

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

Departamento de Metalurgia

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO AUMENTO DE VELOCIDADE DE
LINGOTAMENTO EM PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇOS ESPECIAIS VIA
LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Andrei Corrado Curatoli Ferreira

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Porto Alegre
2021

*“The decisive question for man is:
Is he related to something infinite or not?
That is the telling question of his life ...”*

Carl Gustav Jung

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos envolvidos direta ou indiretamente com minha evolução pessoal, acadêmica e profissional, que culminaram no presente trabalho.

Aos meus pais Olga Maria Curatoli, Carlos Adriano Ferreira e avó Ione Cacilda Curatoli pelo suporte e apoio incondicional, em especial, em prover sempre das melhores condições educacionais dentro e fora de casa – tornando minha graduação possível.

Aos meus colegas de trabalho da Aciaria de Charqueadas, pelo companheirismo e inspiração na busca constante pela excelência profissional e pessoal.

Ao Me. Vitor Hugo Nogueira da Silva e Eng. Eduardo Silva Nascimento pela confiança, pelo apoio e ensinamentos durante o meu período de estágio.

Ao Me. Marino Moscardini dos Passos Jr., pelo exemplo de referência técnica e profissional, além do apoio e ensinamentos técnicos inestimáveis em minha formação.

A Dr^a. Magda Beatriz Galant François e toda equipe do Laboratório de Siderurgia (LASID) pela amizade, apoio e desenvolvimento técnico durante todos os projetos de pesquisa acadêmica.

Ao Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos, pelo suporte e orientação no desenvolvimento do presente trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela oportunidade em obter educação de referência mundial em âmbitos teóricos, práticos e acadêmicos de forma gratuita.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Fusão e refino na produção de aços especiais via aciaria elétrica	2
2.1.1. Forno elétrico a arco (FEA).....	3
2.1.2. Forno-panela (FP).....	3
2.1.3. Desgaseificador a vácuo (VD).....	4
2.2. Lingotamento Contínuo	5
2.2.1. Zona primária	6
2.2.2. Zona secundária.....	10
2.2.3 Zona terciária.....	10
2.3. Defeitos no lingotamento contínuo	10
2.3.1 Trincas “ <i>off corner</i> ” (TOC).....	10
2.3.1.1 Principais fatores na incidência de TOC	13
2.3.1.1 Molde.....	13
2.3.1.1 Composição química	13
2.3.1.1 Velocidade de lingotamento	14
2.3.1.1 Temperatura de lingotamento	16
2.3.1.1 Refrigeração secundária.....	17
2.3.2 Defeitos Superficiais	17
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19

3.1. Materiais	19
3.1.1. Máquina de lingotamento contínuo Gerdau Charqueadas	19
3.1.2. Zona secundária de refrigeração	20
3.1.3. Material teste posta em marcha	24
3.1.4. Material teste pós implementação	25
3.1. Metodologia	25
3.2.1. Macrografia Baumann	26
3.2.2. Fluxo do material teste	27
3.2.3. Inspeção via ensaios não destrutivos	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Qualidade interna e subsuperficial	31
4.1.1. SAE 1045	33
4.1.2. SAE 1141	36
4.1.3. SAE 1040	38
4.1.4. DIN 41CRS4 MOD	39
4.2. Limpeza inclusionária	40
4.3. Qualidade superficial	42
4.3.1. Posta em marcha.....	42
4.3.1.1. DIN 20MNCR5 MOD	44
4.3.2. Pós implementação.....	45
5. CONCLUSÕES	48
6. TRABALHOS FUTUROS	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma dos processos siderúrgicos (Gerdau SA).	2
Figura 2.2	Esquema dos principais componentes da célula de lingotamento contínuo de tarugos (Santos 2005).	6
Figura 2.3	Esquema distribuidor-molde e seus principais recursos (Thomas, 2000). 7	
Figura 2.4	Figura representando a solidificação primária molde, gap e aço (Samarasekera, 2002).	8
Figura 2.5	Gráfico tendência x FP (Wolf, 1991).	9
Figura 2.6	Gráfico extração de calor x %C (Singh 1974).	9
Figura 2.7	Gráfico distância abaixo do menisco x espessura de casca para diferentes regiões da face (Brimacombe 1980).	12
Figura 2.8	Figura demonstrativa do mecanismo de falha da trinca off corner (Brimacombe 1980).	12
Figura 2.9	Gráfico da ductilidade x temperatura. Zonas de fragilidade (Samarasekera 2002).	13
Figura 2.10	Gráficos de tensão tangencial em um plano 2D do molde para diferentes distâncias em relação ao molde e velocidades de lingotamento (Thomas 2002).	15
Figura 2.11	Gráfico de velocidade máxima pela seção quadrada para diferentes níveis de trabalho de molde. (Thomas 2002).	16
Figura 3.1	Figura esquemática das zonas secundárias de refrigeração existentes. (Cortesia Gerdau SA).	22
Figura 3.2	Figuras das zonas secundárias testadas (Cortesia Gerdau S/A).....	22
Figura 3.3	Figura demonstrando em operação as duas zonas de refrigeração secundária.	24
Figura 3.4	Figura esquemática do tipo de amostragem durante corridas teste. (Cortesia Gerdau SA).	27
Figura 3.5	Figuras ilustrando o processo de macrografia Baumann.	28

Figura 3.6	Figura ilustrativa do fluxo de processo da usina de Charqueadas. (Cortesia Gerdau SA).	29
Figura 3.7	Figura esquemática do fluxo dos materiais teste.	30
Figura 3.8	Figura esquemática do fluxo dos materiais teste durante inspeção. (Haubold 2021).	30
Figura 4.1	Resultados da corrida 1 com macrografias por veios, velocidades, tamanho e distância da superfície das TOCs.	35
Figura 4.2	Resultados da corrida 2 com macrografias por veios, velocidades, tamanho e distância da superfície das TOCs.	36
Figura 4.3	Resultados da corrida 3 com macrografias por veios, velocidades, tamanho e distância da superfície das TOCs.	37
Figura 4.4	Resultados da corrida 4 com macrografias por veios, velocidades, tamanho e distância da superfície das TOCs.	38
Figura 4.5	Resultados da corrida 6 com macrografias por veios, velocidades, tamanho e distância da superfície das TOCs.	40
Figura 4.6	Resultados da corrida 7 com macrografias por veios e dos ensaios de partículas magnéticas.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Tabela sobre tipos de trincas, microestruturas e intervalos de BTR associados (Fernandes 2005).	18
Tabela 3.1	Tabela contendo as informações da máquina de lingotamento da Gerdau Charqueadas.	20
Tabela 3.2	Receitas de refrigeração (L/kg) com seus respectivos coeficientes Mo e Coff e percentuais de distribuições entre as zonas 1 e 2.	23
Tabela 3.3	Tabela de corridas teste com as qualidades e relações nominais e reais de Mn/S.	25
Tabela 4.1	Resultados de performance em relação a mitigação de comprimento de TOCs.	33
Tabela 4.2	Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 1.	34
Tabela 4.3	Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 2.	35
Tabela 4.4	Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 3.	37
Tabela 4.5	Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 4.	39
Tabela 4.6	Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 6.	40
Tabela 4.7	Tabela com resultados de sucata por macroinclusão das corridas teste da posta em marcha.	41

Tabela 4.8	Tabela com resultados de rejeição por macroinclusão das corridas teste da posta em marcha.	41
Tabela 4.9	Tabela com resultados de sucata por Trincas superficiais das corridas teste da posta em marcha.	43
Tabela 4.10	Tabela com resultados de rejeição por defeitos superficiais das corridas teste da posta em marcha.	43
Tabela 4.11	Tabela com dados de processo da corrida teste 7.	44
Tabela 4.12	Tabela com resultados de sucata por trincas superficiais das corridas teste do Pós implementação.	46
Tabela 4.13	Tabela com resultados de rejeição por defeitos superficiais das corridas teste do Pós implementação.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Símbolos

C_p^*	Carbono equivalente da reação peritética	[%]
FP	Potencial ferrítico	[adim]
%C	Percentual de carbono (em massa)	[%]
%Mn	Percentual de manganês (em massa)	[%]
%Ni	Percentual de níquel (em massa)	[%]
%N	Percentual de nitrogênio (em massa)	[%]
%Si	Percentual de silício (em massa)	[%]
%Cr	Percentual de cromo (em massa)	[%]
%Mo	Percentual de molibdênio (em massa)	[%]
%Ti	Percentual de titânio (em massa)	[%]
%S	Percentual de enxofre (em massa)	[%]
Mn/S	Relação de percentual de manganês pela de enxofre	[adim]
SH	Temperatura de sobreaquecimento (<i>Superheat</i>)	[°C]
C_o	Coefficiente arbitrário	[adim]
$n_{barras,rej}$	Número de barras rejeitadas	[qtde]
$n_{barras,tot}$	Número total de barras inspecionadas	[qtde]
m_{sucata}	Massa total de sucata	[kg]
m_{total}	Massa total de material inspecionado	[t]
kg/t_{real}	Quilogramas de sucata por tonelada de material	[adim]
kg/t_{hist}	Quilogramas de sucata histórico por tonelada de material	[adim]
rej_{real}	Rejeição real de barras inspecionadas	[%]
rej_{hist}	Rejeição histórica de barras inspecionadas	[%]
Q	Vazão de água de refrigeração secundária	[L/min]
m_o	Coefficiente multiplicador de velocidade	[L/m]
V_c	Velocidade real de lingotamento	[m/min]
C_{off}	Coefficiente de vazão mínima (<i>cut-off</i>)	[L/min]
$H_{aço}$	Elemento hidrogênio dissolvido no aço	
$H_{2(g)}$	Gás hidrogênio presente na forma gasosa	
$N_{aço}$	Elemento nitrogênio dissolvido no aço	

$N_{2(g)}$ Gás nitrogênio presente na forma gasosa

Abreviaturas

TOC	Trinca <i>off corner</i>	
SWV	Volumes específicos de água (<i>Specific water volumes</i>)	[L/kg]
FEA	Forno elétrico a arco	
FP	Forno-panela	
VD	Desgaseificador à vácuo (<i>Vacuum degassing</i>)	
LC	Lingotamento contínuo	
Ppm	Partes por milhão (unidade de concentração)	
SEN	Válvula submersa (<i>Submerged entry nozzle</i>)	
ZDT	Zona de ductilidade zero	
H_2SO_4	Ácido sulfúrico	
WML	Nível de trabalho do molde (<i>Working mould level</i>)	[mm]
BTR	Intervalos de temperaturas frágeis (<i>Brittle temperature ranges</i>)	

RESUMO

O processo de lingotamento contínuo de tarugos para aços especiais é extremamente crítico no quesito de qualidade, tanto interna quanto superficial. Assim como o mercado siderúrgico é cada vez mais competitivo e demanda crescentes volumes de produção mantendo rendimentos estáveis e competitivos. O presente trabalho busca avaliar a viabilidade de incrementos em velocidade de lingotamento sem a perda de qualidade no sentido de limpeza inclusionária, qualidade superficial e interna. Foi realizado uma série de testes avaliando diferentes condições de refrigeração (zonas e parâmetros) e condições de velocidade de lingotamento compondo a posta em marcha de uma nova zona secundária de refrigeração, que tinha como objetivo ultrapassar o primeiro fator limitante da alteração de velocidade: a qualidade interna dos tarugos brutos de fusão. Após a implementação com sucesso da nova zona foi avaliado, durante três meses, o quesito de qualidade superficial frente a uma base histórica. Os resultados frente a limpeza inclusionária, sanidade interna e superficial foram promissores e a nova tecnologia implantada se mostrou significativamente superior a anterior, com uma distribuição de refrigeração mais homogênea ao longo das faces e uma significativa redução em trincas *off corner*. Trincas *off corner* maiores do que 10mm foram erradicadas após a implementação da nova zona, além de uma redução geral de 57% nos comprimentos de trincas. A continuidade em incrementos em velocidade, agora validado, é esperada prover ainda mais um respaldo em rendimento e melhora da condição superficial de tarugos e materiais laminados.

ABSTRACT

The continuous casting process of billets for the mechanical industry has an extremely high-quality requirement both internal and superficial. Just as the steelmaking industry market is very demanding for growing volumes of production with stable and competitive yields. The present work seeks to evaluate the viability of increases in casting speed without loss of quality in terms of inclusionary cleanliness, surface and internal quality. A series of tests were carried out, composing the start-up of a new secondary cooling zone, which aimed to overcome the first limiting factor of speed change: the internal quality of as cast billets. The results regarding inclusionary cleaning, internal and surface health were promising, and the new technology implemented was significantly superior to the previous one, with a more homogeneous cooling distribution along the face in the secondary cooling zone and a significant reduction in off-corner cracks. After the successful implementation of the new zone, materials were evaluated for three months in terms of surface quality against a historical basis – these results were stable and promising. *Off corner* cracks larger than 10 mm were eradicated after the zone implementation, as well as a 57% reduction were achieved regarding *off corner* lengths. The continuity in speed increase that was now shown possible is promising to provide yield and surface quality in as cast and rolled products.

1. INTRODUÇÃO

O sucesso na constante busca por maior competitividade no mercado de aços é função, principalmente, dos seguintes aspectos de processo: qualidade e volume de produção. Ganhos em qualidade aumentam o rendimento e eficiência de produção líquida ao reduzir refugos e sucatas – assim como, maior volume de produção permite diluir os custos fixos e demonstrar maiores capacidades de processo para *stakeholders* atraindo maiores carteiras de produção e, portanto, maiores frações do mercado de produtos siderúrgicos.

