importância para setar-se novas temperaturas de lingotamento, pois deve-se saber quantos graus o aço perde ao longo da corrida dentro do distribuidor.

Os distribuidores podem ser usados por até 3 dias seguidos, sendo essa a condição dele, ou seja, um distribuidor de 3º dia tem mais tempo de uso e está com o revestimento refratário mais gasto, que um distribuidor de 1º dia. Na Figura 19 abaixo, pode-se observar como a perda térmica do aço dentro do distribuidor não segue uma tendência de variação de acordo com os dias de uso. Apresentando uma média de perda térmica em graus de $7,5 \pm 3,4$ °C.

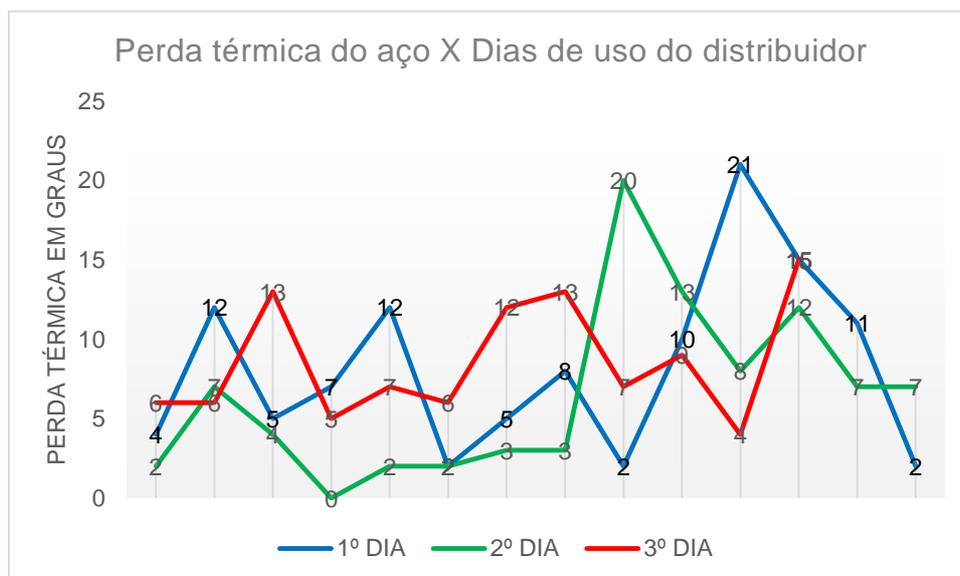


Figura 19 – Representação da perda térmica do aço X dias de uso do distribuidor.

Além da perda térmica do aço, também avaliou-se a perda térmica da carcaça do distribuidor ao longo da corrida relacionando com os dias de uso do mesmo de acordo com a Figura 20.

Observou-se que o distribuidor de 1º dia de uso perde mais temperatura que um de 2º e 3º dia. E de acordo com (MARQUES, 2012), a perda de temperatura do distribuidor está relacionado com o encharque térmico do material refratário usado.

Sendo assim no primeiro dia de uso, o revestimento refratário não está encharcado térmicamente, fazendo com que a carcaça do distribuidor, a qual é pré-

aquecida antes do uso, perca temperatura, pois esse pré-aquecimento não é o suficiente para fazer o encharque térmico completo do material refratário.

E conforme o distribuidor vai aquecendo durante o processo, o material refratário fica completamente encharcado e em temperatura ideal de processo, sendo assim, ao longo do dias de uso, a carcaça perde cada vez mesmo temperatura para o material refratário.

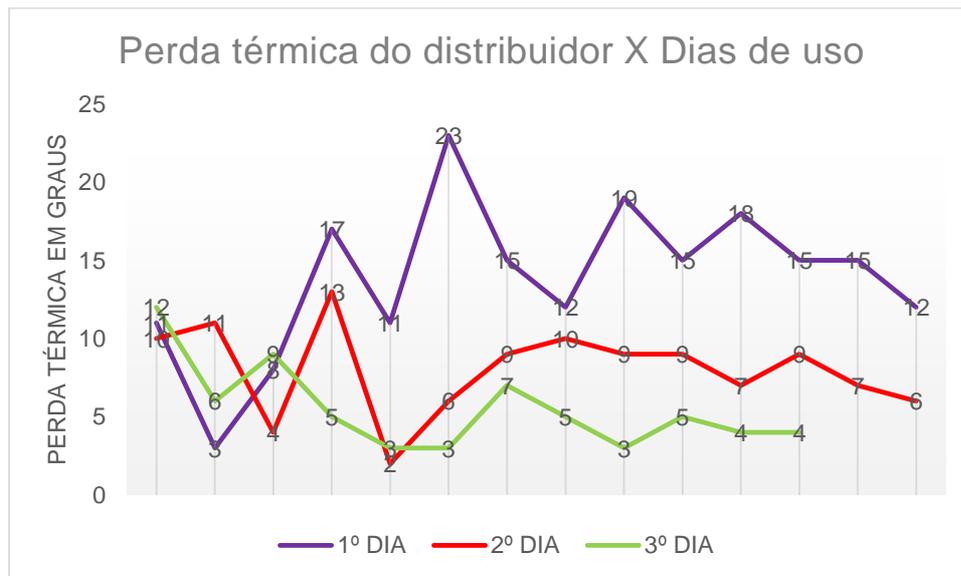


Figura 20 - Representação da perda térmica do distribuidor X dias de uso do distribuidor.