Esse estudo atua em ambos os âmbitos de qualidade e produção, pois o parâmetro de velocidade de lingotamento é chave para se definir o ritmo de produção do processo como um todo, mas também da qualidade interna e superficial do produto. Especialmente, por se tratar de negócios de aços especiais, os critérios mínimos de qualidade são extremamente rígidos, e o parâmetro, velocidade de lingotamento, costuma ser um dos principais gargalos de processo em termos de produção.

O estudo se baseará em um projeto da usina, do tipo *mini-mill* de aços especiais, Gerdau Charqueadas que busca avaliar criteriosamente margens de possíveis aumentos em velocidade – viabilizando uma maior vazão produtiva, mantendo um nível de excelência em qualidade.

O projeto objetiva o aumento de capacidade produtiva via aumento de velocidade de lingotamento, validar esse aumento em relação a qualidade interna, superficial e inclusionária. Além da redução de defeitos e refugos de qualidade via melhoria de qualidade sub e superficial dos produtos.

Dentre os principais defeitos e riscos influenciados pelo aumento de velocidade há trincas internas, trincas *off corner*, rechupes, macro/micro inclusões e segregação durante o processo produtivo. Sendo *trincas off corner* o primeiro e mais influente limitante dentro da conjectura do processo atual, portanto, no presente trabalho será o enfoque principal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUÇÃO DE AÇOS VIA ACIARIA ELÉTRICA

Atualmente há duas principais rotas siderúrgicas: rota integrada e a rota semi-integrada (*mini mill*), que, respectivamente, atuam, usualmente, com os processos de aciaria a oxigênio e aciaria elétrica.

Conforme Figura 1, o processo de produção de aços via aciaria elétrica é, em geral, constituído por quatro células de processo: Forno elétrico a arco (FEA), forno-panela (FP), desgaseificador a vácuo (VD) e lingotamento contínuo (LC).

Figura 2.1 Fluxograma das rotas siderúrgicas.



Fonte: Autor (cortesia Gerdau SA).

2.1.1. FORNO ELÉTRICO A ARCO (FEA)

Parte do processo responsável pela fusão e refino primário do aço. Processo no qual, através de uma atmosfera oxidante objetiva-se a descarburização (remoção de carbono) e a desfosforação (remoção de fósforo).

Reator metalúrgico que ganha seu nome diretamente do seu mecanismo de funcionamento, é constituído de três eletrodos de grafita que ao terem correntes conduzidas através deles irão formar um arco elétrico, que irá fechar o circuito com a carga fria. Em conjunto com o arco elétrico, há injeção de gases combustíveis (como o gás natural) e injetores (lanças de oxigênio) que visam a transferência de energia térmica a carga, para fusão, reações endotérmicas de roteiro do processo e manutenção das temperaturas objetivadas de processo. O processo é controlado por receitas elétricas e químicas, não somente a energia elétrica (proveniente do arco formado nos eletrodos de grafita) fornece energia térmica ao banho, mas em conjunto, com a injeção de combustíveis, oxigênio e a quantidade de carbono injetado e presente na carga favorecemos as reações exotérmicas (Mourão, 2006).

O forno tem como emprego bateladas de cargas frias (diversos tipos de sucatas e materiais metálicos), ferro gusa, fundentes (cales) e ligas, em função, principalmente, das faixas de composição química do produto final, estabilidade de processo e custo (matéria prima, insumos, energia elétrica, etc).

2.1.2. FORNO-PANELA (FP)

Etapa do processo que tem como emprego o aço líquido proveniente do FEA, além de ligas de vazamento e escorificantes para a formação da escória de refino secundário. Tem como objetivo a ajuste mais fino de temperatura e composição química (refino secundário). Processo de refino secundário objetiva, principalmente, a dessulfuração (remoção de enxofre) e desoxidação (remoção de oxigênio).

A estrutura física do forno-panela é semelhante ao FEA no quesito elétrico: possui três eletrodos capazes de manter e aumentar a temperatura do banho metálico. O conjunto panela, transformador, circuito elétrico e eletrodos é denominado Forno-panela. (Mourão, 2006)

A temperatura de processo (desde o FEA até o LC) é uma das mais importantes variáveis de processo e irá ditar diretamente a segurança, qualidade e produtividade do processo. Portanto, a célula do forno-panela além das diversas funções em que opera (composição química e limpeza inclusionária) também possui a responsabilidade de assertividade em temperaturas de processo fundamentada por cálculos de previsão de perdas térmicas e sincronismo de produção.

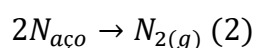
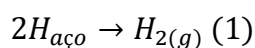
A temperatura do processo de lingotamento tem forte influência na solidificação do aço dentro e fora do molde, incluindo o tamanho da zona colunar e equiaxial da estrutura do lingote. Macrosegregações, porosidades e formação de trincas são influenciadas pelo controle de temperatura de processo. (Ferreira, 2000)

O banho é proveniente da etapa de refino oxidante (e, portanto, possui alto ppm de oxigênio dissolvido). Através da rinsagem do banho (injeção ascendente de gás inerte) e adição de ferroligas (elementos como: Mn, Si e, principalmente, Al) onde há o favorecimento da desoxidação do banho, que é extremamente vital para aços destinados a indústria mecânica, visando limpeza inclusionária através da redução do ppm de oxigênio e favorecimento da flotação de inclusões. Oxigênio, enxofre, fósforo e nitrogênio são formadores de inclusões não-metálicas (óxidos, sulfetos e nitretos), que de forma geral, são prejudiciais as propriedades do material em serviço afetando tenacidade, formação de trincas, defeitos superficiais entre outros. (Mourão, 2006)

2.1.3. DESGASEIFICADOR A VÁCUO (VD)

A panela proveniente da etapa de forno-panela é deslocada e acoplada no tanque designado do VD (do inglês, *vacuum degassing*) com aparato necessário para realização de fechamento hermético de uma atmosfera acima da panela seguido de sucção do ar presente – gerando uma atmosfera de baixíssima pressão.

O processo de desgaseificação se dá através do deslocamento do equilíbrio entre aço e atmosfera favorecendo a reação de gaseificação dos elementos dissolvidos no banho líquido conforme as equações 1 e 2. Uma redução na quantidade de hidrogênio e nitrogênio na atmosfera, via vácuo deslocará o equilíbrio para a direita das equações – desgaseificando o banho. (Mourão, 2003)



O processo em si, objetiva redução de gases fragilizantes ao aço (hidrogênio e nitrogênio), ajuste final de composição química e modificação de inclusões.

2.2. LINGOTAMENTO CONTÍNUO

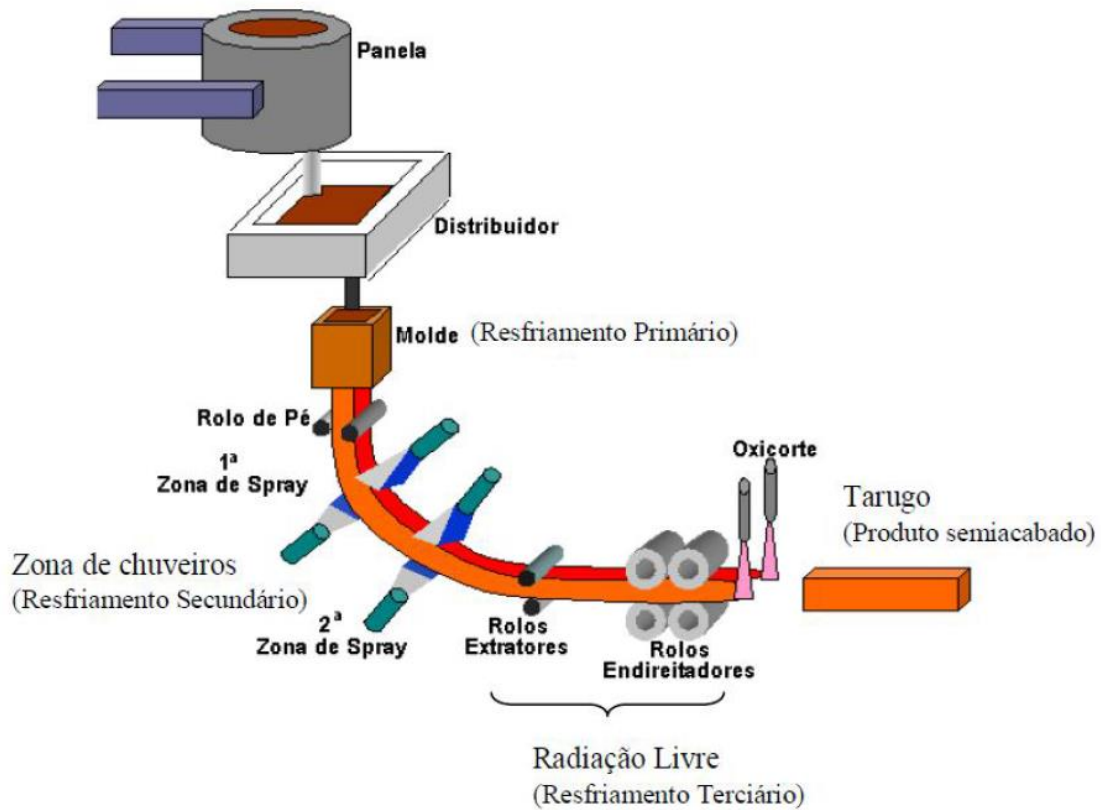
A última etapa do processo siderúrgico de aciarias elétricas é o lingotamento contínuo, processo já consolidado e dominante frente ao seu antecessor, o lingotamento convencional. O processo em si tem como objetivo a solidificação do aço líquido previamente fundido e refinado nas etapas anteriores.

A célula de lingotamento contínuo é constituída das seguintes principais estruturas: panela, distribuidor e moldes. A panela usualmente é acoplada a uma torre de lingotamento com, pelo menos, duas vagas e com a função rotativa para eventos de sequenciamento. O fluxo de aço proveniente da panela deve seguir de forma uniforme através do equipamento denominado tubo longo, que irá direcionar o fluxo ao centro do distribuidor, que por sua vez, irá manter um nível estável de aço para alimentar os moldes via válvula submersa (SEN, do inglês, *Submerged Entry Nozzle*) onde inicia-se a solidificação. Uma vez no molde, o aço líquido irá entrar em contato com uma lingoteira de cobre refrigerado a água. Isto irá promover seu resfriamento, formando uma casca sólida de uma espessura tal a permitir que o líquido remanescente não seja expulso rompendo esta casca (Penna, 2005)

A figura 2.2 mostra uma estrutura representativa de uma máquina de lingotamento contínuo. Conforme Penna, 2005 há um discernimento entre as três diferentes zonas de refrigeração em que a célula opera:

- Zona primária de refrigeração: extração de calor via condução com o molde de cobre;
- Zona secundária: extração de calor via sprays de água e/ou ar;
- Zona terciária: extração de calor via radiação e convecção.

Figura 2.2 Principais componentes da célula de LC.

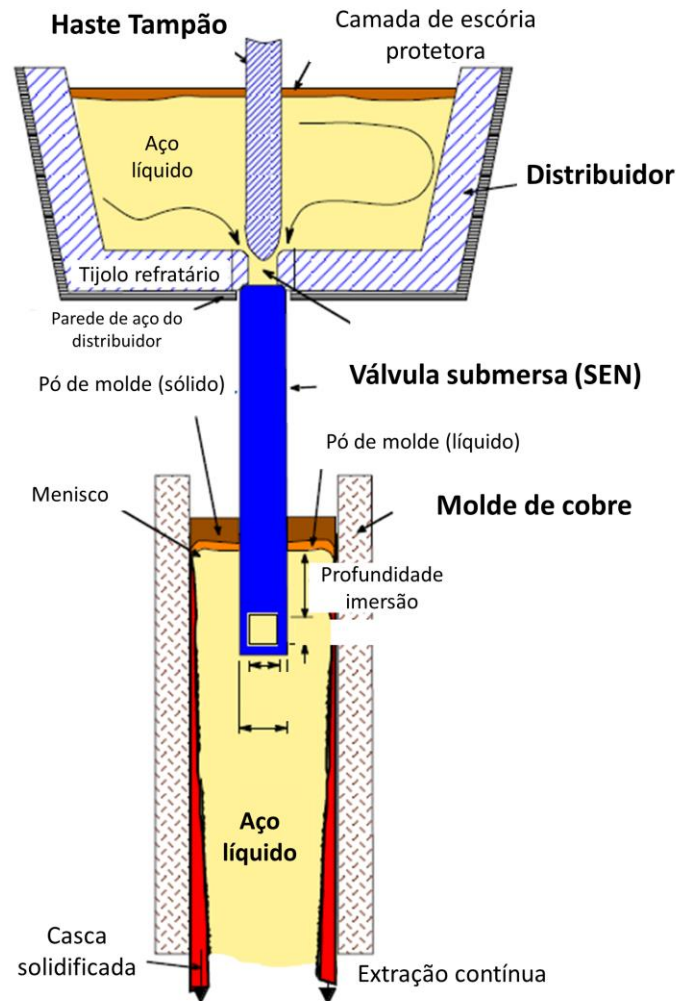


Fonte: (Santos, 2005) adaptado.

2.2.1. REFRIGERAÇÃO PRIMÁRIA

A solidificação do aço inicia no contato do aço líquido com os moldes de cobre posicionados logo abaixo do distribuidor e das válvulas submersas. O sistema de refrigeração primária é composto não apenas pelo molde, mas também por um sistema de refrigeração que mantém a integridade, desempenho e durabilidade do molde de cobre. Um sistema de oscilação e um de alimentação de fluxantes (pó ou óleo) que, em conjunto, são essenciais para fluidez do processo. Em adição a extração de calor, oscilação e lubrificação do molde são fundamentais para minimizar colamento, trincamento e rasgamento de casca (Samarasekera, 2002).

Figura 2.3 Conjunto distribuidor-molde.



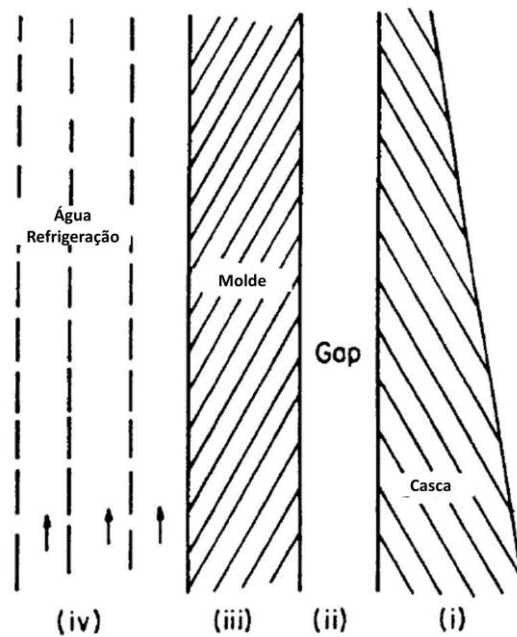
Fonte: (Thomas, 2000) adaptado.

A figura 2.3 demonstra o conjunto distribuidor - molde. Onde através de um controle de fluxo via haste tampão o aço líquido passa pela válvula submersa até o molde. Ao passo em que, uma oscilação vertical do molde e adição contínua de pó fluxante, que irá fundir e permanecer nos estados líquido, pastoso e sólido irão garantir a lubrificação e extração de calor adequada a casca solidificada para atingir sua espessura mínima durante a refrigeração primária.

O aço proveniente do distribuidor que entra em contato com o molde de cobre inicia sua solidificação e logo começa sua contração em função da reação de solidificação, que é função da sua composição química (principalmente % C). Essa contração de volume logo começa a ser mais significativo que a pressão metalostática – havendo uma

separação entre molde e aço denominada *gap*, mostrado na figura 3. Logo abaixo do menisco (220mm) a extração de calor atinge seu máximo, devido a casca ainda fina. A partir daí, o *gap* apenas aumenta e diminui o fluxo de calor com o progresso da solidificação. (Penna, 2005)

Figura 2.4 Solidificação primária no molde, gap e aço.



Fonte: (Samarasekera, 2002) adaptado.

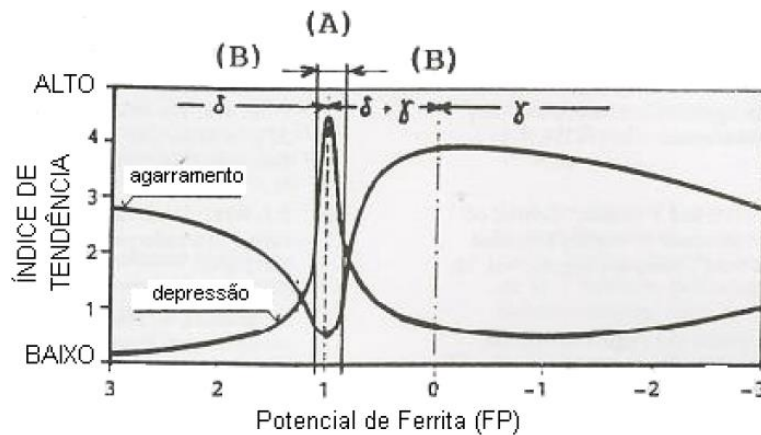
A evolução do *gap* depende da resistência da casca em relação ao abaulamento da pressão metalostática e, portanto, da espessura da casca, temperatura e composição (Samarasekera, 2002). Em relação ao *gap* e, por conseguinte, a extração de calor durante a refrigeração primária, identifica-se dois grandes grupos: aços do tipo A e aços do tipo B. Respectivamente são os aços peritéticos, sensíveis às depressões formadas durante o lingotamento e com tendência a descolamento do molde e aços não-peritéticos, que são sensíveis a agarramento durante a refrigeração primária. (Fernandes, 2005)

Abaixo seguem as fórmulas baseadas nos estudos de Howe (1987, 1992), Wolf (1991) e Yasumoto (1988) para identificar e classificar os aços através de seu FP: potencial ferrítico e Cp^* : Carbono equivalente da reação peritética. Sendo então, considerados, aços do tipo A quando o FP se encontra entre 0,85 e 1,05 e aços tipo B para FP abaixo de 0,85 ou acima de 1,05.

$$Cp^* = [\%C] + 0,04[\%Mn] + 0,1[\%Ni] + 0,7[\%N] - 0,14[\%Si] - 0,04[\%Cr] - 0,1[\%Mo] - 0,4[\%Ti] \quad (3)$$

$$FP = 2,5(0,5 - [Cp^*]) \quad (4)$$

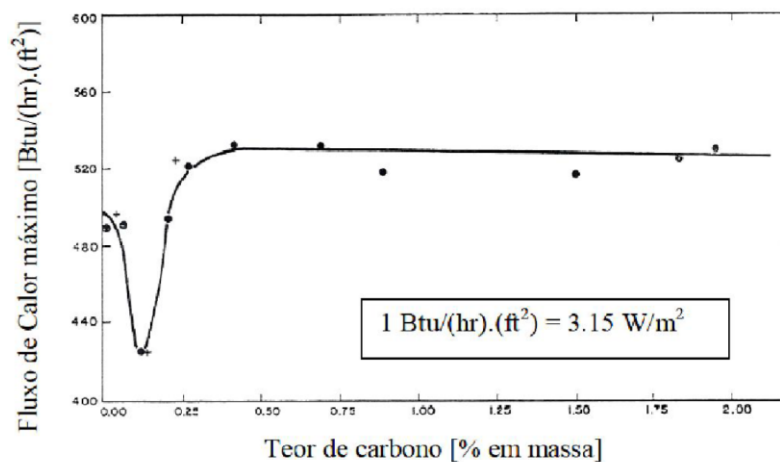
Figura 2.5 Gráfico tendência x FP.



Fonte: (Wolf, 1991) adaptado.

Aços na região do peritético (até 0,12% C) tem uma queda acentuada no fluxo de calor com a reação peritética e a formação do *gap* (Singh, 1974). Essa agressiva contração e eventual redução de extração de calor requer um controle assertivo das condições de refrigeração dentro do molde, visto que, distúrbios gerados na solidificação da casca podem tanto reduzir a qualidade superficial do material quanto até levar a ruptura do lingote na saída do molde (Barcellos, 2007).

Figura 2.6 Gráfico de fluxo de calor pelo teor de carbono.



Fonte: (Singh, 1974) adaptado.

Dentre os mecanismos que causam e influenciam a dimensão do *gap*, Ho (1984) destaca:

- Interação do metal com o molde;
- Transformações ocorridas no metal fundido;
- Efeitos de geometria do molde;
- Oscilação do molde;
- Lubrificação com pó fluxante;

2.2.2. REFRIGERAÇÃO SECUNDÁRIA

Região de colunas de chuveiros contendo água ou mistura de água com ar visando uma maior dispersão de particulado, eficiente formação de cone e uma melhor extração de calor. Segmentos de chuveiros posicionados após o molde, logo após os rolos de pé, são usados para prover uma grande quantidade de fluxo de água no lingote para ajudar no resfriamento, e assegurar uma suave mudança nas condições de transferência de calor entre o molde e a segunda zona de resfriamento. (Barcellos, 2007)

2.2.3. REFRIGERAÇÃO TERCIÁRIA

A zona terciária é constituída apenas de radiação livre, ou seja, transferência de calor via convecção do ar, radiação e contato com os rolos. Nesta etapa o lingote mantém pontos de contato com os rolos de apoio e, em alguns casos, com rolos extratores que contribuem para extração de calor. (Barcellos, 2007)

2.3. DEFEITOS NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO

2.3.1 TRINCAS “OFF CORNER” (TOC)

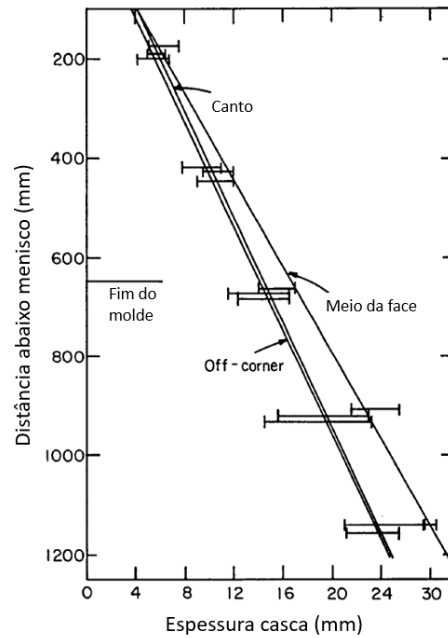
Defeitos subsuperficiais denominados trincas *off corner* tem origem na solidificação do tarugo ao fim, ou logo após o molde (final da zona primária). Esses defeitos são especialmente críticos para o ramo de aços especiais devido a alta dificuldade em serem detectados via inspeção de rotina. A melhor forma de avaliar a ocorrência desses defeitos é via macrografia tanto do tarugo quanto da barra laminada, porém os métodos usuais de inspeção podem não serem aptos a identificar a maior parte de defeitos, usualmente já preenchidos por óxidos ou sulfetos – diminuindo a descontinuidade do sinal detectada nos equipamentos. (Castilhos, 2018)

O defeito por trinca *off corner* tem seu nome devido a localização próxima ao canto do tarugo. Ou seja, entre o centro e o canto da barra, sendo esse um dos principais motivos da ocorrência do mecanismo de falha do defeito. A descontinuidade da espessura ao longo da face do tarugo durante o lingotamento gera um efeito de “dobradiça” com a região *off corner* pelo fato dela estar entre uma região central já mais fria e de maior espessura e o canto do tarugo. (Brimacombe, 1980)

Portanto, a região *off corner* acaba sendo o ponto de apoio frente a abaulamentos gerados pela pressão metalostática (Brimacombe, 1980) e que acaba gerando tensões trativas na frente de solidificação podendo acabar fraturando caso superem a tensão de fratura.

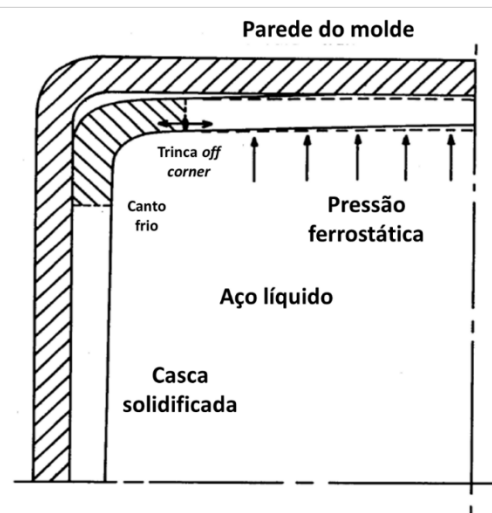
Brimacombe (1980) avaliou a diferença entre a espessura de casca solidificada ao longo do molde, em relação ao menisco, e apresentou os seguintes resultados em relação a diferença entre a espessura do meio da face e a região *off corner* – explicando o mecanismo de falha de TOC, como mostrada nas figuras 2.6 e 2.7.

Figura 2.7 Espessura de casca para diferentes regiões transversais ao longo do processo de LC.



Fonte: (Brimacombe 1980) adaptado.

Figura 2.8 Demonstrando o mecanismo de falha de TOC.

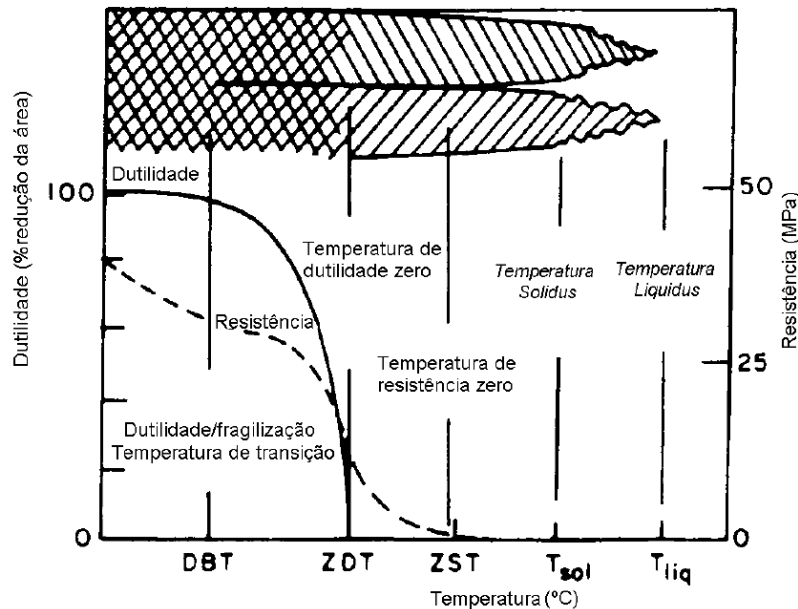


Fonte: (Brimacombe 1980) adaptado.