4.3 Análise da redução de energia elétrica

Nos resultados dos primeiros testes realizados usando uma redução de 10°C nas temperaturas praticadas na aciaria, observou-se uma redução significativa nos valores de energia gasta por tonelada.

Abaixo na Figura 21 podemos observar a variação de energia no FEA em relação aos mesmos números de corridas dos mesmos aços utilizando o atual padrão de temperatura de vazamento.

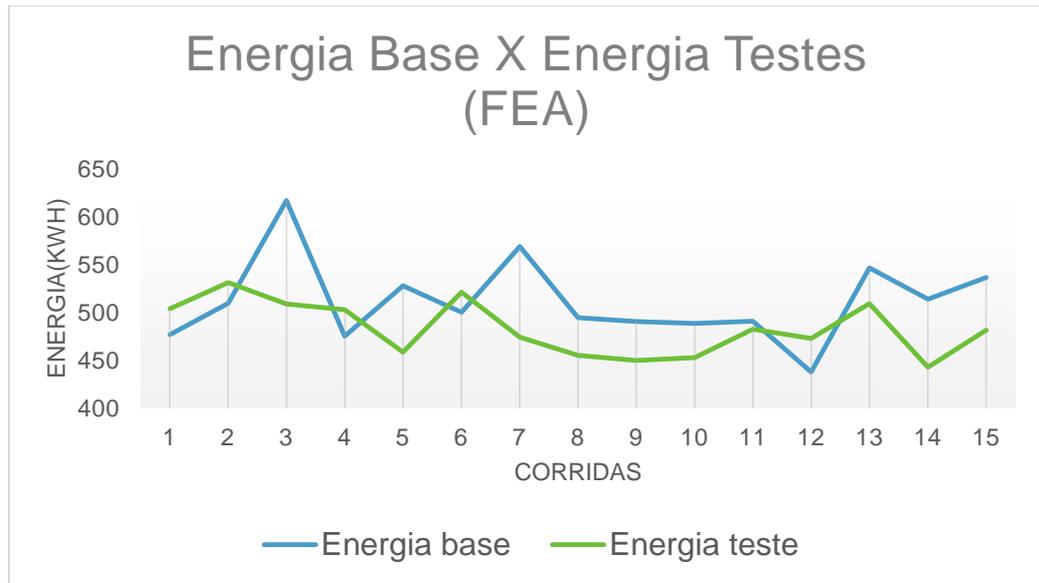


Figura 21 – Comparação entre energia consumida por tonelada na situação normal e na situação de teste no FEA.

Durante os testes, com a redução de 10°C na temperatura de vazamento, observou-se que a média de kWh/tonelada caiu de $494,8 \pm 5,1$ para $483,2 \pm 6,2$ no forno elétrico. E o mesmo comportamento foi observado no forno-panela, de acordo com a Figura 22 abaixo, onde a média de kWh/tonelada decresceu de $17,6 \pm 4,2$ para $10,1 \pm 2,1$ durante os testes. Mostrando que as temperaturas de vazamento do FEA, liberação do forno panela e lingotamento influenciam diretamente no consumo de energia elétrica na aciaria, sendo um fator muito relevante a ser discutido e possível de mudança.