As trincas *off corner* ocorrem próximas da frente de solidificação onde existe a chamada “Zona de ductilidade zero” (ZDT), assim como a maioria das trincas de lingotamento contínuo. Esse tipo de defeito ocorre entre as dendritas secundárias no

intervalo de temperaturas de 50 a 100°C abaixo da temperatura *solidus* onde a deformação crítica é em torno de 0,2 – 0,3 % (Brimacombe, 1980). Abaixo na Figura 2.8 há a ilustração das quedas em ductilidade nas zonas próximas a T_{sol} .

Figura 2.9 Gráfico da ductilidade x temperatura e zonas de fragilidade.



Fonte: (Samarasekera 2002) adaptado.

2.3.1.1 PRINCIPAIS FATORES NA INCIDÊNCIA DE TOC

2.3.1.1.1 MOLDE

Segundo Park (2002) e Samarasekera (1993) a correlação entre raio de canto do molde e a incidência de *trincas off corner* é inversamente proporcional. Um maior raio de canto proporciona um menor resfriamento do canto do tarugo contribuindo para uma uniformidade em espessura em relação a região *off corner* e, portanto, reduzindo a tensão gerada por eventuais abaulamentos. Raios de canto muito pequenos levam a extração de calor elevada na região do canto e portanto, uma maior espessura do canto em relação à *off corner* – levando a *bulging*.

Outros aspectos importantes do molde são sua conicidade, vida útil e seu desgaste. Um desgaste elevado do molde leva a irregularidades na distribuição de temperatura – o que é causa de um aumento na incidência de *trincas off corner*.

A conicidade não ideal, assim como o desgaste, afeta também a formação do *gap* que se elevado pode levar a cantos mais finos e quentes ou até mesmo reaquescimentos ao final da refrigeração primária.

2.3.1.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

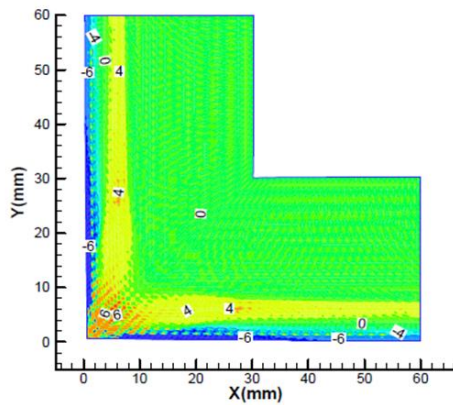
Aços médio carbono (0,25% até 0,40% C) são considerados os mais propensos a defeitos do tipo TOC, em função, da pequena espessura média ao final do molde (Pinheiro, 2000) levando a um tensionamento maior em casos de abaulamento.

Segundo Samarasekera (2011) aços com %S > 0,02 e relação Mn/S <25 são mais propensos a defeitos do tipo TOC. Isso deve por dois motivos principais: a maior propensão a formação de FeS no líquido interdendrítico, que possui baixo ponto de fusão levando a ocorrência de trincas internas e conforme Brimacombe (1977) a maior relação de Mn/S (maior %Mn) beneficia a tenacidade da casca solidificada reduzindo o efeito do abaulamento.

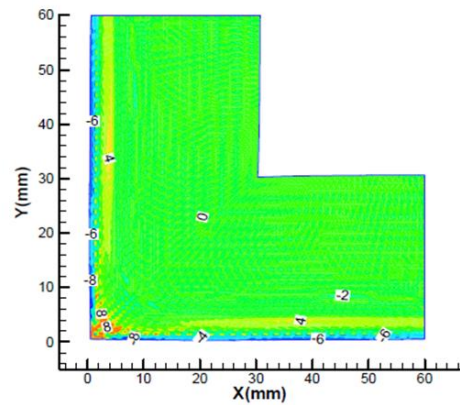
2.3.1.1.3 VELOCIDADE DE LINGOTAMENTO

Conforme a modelagem matemática realizada por Thomas (2002) fica clara a influência do aumento de velocidade de lingotamento em gerar tensões trativas na região *off corner* do tarugo, principalmente, logo após a região do molde. Essas tensões trativas são em função do efeito *hinging*, ou “dobradiça” devido a não uniformidade na refrigeração e, conseqüente, espessura solidificada ao longo da face. Esses resultados reforçam a necessidade de um olhar mais crítico para a segunda zona de refrigeração, especialmente logo após a saída do molde para atingir-se melhores qualidades internas e subsuperficiais. Visto que, as tensões trativas mais significativas apresentam em torno de 200mm abaixo da saída do molde, especialmente, em velocidades mais altas.

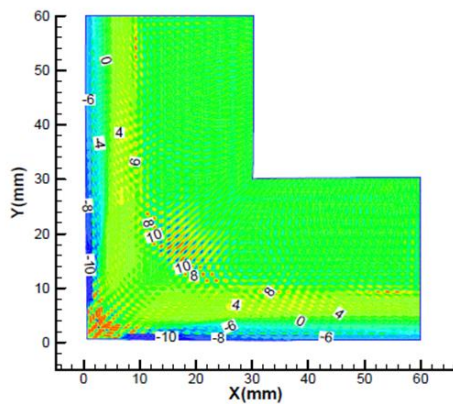
Figura 2.10 Simulação de tensões ao longo do lingotamento.



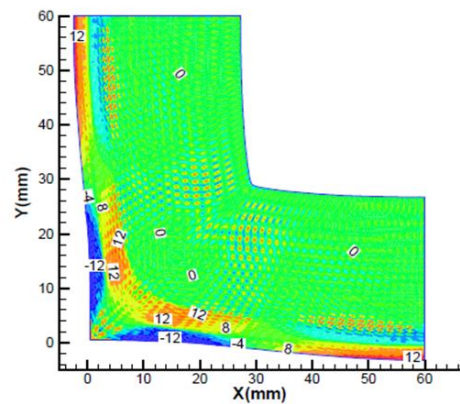
(a) Velocidade de lingotamento: 2,2m/min. Local: Saída molde



(c) Velocidade de lingotamento: 5,0m/min. Local: Saída molde



(b) Velocidade de lingotamento: 2,2m/min. Local: 200mm abaixo do molde



(d) Velocidade de lingotamento: 5,0m/min. Local: 200mm abaixo do molde

Fonte: (Thomas, 2002) adaptado.

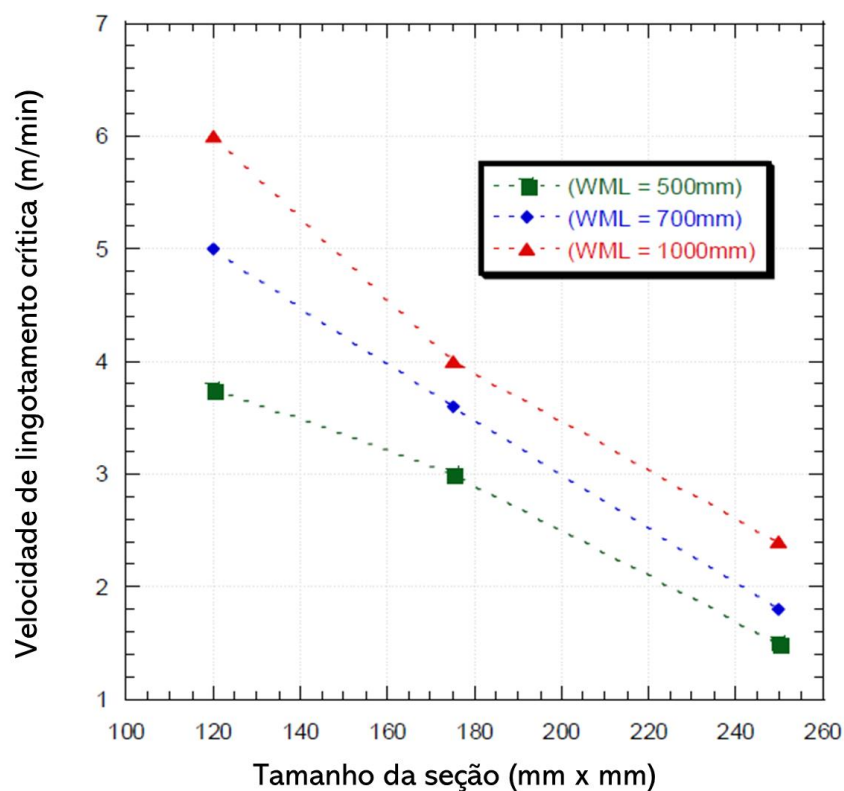
A figura 2.7 apresenta para duas diferentes velocidades de lingotamento (2,2 m/min e 5,0 m/min) e em duas posições em relação ao longo da máquina de lingotamento (saída do molde e 200mm abaixo do molde) as tensões geradas ao longo da seção transversal do lingote. O tensionamento está em uma escala de cores com representação em vermelho as maiores tensões (positivas e trativas), em verde as tensões próximas do zero e em azul as menos tensões (negativas e compressivas).

Pela figura, fica claro onde ao longo do arco de lingotamento e ao longo da seção temos as regiões mais propensas a *trincas off-corners*.

Assim como maiores velocidades de lingotamento ocasionam uma menor espessura de casca solidificada ao fim do molde – ocasionando uma menor resistência a abaulamentos incrementando a chance de trincas *off corner*

Segundo Thomas (2002) a seção quadrada e o nível de trabalho do molde são condições de contorno extremamente relevantes para considerarmos as velocidades de lingotamento críticas, ou máximas, visando a não ocorrência de trincas *off corner*.

Figura 2.11 Gráfico de velocidade máxima pela seção quadrada para diferentes níveis de trabalho de molde.



Fonte: (Thomas 2002) adaptado.

A figura 2.11 mostra gráfico contendo as velocidades máximas para diferentes níveis de trabalho do molde (*WMV*, do inglês *Working Mould Level*) 500mm, 700mm e 1000mm diferentes seções quadradas.

2.3.1.1.4 TEMPERATURA DE LINGOTAMENTO

Segundo Castilhos (2018) a influência da alta temperatura de lingotamento atua aumentando a zona colunar do lingote devido a maior facilidade em cristais equiaxiais serem refundidos, somando-se ao fato de que a zona colunar possui uma maior susceptibilidade ao trincamento do que a zona equiaxial.

Assim como, uma maior temperatura de lingotamento influenciará na redução da espessura da casca solidificada ao final do molde e por consequência, um maior abaulamento e incidência de trincas *off corner*.

2.3.1.1.5 REFRIGERAÇÃO SECUNDÁRIA

Uma maior vazão de água na refrigeração secundária, especialmente, na saída do molde é benéfica para uma mitigação de defeitos do tipo trincas *off corner*.

Brimacombe (1980) afirma que uma casca mais espessa e temperaturas superficiais mais baixas após a saída do molde é capaz de mitigar maiores abaulamentos sem deformações plásticas levando a trincas *off corner*. Ambos são funções de uma maior extração de calor via refrigeração secundária com vazões e volumes de água significativos e uniformidade na distribuição ao longo da face refrigerada (conforme será levantado na metodologia do presente trabalho).

2.3.2 TRINCAS SUPERFICIAIS

Durante a produção de tarugos via lingotamento contínuo podem ocorrer a geração de diversos tipos de defeitos superficiais, que dependendo do tipo, profundidade, morfologia permanecerão no material laminado que tem como insumo esses tarugos. A fim de evitar ocorrências e eventuais sucatas e perdas, é essencial entender os seus tipos e origens.

Trincas superficiais, assim como qualquer outro tipo de deformação plástica necessitam de dois fatores essenciais para ocorrerem: fragilização do material e tensões

trativas. Segundo Fernandes (2005), para estudar-se trincas superficiais no lingotamento deve-se olhar para as regiões de baixa ductilidade do aço, também conhecidas como BTRs (do inglês, *brittle temperature ranges*). Além das fontes de tensões trativas, como a pressão metalostática, as tensões térmicas e tensões de endireitamento.

Dentre os principais defeitos vistos, destaca-se: trincas em rede, trincas longitudinais, trincas transversais, trincas diagonais e trincas fora de canto (ou *off corner*). Fernandes (2005) realizou um mapeamento do tipo de defeito com a microestrutura em que ocorre e em qual intervalo de temperatura frágil, conforme a seguir:

Tabela 2.1 Correlação entre tipo de defeito, BTR e microestrutura.

Tipo de Trinca	Microestrutura	Intervalo de Temperatura Frágil		
Logitudinal de canto	Dendrítica Colunar	I		
Subsuperficial próxima ao canto	Dendrítica Colunar	I		
Ruptura/Agarramento Transversal	Dendrítica Colunar	I		
Em rede (estrela)	Grão Austenítico Grosseiro			III
Longitudinal de Face	Grão Austenítico Grosseiro	(I)	II	
Face/transversal de canto	Grão Austenítico Grosseiro	(I)	II	III
() = no fundo das depressões, possivelmente com refusão da casca do veio				

Fonte: (Fernandes, 2005)

Fernandes (2005) destaca que:

- BTR I é fundamentalmente atrelada a estrutura dendrítica colunar primária. São trincas que ocorrem nas faixas de temperatura acima de 1200 °C entre dendritas com líquido rico em soluto segregado (fragilizado por FeS).
- BTR II e III ocorrem comumente com grãos austeníticos grosseiros, temperaturas locais baixas e depressões grosseiras.

Além de diversos parâmetros como: baixa intensidade de refrigeração secundária, regularidade e estabilidade dimensional do molde. Velocidades de lingotamento elevadas influenciam diretamente na temperatura de endireitamento do tarugo (região de tensão trativa) e, por consequência, na ductilidade a quente do material tensionado. (Fernandes, 2005). Baseando-se nesse entendimento que o presente estudo prevê ganhos em rendimento reduzindo perdas por baixa qualidade superficial através do aumento de velocidades de lingotamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Todos os materiais, estruturas e equipamentos utilizados nesse estudo foram fornecidos pela empresa GERDAU S/A e fizeram parte de um projeto interno que visa o aumento de velocidade de lingotamento, conduzido na usina de Charqueadas.

O presente estudo irá dar enfoque a seção quadrada de 240 mm² produzida na planta, todos testes, resultados e conclusões serão direcionados a essa seção.

3.1.1. MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO GERDAU CHARQUEADAS

A máquina de lingotamento contínuo utilizada para a realização dos experimentos possui as seguintes características físicas e estruturais:

Tabela 3.1 Tabela contendo as informações da máquina de lingotamento da Gerdau Charqueadas.

CCM CHARQUEADAS	
Raio de máquina (mm)	9000
Número de veios	3
Seções quadradas (mm)	155, 240
Taper do molde	Parabólico
Altura útil do molde (mm)	730, 630
Peso da panela (ton)	62
Peso de trabalho do distribuidor (ton)	16
Agitadores eletromagnéticos (MEMS, FEMS)	9
Controle de vazão do distribuidor ao molde	Tampão
Tipo de fluxante do molde	Pó
Máquina de injeção de pó de molde	Automática/ pneumática

Fonte: Autor.

3.1.2. ZONA SECUNDÁRIA DE REFRIGERAÇÃO

Dentre os principais fatores limitantes previstos em decorrência do aumento de velocidade, o aumento significativo de trincas subsuperficiais, especialmente, de trincas *off corner* é um dos mais preocupantes.

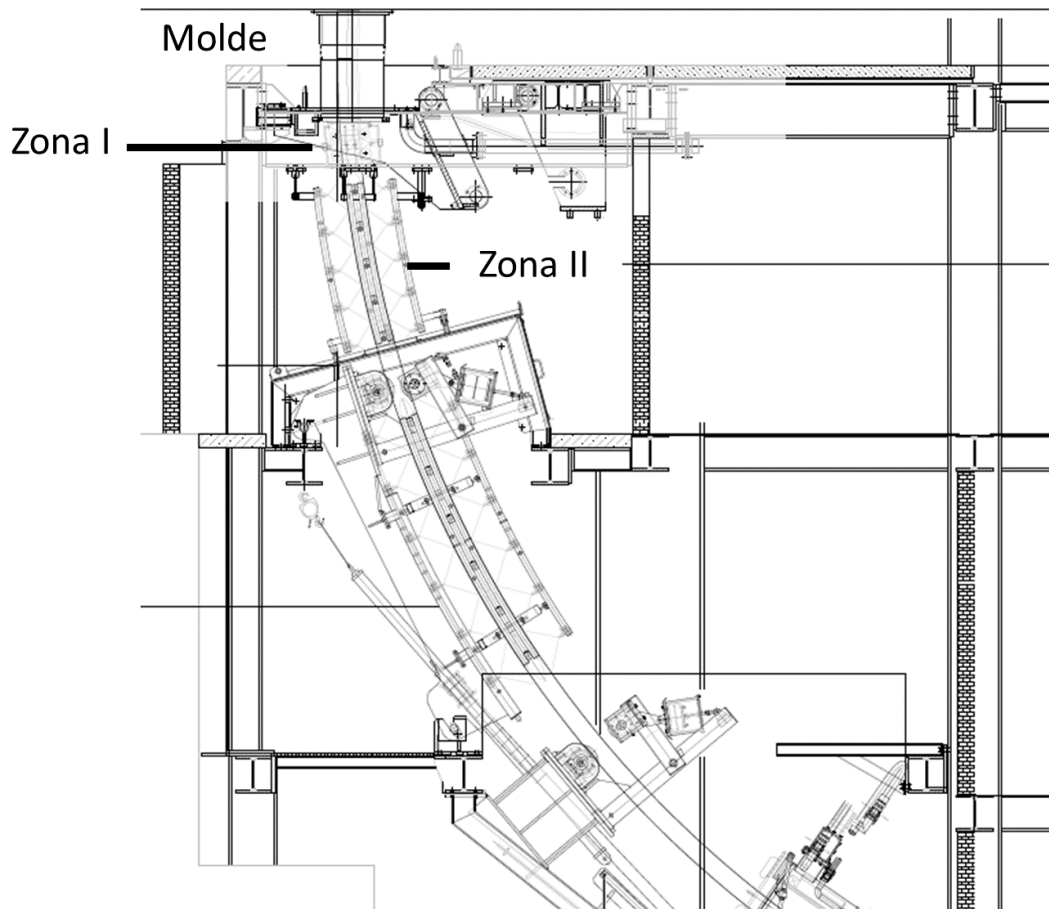
Em função disso, foi desenhada, confeccionada e posta em marcha uma nova segunda zona secundária de refrigeração visando maior homogeneidade na extração de calor ao longo da face do lingote, e por conseguinte, menores tensões na região *off corner* da face – reduzindo a incidência de defeitos.

A estrutura, conforme figura 3.2, foi redesenhada com um acréscimo no número e mudança no tipo de bicos *airmist* de formato oval para redondo, visando uma refrigeração homogênea ao longo da face do tarugo tanto transversal quanto longitudinal. A nova estrutura de refrigeração secundária foi projetada com um acréscimo de três fileiras de bicos frente a anterior – passando de quatro bicos ao longo do comprimento para sete. Assim como a tecnologia e tipos de bicos *airmist* também foi alterada, o antigo bico *airmist* oval foi substituído para um bico também *airmist* porém redondo.

O desenho do equipamento foi feito para atuar com as duas primeiras fileiras de bicos *airmist* com uma vazão de 2,0 l/min logo após a zona I e posteriormente, cinco fileiras de bicos *airmist* com vazão de 1,0 l/min.

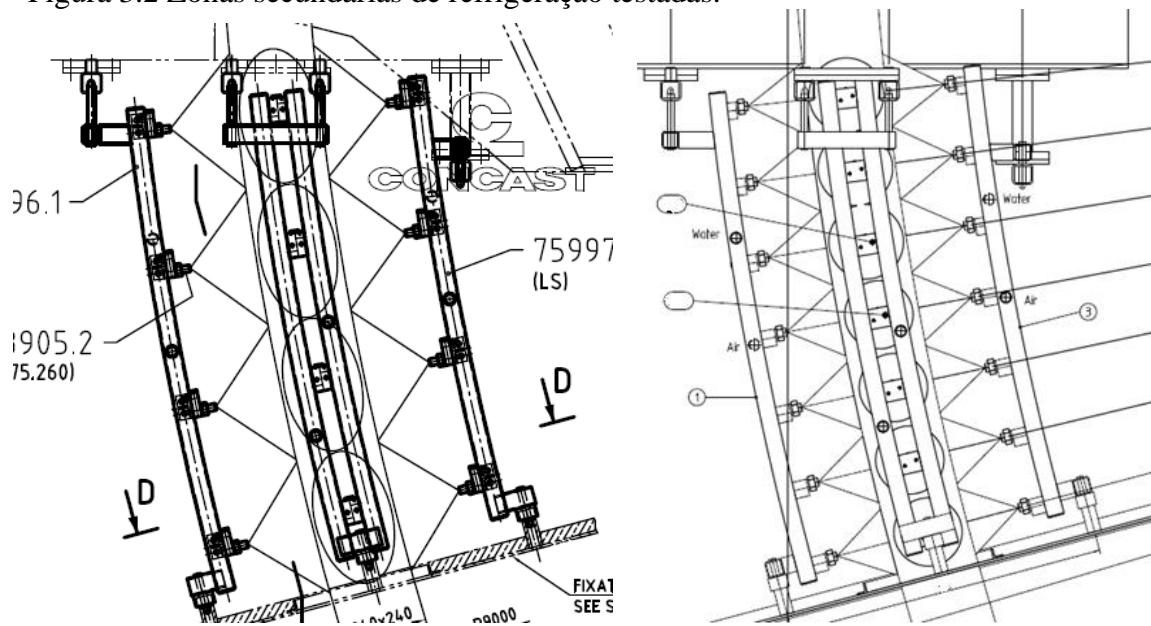
As duas zonas (Zona I e Zona II) da refrigeração secundária são ilustradas na Figura 3.2 abaixo:

Figura 3.1 Figura esquemática das zonas de refrigeração secundária.



Fonte: Autor (cortesia Gerdau S/A).

Figura 3.2 Zonas secundárias de refrigeração testadas.



Fonte: Autor (Cortesia Gerdau S/A).

Assim como novos parâmetros de refrigeração, também conhecidos como receitas de refrigeração, foram modeladas a partir da nova infraestrutura de refrigeração secundária.

Na Tabela 1, são mostradas as receitas novas e antigas referentes a seção 240mm². Destacando, principalmente, a transferência de uma parcela de água (em %) da Zona I para a Zona II. Reduzindo de 60% para 55 e 57% o percentual de vazão total de água na Zona I e elevando de 40 para 43 e 45% o percentual da Zona II.

Tabela 3.2 Receitas de refrigeração (L/kg) com seus respectivos coeficientes Mo e Coff e percentuais de distribuições entre as zonas 1 e 2.

	L/kg	Zona	Mo	Coff	%
Novas Curvas	0,17	Zona 1	44	27	57
		Zona 2	34	13	43
	0,23	Zona 1	55	27	55
		Zona 2	45	13	45
Curvas Antigas	0,13	Zona 1	35	27	60
		Zona 2	24	13	40
	0,19	Zona 1	50	27	60
		Zona 2	33	13	40

Fonte: Autor.

Os parâmetros das receitas citadas na Tabela 3.2 foram multiplicados por um coeficiente arbitrário (Co) em prol da confidencialidade de dados de processo.

As vazões de água (L/min) para as diferentes zonas da zona secundária são dadas por três parâmetros, o coeficiente m_o , a velocidade de lingotamento real (m/min) e, um valor de vazão mínima C_{off} (Cut-off).

O coeficiente m_o é o multiplicador de velocidade, com unidade de $\frac{L}{m}$, que representa a quantidade de água baseada na velocidade real do processo com intuito de manter-se o parâmetro fixo de L/kg (litros de água por kilograma de aço). É feito via cálculos de previsão de vazão e pressões dos bicos ao longo das diferentes velocidades.

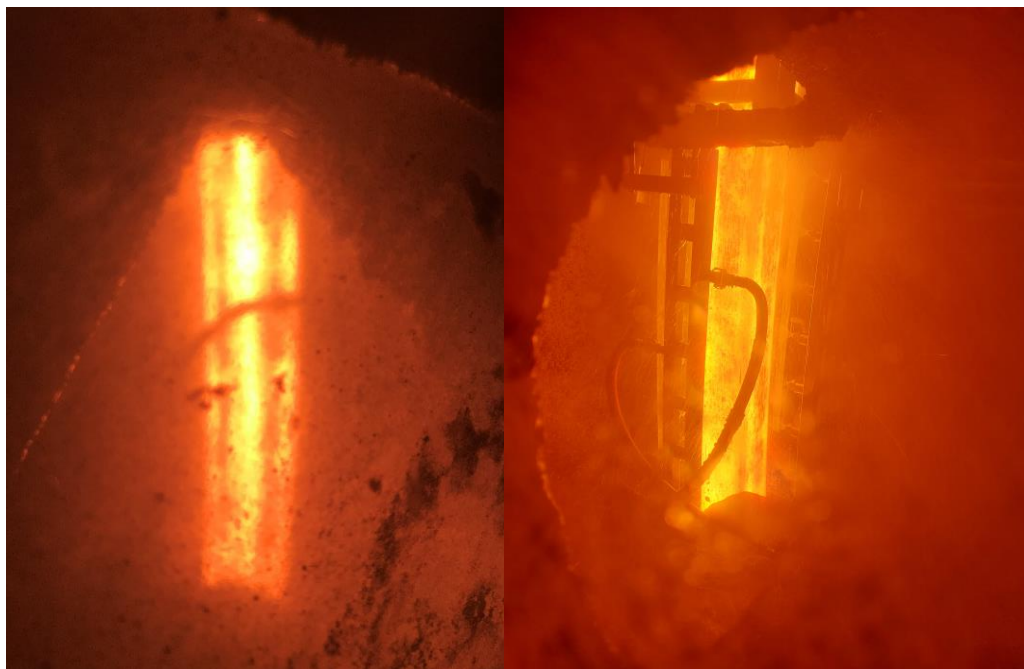
O valor de vazão mínima C_{off} é um parâmetro de segurança para eventos de sequenciamento, ou baixas velocidades com intuito de não permitir um reaquecimento significativo do lingote – evitando riscos de segurança.

A equação (5) denota a vazão real de água (Q) ao longo do processo:

$$Q = m_o * V_c \quad (5)$$

Os testes realizados durante esse trabalho buscam avaliar a diferença entre as duas zonas de refrigeração, validando e quantificando a importância da homogeneidade na extração de calor ao longo da zona secundária de refrigeração.

Figura 3.3 Demonstração da operação das duas zonas de refrigeração secundária.



Fonte: Autor (Cortesia Gerdau SA).

Na figura 3.3, a zona secundária de refrigeração EXISTENTE à esquerda e a direita a NOVA zona testada. Ao avaliar os aspectos visuais da superfície entre ambas é possível notar alguns *black spots* e regiões mais escuras (e mais frias), especialmente, próximas aos cantos quando trata-se da zona EXISTENTE.

A proposta da nova zona (foto a direita) é promover uma distribuição de água e ar mais homogênea ao longo da face reduzindo, portanto, grandes diferenças térmicas entre regiões. Os efeitos esperados são de mitigação frente a desuniformidades em espessuras, efeitos de “*hinging*” na região *off* corner e tensões térmicas atreladas a gradientes térmicos.