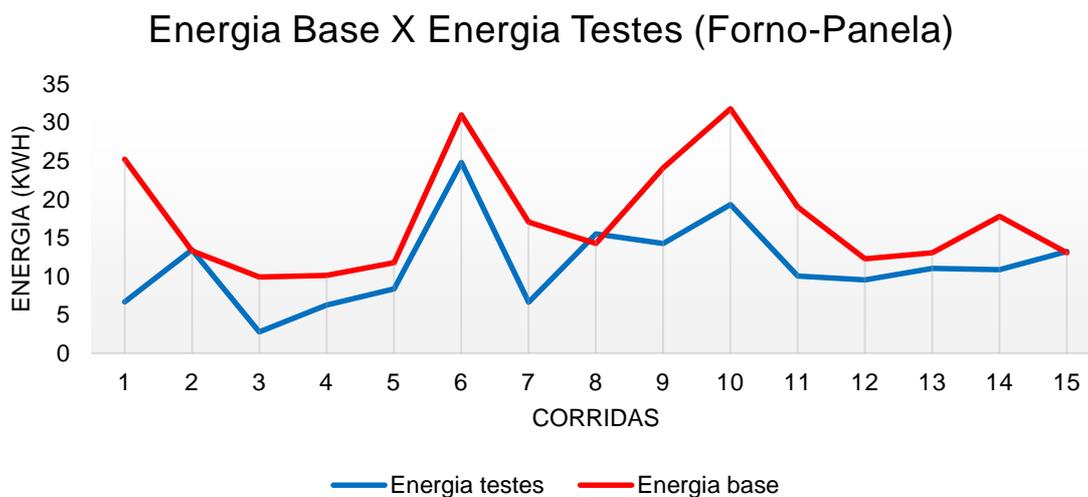


Figura 22 - Comparação entre energia consumida por tonelada na situação normal e na situação de teste no forno-panela.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- A composição química, em especial o teor de carbono, está relacionada diretamente e influencia de maneira relevante no valor da T_{liquidus} de cada aço;
- À partir de novos valores de T_{liquidus} , e escolhido o superaquecimento ideal, a temperatura de lingotamento pode mudar em até 20°C;
- A perda térmica do aço dentro do distribuidor atinge uma média de $7,5 \pm 3,4^\circ\text{C}$ ao longo da corrida;
- A perda térmica do aço no distribuidor não varia significativamente relacionando com os dias de uso do distribuidor;
- A carcaça do distribuidor perde mais temperatura durante o primeiro dia de uso uma média de $13,8^\circ\text{C}$ ao longo da corrida, pois o material refratário absorve calor da carcaça para que ocorra o encharque térmico do mesmo, já no terceiro dia de uso essa perda de temperatura cai para uma média de $5,5^\circ\text{C}$.
- Durante os testes de redução de 10°C em relação aos padrões atuais de temperatura, conclui-se que a redução de energia elétrica é notória, tanto do FEA como no forno panela;
- No FEA, observou-se uma redução média de energia de $11,6\text{ kWh/t}$ e no forno panela essa redução foi de $7,5\text{ kWh/t}$.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Reavaliação da refrigeração utilizada no lingotamento contínuo;
- Possível aumento da velocidade de lingotamento.
- Relacionar os novos valores de temperatura encontrados com quantidade de defeitos.

7. BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 16229:2013

ASSUNÇÃO, C, S. Determinação da distribuição de água no resfriamento secundário do lingotamento contínuo da Vallourec Tubos do Brasil e de seus efeitos sobre o comportamento térmico do aço. Belo Horizonte Escola de Engenharia da UFMG 2014

BARCELLOS, V. K. Análise da transferência de calor no molde durante a solidificação de aços em moldes de lingotamento contínuo. Porto Alegre: Departamento de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. 114p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais).

BRIMACOMBE, J.K., SORIMACHI, K. Crack formation in the continuous casting of steel. (1977) Metall Trans B, 8 (3), pp. 489-505.

COSTA E SILVA, A, L. Aços e ligas especiais. Ed. Blucher. 2011.

FIGUEIRA, R. M. ACI-504: Operação do FEA. Módulo Interno de Treinamento da Gerdau, 2007.

GARCIA, A.; SPIM, J.; JAIME A.; Santos, C,.; CHEUNG, N. Lingotamento contínuo de aços. São Paulo, SP : ABM, 2006.

GUMIERI, A. Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Tese de Doutorado, PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GILLES, H.L. Primary and secondary cooling control. In: Making, Shaping and Treating of Steel. Pittsburgh, PA: AISE Steel Foundation, 2003, p. 1-52.

JOHN, A. L.; Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco. Porto Alegre: UFRGS, 2009. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KLIEMANN, L. P. Influência da adição de CaSi na modificação de inclusões na produção do aço SAE1006, Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS, 2005.

KONISHI, J., MILITZER, M., BRIMACOMBE, J.K., SAMARASEKERA, I.V. Modeling the formation of longitudinal facial cracks during continuous casting of hypoperitectic steel (2002) Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 33 (3), pp. 413-423

MARQUES, L. R. Avaliação técnica e microestrutural entre tijolos dolomíticos de alto desempenho para a indústria siderúrgica, Diss. Mestrado, UFRGS, RS (2012).

MATOS, M., CARVALHO, J. L. R., ETRUSCO, G., ANDRADE, S. L., RAMOS, H. N. O, Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1983.

SAMARASEKERA, I.V.,BRIMACOMBE, J.K. , Thermal e and mechanical behaviour of contínuous billet molds. In: BRIMACOMBE (1982), V. 4, pp.117-125.

SHIBATA, H.; KONDO, K. and SUZUKI, M. Iron Steel Inst. Jpn. Int., 1996, vol. 35, Suppl., pp. S179-S182.

SINGH, S.N.; Blazek, K.E. Heat transfer and skin formation in a continuous casting mold as a function of steel carbon content. Journal of Metals, V.26, pp. 17-27. (1974).

THOMAS, B.G.; SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K.; Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: Part 1. Heat flow model. Metallurgical Transactions B, v. 18B, p. 119-130, 1987.

ÜNAL, Ç. Steady state heat transfer of ladle furnace during steel production process, Journal of Iron and Steel Research, International, v. 13, n. 3, p. 18-20, 2006.

W. R. Irving Institute of Materials, 1 de jan de 1993