3.1.3. MATERIAL TESTE POSTA MARCHA

As qualidades escolhidas para teste tinham como objetivo serem representativas da maior fração possível do portfólio existente da planta levando em conta a criticidade por *trinca off-corner*. Portanto, como critério de decisão foi definido testar, pelo menos, três níveis de criticidade em relação a *trincas off-corner*. Entendido como um dos principais fatores limitantes ao aumento de velocidade, especialmente na seção de 240mm.

Tabela 3.3 Tabela de corridas teste com as qualidades e relações nominais e reais de Mn/S.

Corrida	Qualidade	Real Mn/S	Nominal Mn/S
1	SAE 1045	24,4	40,8
2	SAE 1045	29,5	40,8
3	SAE 1141	13,6	15,2
4	ABNT 1040	21,1	21,8
5	ABNT 1040	24,2	21,8
6	DIN 41CRS4 MOD	25,5	19,8
7	DIN 20MNCR5 MOD	103,3	101,8

Fonte: Autor.

Levando em consideração a composição química, em resumo, a relação %Mn/%S das qualidades, a qualidade SAE 1045 foi escolhida como potencialmente menos crítica para TOC e, portanto, foi a primeira a ser lingotada. Ao mesmo passo que os resultados positivos eram concebidos, as qualidades de média (ABNT 1040) e alta criticidade (SAE 1141, DIN 41CRS4 MOD) foram testadas.

Importante destacar a diferença entre a relação %Mn/%S nominal e a real. Os valores de Mn/S nominal é uma média das corridas produzidas dentro de todo histórico da planta, porém, tanto o Mn quanto o S possuem faixas de trabalho dentro da aciaria e

de corrida a corrida, os valores reais de % dos elementos podem flutuar dentro desses valores mínimos e máximos. Portanto, um aço como o SAE 1045 que possui, nominalmente, Mn/S = 45 pode ser produzido em corridas com certa composição química levando a valores até Mn/S = 24. Tornando esse material bem mais crítico a tipos de defeitos que envolvem BTR de alta temperatura, e portanto, *trincas off corner*.

As qualidades foram escolhidas e sequenciadas em ordem em relação aos valores nominais (médias do histórico recente), porém, são ligas que possuem faixas mínimas e máximas e, portanto, podem variar de corrida a corrida. De forma geral, as corridas obtiveram uma proximidade maior com a faixa mínima da relação e, portanto, tornaram os testes mais assertivos e correspondentes a cenários mais críticos em que a qualidade irá flutuar durante ruídos de processo.

Após os testes Posta em marcha da zona secundária foi realizada a coleta de dados de refugos e rejeição das linhas de inspeção para uma grande amostragem de corridas já com a nova zona implementada.

3.1.4. MATERIAL TESTE PÓS IMPLEMENTAÇÃO

O material amostral escolhido para avaliar a pós implementação foi todas as corridas durante 3 meses após a implementação da zona secundária de refrigeração das mesmas qualidades avaliadas na posta em marcha. Segue a quantidade de corridas produzidas no período amostral:

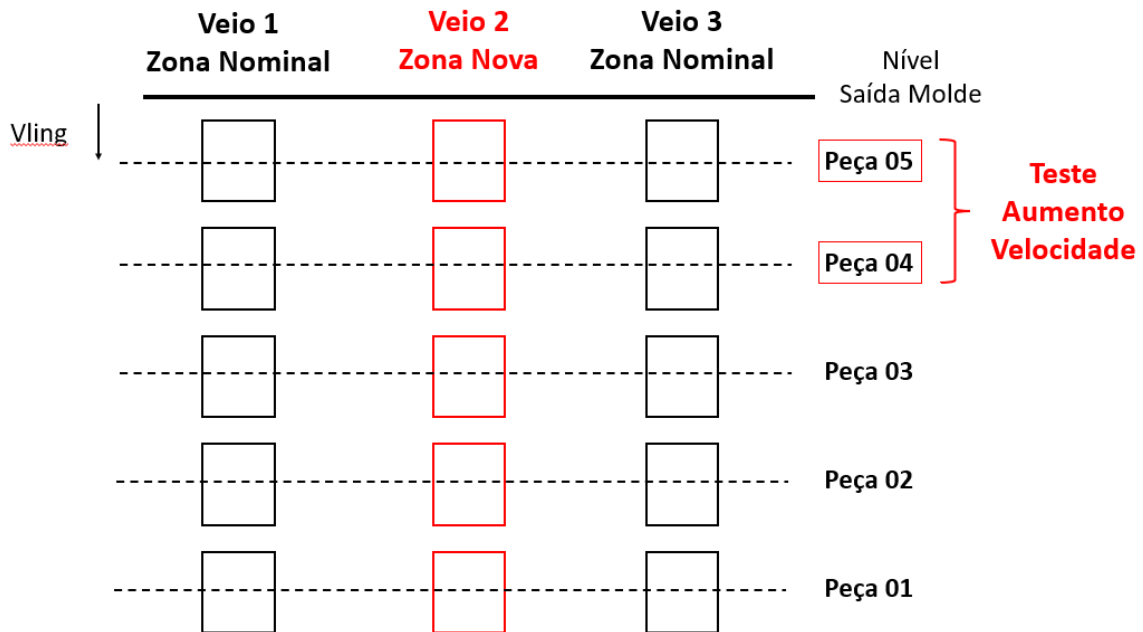
- SAE 1141: 48 corridas
- DIN20MNCR5 MOD: 54 corridas
- SAE 1045D: 45 corridas
- ABNT 1040: 27 corridas
- DIN 41CRS4 MOD: 9 corridas

3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os testes aqui apresentados consistem em seis corridas escala piloto, em seção 240mm, onde foram instaladas a nova zona em um ou mais veios da máquina de lingotamento contínuo enquanto nos veios restantes mantiveram-se a zona atual (nominal). Nessas corridas foram feitos aumentos em velocidade de lingotamento de 0,1

m/min do meio para o fim do decorrer do processo, possibilitando a retirada de amostras macrográficas de peças com e sem aumento, conforme Figura 3.4.

Figura 3.4 Esquema do tipo de amostragem durante corridas teste.



Fonte: Autor.

Esse modelo de testes exemplificado na figura 3.4 permite, principalmente, testar em uma mesma corrida (leia-se mesma condição) as duas zonas e em duas velocidades, assim como retirar amostras macrográficas da mesma região.

Outros parâmetros de análise serão as distribuições de água entre zonas (%), que configura de forma simplificada as receitas (leia-se parâmetros) de refrigeração secundária, conforme Tabela 3.2.

3.2.1. MACROGRAFIA BAUMANN

As corridas testes foram amostradas entre veios e ao longo do decorrer do lingotamento da corrida. Sendo uma das amostras na primeira metade (peças 1, 2 ou 3) e a segunda na segunda metade (4 ou 5), conforme Figura 3.4. As amostras de 100mm foram posteriormente levadas para análise macrográfica, na qual, foi utilizada o método Baumann.

O método Baumann nos permite gravar em um papel fotográfico a macroestrutura do nosso material bruto de fusão através de um reagente ácido (ácido sulfúrico), que reage preferencialmente ao enxofre - tendo como produto uma “foto” transversal da seção onde somos capazes de avaliar as zonas de solidificação, trincas, segregação, pinholes, entre outros.

Figura 3.5 Processo de macrografia Baumann.



Fonte: Autor.

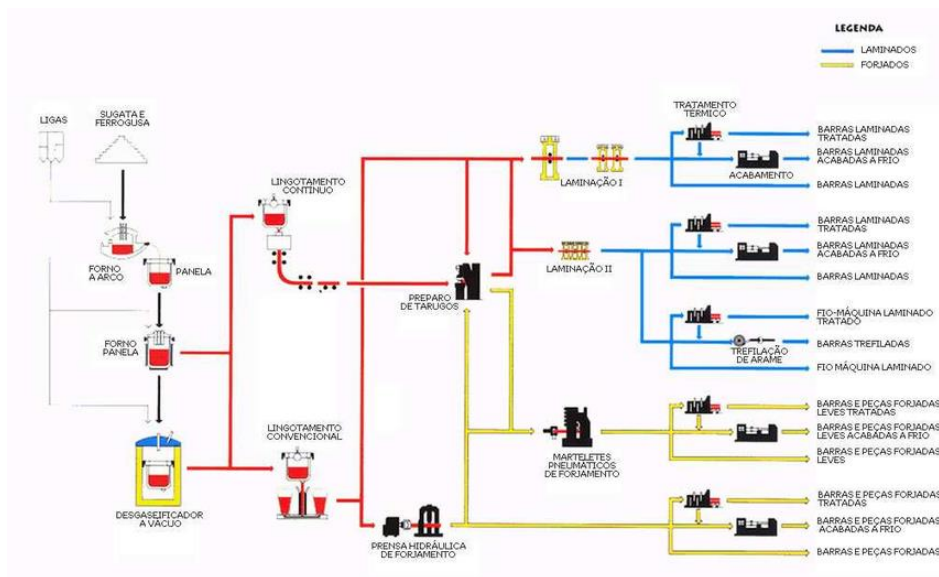
O passo a passo da macrografia Baumann consiste nas seguintes etapas:

- Corte de uma amostra “bolacha” de 25mm;
- Polimento da superfície;
- Medições dimensionais;
- Identificação de cantos (raios internos, externos) e lote;
- Ataque com o reagente ácido (H_2SO_4) e aplicação imediata do filme fotográfico sobre a superfície da amostra;
- Lavagem em cuba de água;
- Imersão por 5min em cuba de fixador fotográfico;
- Secagem.

3.2.2. FLUXO DO MATERIAL TESTE

Todo material testado neste estudo pode, ou não, ser tratado termicamente e/ou esmerilhado. Posteriormente, sofre conformação mecânica via processo de laminação. Para então ser inspecionado e embalado. Conforme Figura 3.6:

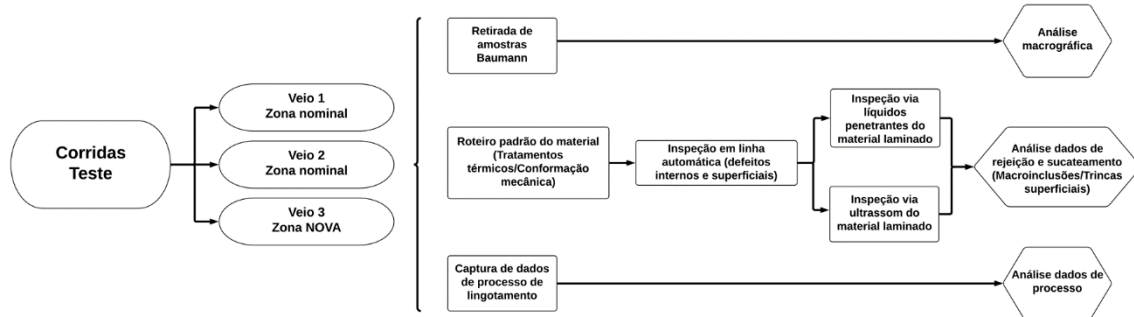
Figura 3.6 Figura ilustrativa do fluxo de processo da usina de Charqueadas.



Fonte: Autor (Cortesia Gerdau SA).

Atualmente, o processo encontra-se apenas via lingotamento contínuo e, portanto, em funcionamento estão apenas os laminadores I e II – que serão o destino dos materiais teste deste estudo. Corridas provenientes da aciaria, em torno de 60 toneladas, podem se ramificar e laminarem em diversas bitolas, comprimentos e clientes. Porém, a metodologia de análise e amostragem permanecerá a mesma para todo material teste dentro (Figura 3.7) e fora da aciaria (Figura 3.6).

Figura 3.7 Figura esquemática do fluxo dos materiais teste.



Fonte: Autor.

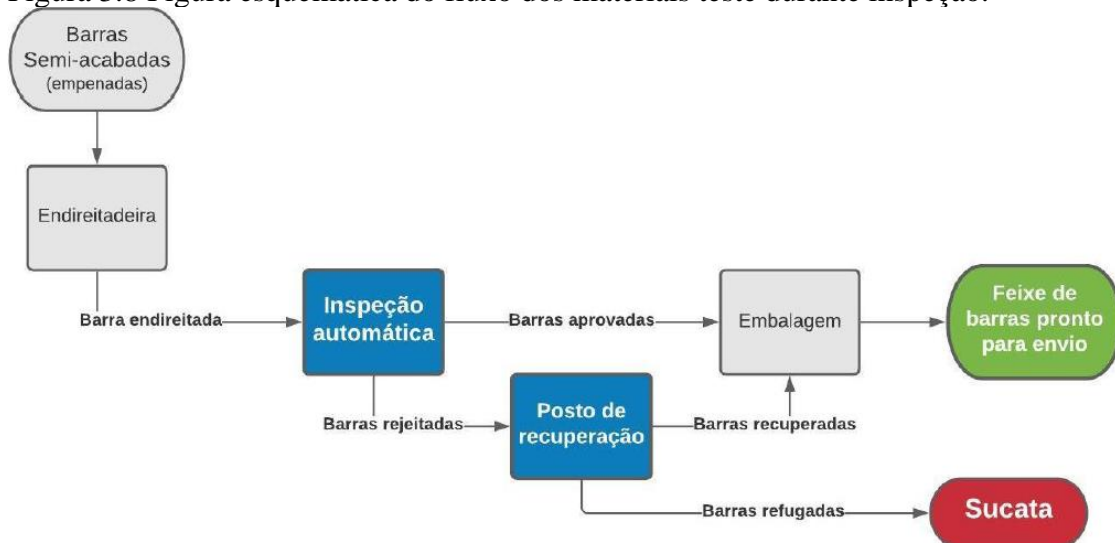
3.2.3. INSPEÇÃO VIA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Todo material testado durante o projeto foi inspecionado via ensaios não destrutivos em relação a integridade interna e externa. Através do uso de sistemas de ultrassom e fuga de campo magnético, respectivamente.

Em caso de materiais rejeitados, eles são inspecionados através de ultrassom manual e/ou partículas magnéticas. Podendo acabar sendo aprovados (em caso de defeitos falsos, ou recuperados) ou refugados, potencialmente, virando sucata.

Ambos dados, tanto de rejeição quanto de sucata serão pertinentes ao presente estudo através da análise dos testes e seus dados reais frente a valores históricos para o mesmo material.

Figura 3.8 Figura esquemática do fluxo dos materiais teste durante inspeção.



Fonte: (Haubold 2021).

Os resultados das linhas de inspeção serão avaliados nas seguintes categorias: rejeição e sucateamento, e serão apresentados conforme as seguintes fórmulas:

$$Rej = \frac{n_{barras, rej}}{n_{barras, tot}} * 100\% \quad (6)$$

$$kg/t = \frac{m_{sucata}}{m_{material\ inspecionado}} \quad (7)$$

$$Scrap\ Performance = \frac{kg/t_{real} - kg/t_{hist}}{kg/t_{hist}} \quad (8)$$

$$Rejection\ Performance = \frac{rejeição_{real} - rejeição_{hist}}{rejeição_{hist}} \quad (9)$$

Todos resultados envolvendo dados reais de Rejeição (%) e Sucateamento (kg/t) foram multiplicados por um coeficiente (C_o) arbitrário para respeitar os dados reais da empresa.

$$Rej = C_o * Rej_{real} \quad (10)$$

$$kg/t = C_o * kg/t_{real} \quad (11)$$

No entanto, os dados de *Scrap Performance* (%) e *Rejection Performance* (%) não sofrem alterações devido ao coeficiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados objetivados neste estudo devem satisfazer, em tese, pelo menos três dos critérios aqui citados, que configuram os fatores limitantes do aumento de velocidade. São eles:

1. Integridade subsuperficial, ou seja, a estabilidade ou melhora na condição de trincas *off-corner*;
2. Limpeza inclusionária estável, ou seja, um não aumento ao número de incidência de rejeição e/ou sucata por inclusões não metálicas em produtos laminados;
3. Integridade superficial dos produtos laminados, que são uma função direta da qualidade superficial dos produtos brutos de fusão.

Sendo os itens (1) e (2), de fato, os críticos e de maior importância dado os objetivos do presente estudo. Em relação ao item (3), espera-se um benefício em qualidade superficial ao tratarmos de um aumento de velocidade de lingotamento. Porém, ambos três itens serão avaliados criteriosamente a seguir.

4.1. QUALIDADE INTERNA E SUBSUPERFICIAL

Serão apresentados os dados por corrida para análise completa das condições dos testes realizados incluindo temperaturas (SH e de endireitamento), velocidade, relação Mn/S, ajustes de velocidade. Além dos resultados das TOC encontradas nas macrografias. Segue tabela 4.1 com um resumo comparativo entre condições de refrigeração secundária (zona existente e nova) e suas respectivas *performances* em relação a criticidade de TOC.

Tabela 4.1 Resultados de performance em relação a mitigação de comprimento de TOCs.

Criticidade TOC - Comprimento							Simbolo	Definição
Corrida	Qualidade	Velocidade nominal Zona Existente	Velocidade nominal Zona Nova	% Performance Velocidade nominal	Velocidade + 0,1 m/min Zona nova	% Performance Velocidade +0,1 m/min	+++	Sem TOC
1	SAE 1045	-	+	-68%	-	-23%	++	<6mm
2	SAE 1045	--	++	-73%	+	-88%	+	<10mm
3	SAE 1141	--	+	-60%	+	-50%	0	10-12mm
4	ABNT 1040	---	+	-68%	+	-73%	-	<15mm
6	DIN 41CRS4 MOD	0	++	-10%	++	-50%	--	<20mm
7	DIN 20MNCRS5 MOD	+++	+++		+++		---	>20mm
Média Geral			Velocidade nominal	-56%	Aumento +0,1 m/min	-57%		

Fonte: Autor

Na tabela 4.1 temos uma legenda ilustrativa dos comprimentos de *trincas off corner* além de um comparativo entre tamanhos reais das duas condições teste: nova zona com velocidade nominal e nova zona com aumento de 0,1m/min. Em relação a condições base (zona existente e velocidade nominal).

Em ambos os casos (com e sem aumento de velocidade) a performance em redução de tamanho de TOC permaneceu próximo de -56% em relação a condição anterior.

4.1.1 SAE 1045

Segue os dados das duas corridas testadas e amostradas do aço SAE 1045. Dados como qual(is) veio(s) foram posicionadas a nova e a existente zona secundária, velocidades de lingotamento nominais e ao longo da corrida (ilustradas pelo número sequencial das peças), distribuição de água entre zonas, valores nominais e reais de SH, Mn/S e as temperaturas de endireitamento.

Na tabela 4.2 à direita, enxerga-se os dados resumo das macrografias *baumanns* contendo dados de tamanho da trinca mais crítica encontrada e distância da trinca até a superfície. No formato “Tamanho/distância”. Ao passo em que na Figura 4.1, as macrografias propriamente ditas são dispostas por veios nas colunas e em diferentes velocidades nas linhas.

Tabela 4.2 Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 1.

Corrida	1			
Qualidade	SAE 1045			
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	Exist	Exist
Zona 2	-	NOVA	Exist	Exist
Velocidade #1-3	[m/min]	0,9	0,9	0,9
Velocidade #4-5	[m/min]	1,0	0,9	0,9
Distribuição	[%]	65-35	65-35	65-35

		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	Exist	Exist
Zona 2	-	NOVA	Exist	Exist
Tamanho/distância	[mm]	7/14	10/15	15/10
Tamanho/distância	[mm]	17/8	13/12	22/7

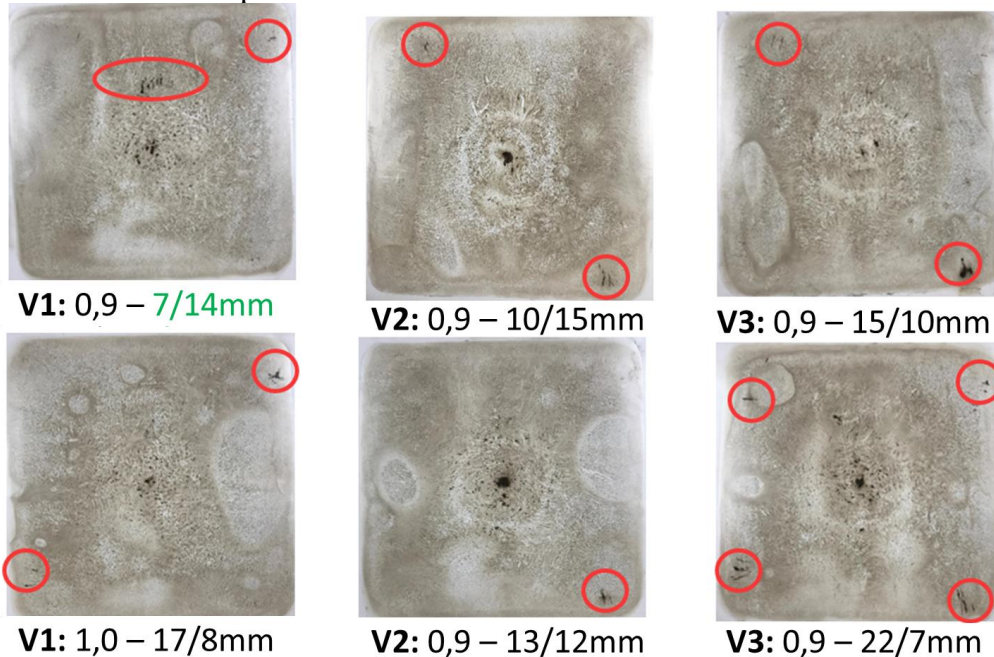
Mn/s, real	-	24		
SH, real	[°C]	48		
Temperatura Endireitamento	[°C]	1060	1070	1070

OBS	-			
-----	---	--	--	--

Velocidade, nom	[m/min]	0,9		
SH, nom	[°C]	45		
Mn/s, nom	-	40		

Fonte: Autor

Figura 4.1 Resultados da corrida 1 com macrografias por veios, velocidades, tamanho/distância da superfície das TOCs.



Fonte: Autor

Fica evidente redução de tamanho da trinca e distância a superfície dada pela nova zona de refrigeração secundária em relação a existente. Como é possível visualizar na Corrida 1, parte-se de uma condição: tamanho 22mm e distância superfície 7mm para

uma melhora de tamanho 7mm e distância superfície 14mm e significativa menor incidência – nessas macros em específico, reduzimos de 4 incidências para 1. Isso tudo para uma mesma condição de velocidade (nominal) e temperatura (3°C acima da objetivada).

Importante ressaltar que em ambas corridas estavam com um %Mn/%S significativamente reduzido frente ao nominal, portanto, os resultados acima explicitam as condições mais críticas dentro do ruído de composição química e, para o caso da segunda corrida, de temperatura de lingotamento (+13°C), vide Tabela 4.3.

Na segunda corrida, Figura 4.2 fica evidente o quanto a nova zona secundária com a apropriada receita de refrigeração elimina trincas (em uma velocidade nominal) e mitiga significativamente frente a condição existente (em uma velocidade aumentada), apesar do SH real +13°C do objetivada e com relação Mn/S de -10 da objetivada.

Tabela 4.3 Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 2.

Corrida	2			
Qualidade	SAE 1045			
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Velocidade #1-3	[m/min]	0,85	0,85	0,85
Velocidade #4-5	[m/min]	0,95	0,95	0,95
Distribuição	[%]	55-45	50-50	65-35

		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Tamanho/distância	[mm]	OK	4/16	15/17
Tamanho/distância	[mm]	8/11	8/17	-

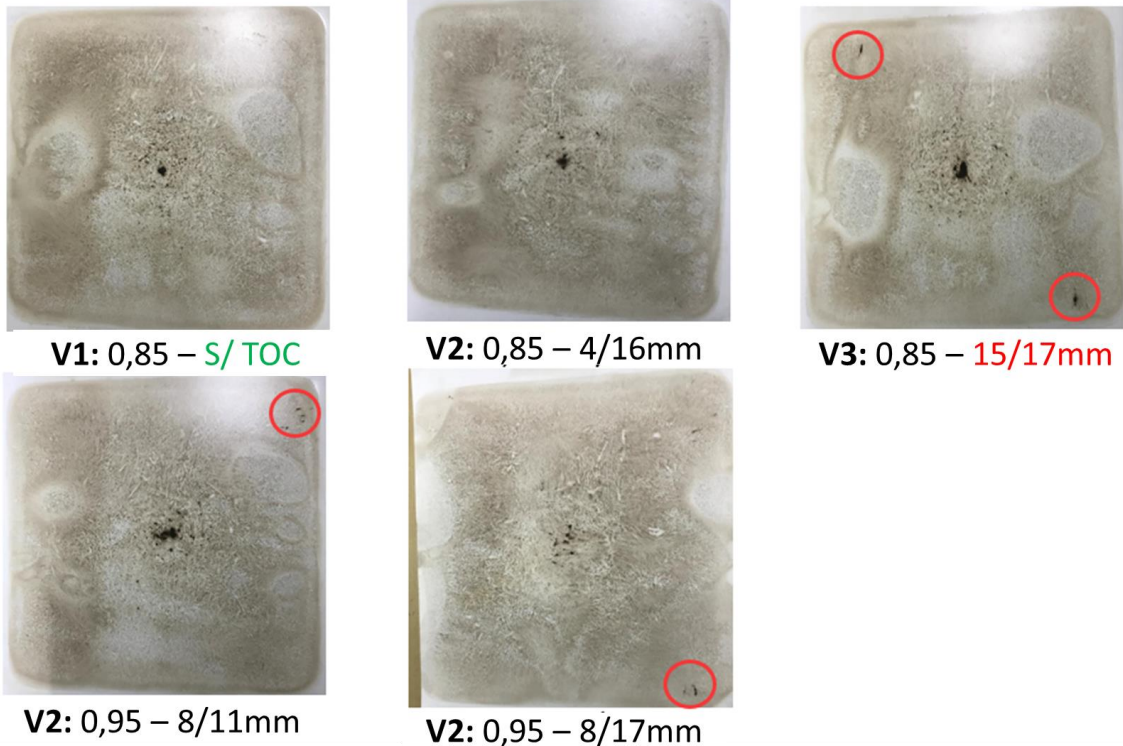
Mn/s, real	-	30		
SH, real	[°C]	58		
Temperatura Endireitamento	[°C]	1035	1045	1040

OBS	-	Tabela de ajuste em função de		
-----	---	-------------------------------	--	--

Velocidade, nom	[m/min]	0,9
SH, nom	[°C]	45
Mn/s, nom	-	40

Fonte: Autor

Figura 4.2 Resultados da corrida 1 com macrografias por veios, velocidades, tamanho/distância da superfície das TOCs.



Fonte: Autor

4.1.2 SAE 1141

A qualidade SAE 1141 com baixíssimo Mn/S e criticidade alta para TOC demonstrou uma evolução significativa no veio 2. Especialmente pela nova zona e uma distribuição de água mais homogênea entre zonas (55% - 45%) até mesmo com incremento em velocidade +0,1m/min.

Evidenciado pela Tabela 4.4 e Figura 4.3 no veio 2 tivemos sem aumento uma condição livre de TOC e com aumento de velocidade uma trinca de 8mm (a menor encontrada frente a todas outras condições).

Tabela 4.4 Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 3.

Corrida	3			
Qualidade	SAE 1141			
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Velocidade #1-3	[m/min]	0,75	0,75	0,75
Velocidade #4-5	[m/min]	0,85	0,80	0,75
Distribuição	[%]	60-40	55-45	65-35

		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Tamanho/distância	[mm]	8/15	OK	20/15
Tamanho/distância	[mm]	10/14	8/15	

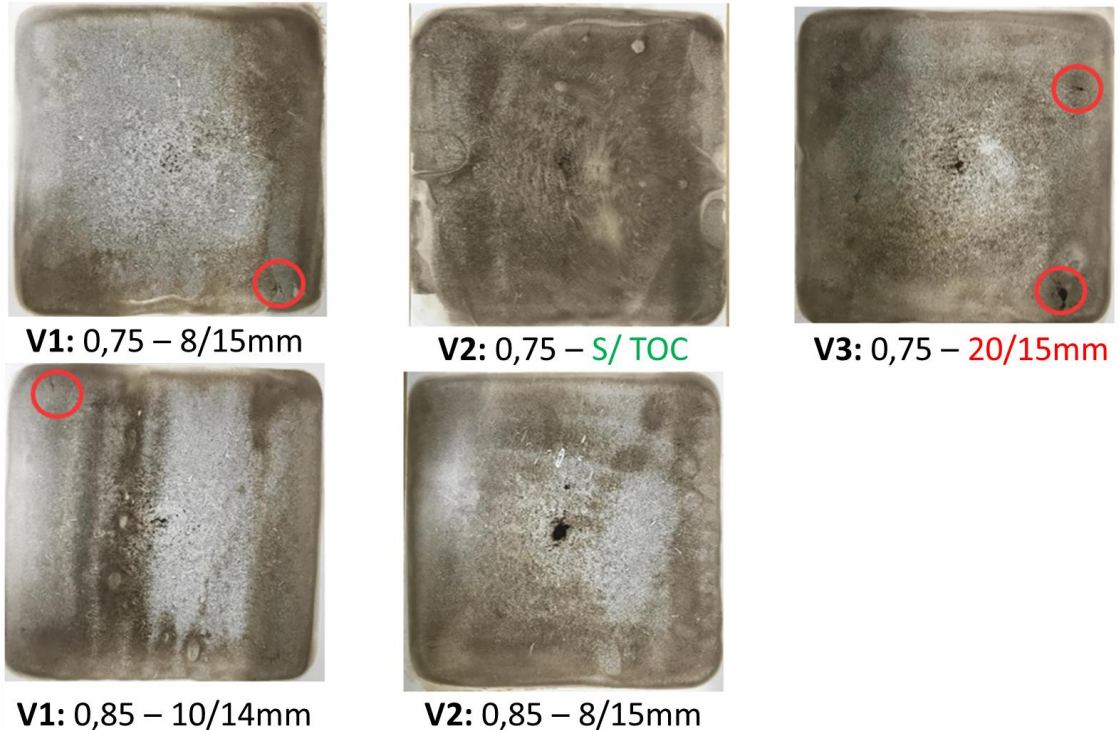
Mn/s, real	-	13,6		
SH, real	[°C]	49		
Temperatura		1015	1015	1030
Endireitamento	[°C]	1050	1060	1035

OBS	-	Pressão alta veio 1 - zona 1;		
-----	---	-------------------------------	--	--

Velocidade, nom	[m/min]	0,8
SH, nom	[°C]	40
Mn/s, nom	-	15,2

Fonte: Autor

Figura 4.3 Resultados da corrida 3 com macrografias por veios, velocidades, tamanho/distância da superfície das TOCs.



Fonte: Autor

4.1.3 ABNT 1040

A corrida 4 apresentou uma clara discrepância entre a performance entre zonas de refrigeração secundária. Conforme Tabela 4.5 e Figura 4.4 vemos uma redução de 22mm para 6mm com aumento de velocidade, além da distância da trinca até a superfície de 10mm para 14mm.

Tabela 4.5 Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 4.

4				
ABNT 1040				
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Velocidade #1-3	[m/min]	0,80	0,80	0,80
Velocidade #4-5	[m/min]	0,90	0,85	0,80
Distribuição	[%]	55-45	55-45	65-35

		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Tamanho/distância	[mm]	6/13	7/15	22/10
Tamanho/distância	[mm]	6/14		

Mn/s, real	-	21,1		
SH, real	[°C]	45		
Temperatura		1025	1035	1045
Endireitamento	[°C]	1065	1060	1050

OBS	-	Vazamento nos bicos de canto		
-----	---	------------------------------	--	--

Velocidade, nom	[m/min]	0,8		
SH, nom	[°C]	40		
Mn/s, nom	-	21,8		

Fonte: Autor

Figura 4.4 Resultados da corrida 4 com macrografias por veios, velocidades, tamanho/distância da superfície das TOCs.



Fonte: Autor

4.1.4 DIN 41CRS4 MOD

Os resultados, sem exceções, apresentam claramente uma melhora significativa da nova zona frente a existente. Mesmo comparando peças com aumento de velocidade na nova zona v.s. peças sem aumento da zona existente, conforme [Tabela 4.6.

Os testes de diferentes receitas em diferentes veios mostraram uma melhor performance nos veios com a distribuição 55% - 45% (% Água Zona I - % Água Zona II). Evidenciado pela evolução no SAE 1045 da corrida 1 para a 2, entre os veios 1 e 2 da corrida 3 da qualidade SAE 1141 e da corrida 6 DIN 41CRS4 MOD conforme Figura 4.5.

Tabela 4.6 Tabela com dados de processo, tamanho e distância das TOCs da corrida teste 6.

Corrida	6			
Qualidade	DIN 41CRS4 MOD			
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Velocidade #1-3	[m/min]	0,80	0,80	0,80
Velocidade #4-5	[m/min]	0,90	0,90	0,80
Distribuição	[%]	55-45	60-40	55-45

		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Tamanho/distância	[mm]	9/15	3/18	10/15
Tamanho/distância	[mm]	2/17	5/15	

Mn/s, real	-	25,5		
SH, real	[°C]	42		
Temperatura	[°C]	1040	1065	1060
Endireitamento	[°C]	1070	1070	1065

OBS	-	Vazamento nos bicos de canto		
-----	---	------------------------------	--	--

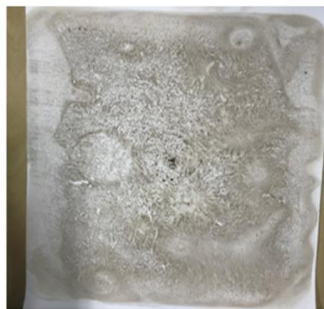
Velocidade, nom	[m/min]	0,8
SH, nom	[°C]	40
Mn/s, nom	-	20

Fonte: Autor

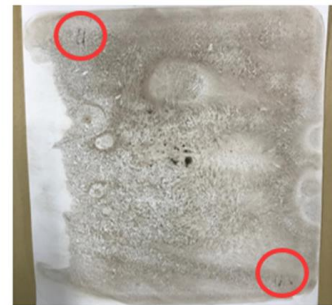
Figura 4.5 Resultados da corrida 6 com macrografias por veios, velocidades, tamanho/distância da superfície das TOCs.



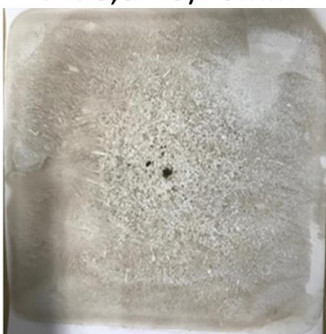
V1: 0,8 – 9/15mm



V2: 0,8 – 3/18mm



V3: 0,75 – 10/15mm



V1: 0,9 – 2/17mm



V2: 0,9 – 5/15mm

Fonte: Autor

4.2. LIMPEZA INCLUSIONÁRIA

Os resultados a seguir são referentes aos dados de sucata e rejeição interna, representado principalmente por inclusões detectadas nas linhas de inspeção. Foram divididos corrida a corrida com dados históricos e os resultados reais dos testes conduzidos.

As corridas com performance -100% denotam que houve 0 kg totais de sucata ou 0 barras rejeitadas. Importante ressaltar o fato de que os testes foram realizados buscando otimização das corridas e não foram feitas com um aumento de velocidade no decorrer de todo o processo – apenas em metade. Quanto ao “outlier” da qualidade DIN41CRS4 MOD, na Tabela 4.7, é perceptível que teve alguns kg de sucata por macroinclusão, ao passo que, sua rejeição foi boa em relação ao histórico.

Conforme Tabela 4.8 os dados rejeição corroboram o ganho em performance devido a redução de rejeição e sucata.

Tabela 4.7 Tabela com resultados de sucata por macroinclusão das corridas teste da posta em marcha.

Heat	GRADE	Sucata Histórica (kg/t)	Sucata Real (kg/t)	SCRAP PERFORMANCE
1	SAE 1045	0,21	0,00	-100,00%
2	SAE 1045	0,21	0,00	-100,00%
3	SAE 1141	0,98	0,00	-100,00%
4	ABNT 1040	0,33	0,00	-100,00%
5	ABNT 1040	0,33	0,00	-100,00%
6	DIN 41CRS4 MOD	0,63	5,01	689,02%

Fonte: Autor

Tabela 4.8 Tabela com resultados de rejeição por macroinclusão das corridas teste da posta em marcha.

Heat	GRADE	Rejeição Histórica (%)	Rejeição Real (%)	REJECTION PERFORMANCE
1	SAE 1045	2,48%	0,00%	-100,00%
2	SAE 1045	2,48%	0,85%	-65,75%
3	SAE 1141	1,92%	0,00%	-100,00%
4	ABNT 1040	2,48%	0,77%	-68,78%
5	ABNT 1040	2,48%	0,27%	-89,13%
6	DIN 41CRS4 MOD	6,52%	0,92%	-85,95%

Fonte: Autor

Os resultados de sucateamento da corrida 6, na tabela 4.7, são significativos e podem, ou não, serem pontuais da corrida. Porém, cabe avaliar se esse resultado é ruído ou teve impacto pelo parcial aumento de velocidade durante a corrida.

Fora esse *outlier*, os resultados foram excelentes referentes a limpeza inclusionária, destacando apenas o importante fato de que, esses dados representam uma amostragem pequena tanto pelo número de corridas realizadas, quanto pelo fato de o aumento de velocidade ter sido parcial durante a corrida. Os tempos de residência do molde, distribuidor e panela foram reduzidos, devido ao aumento parcial de 0,1 m/min na velocidade de lingotamento, mas não integralmente, caso as mudanças de velocidade ocorram de forma padronizada.

4.3. QUALIDADE SUPERFICIAL

Esse segmento de resultados será dividido da seguinte forma:

- Resultados das linhas de inspeção em relação aos dados das corridas do **Posta em Marcha da zona secundária** – que busca avaliar a diferença entre zonas de refrigeração secundária e aumento de velocidade. Englobam as corridas já listadas acima;
- Resultados das linhas de inspeção em relação aos dados das corridas **posteriores ao Posta em Marcha da zona secundária** – que tem como objetivo avaliar uma amostragem maior de corridas (visto que agora a nova zona está presente nos três veios e operando em tempo integral) e o impacto benéfico ou não, da nova zona de refrigeração secundária.

4.3.1. POSTA EM MARCHA

Ao avaliar os resultados, importante dar atenção ao conjunto de dados: sucata e rejeição para o mesmo material. Como, por exemplo, a corrida 1 (Tabela 4.10) que teve um alto valor de rejeição, porém não teve nenhum sucateamento. Esse conjunto de dados pode significar uma série de coisas, por exemplo:

- O material apresentou uma qualidade superficial abaixo da média histórica, porém nenhum defeito ultrapassou os limites de liberação;

- Esse material laminado sofreu ao longo do tempo um aperto nos parâmetros de inspeção e se tornou mais criterioso nos níveis de inspeção automática – não significando que o material, em si, teve uma queda em qualidade superficial;

Conforme Figura 4.9, os resultados de performance superficial das corridas da posta em marcha mostram um ganho, ou pelo menos, uma estabilidade significativa frente ao histórico. O único “outlier” desses dados é a corrida 3, que apresentou tanto sucateamento quanto rejeição – indicando uma leve piora em qualidade superficial.

Tabela 4.9 Tabela com resultados de sucata por Trincas superficiais das corridas teste da posta em marcha.

Heat	GRADE	Sucata Histórica (kg/t)	Sucata Real (kg/t)	SCRAP PERFORMANCE
1	SAE 1045	4,25	0,00	-100,00%
2	SAE 1045	4,25	0,00	-100,00%
3	SAE 1141	3,81	4,95	29,76%
4	ABNT 1040	1,89	0,00	-100,00%
5	ABNT 1040	1,89	0,00	-100,00%
6	DIN 41CRS4 MOD	4,99	5,28	5,85%
7	DIN 20MNCR5 MOD	9,76	0,00	-100,00%

Fonte: Autor

Tabela 4.10 Tabela com resultados de rejeição por defeitos superficiais das corridas teste da posta em marcha.

Heat	GRADE	Rejeição Histórica (%)	Rejeição Real (%)	REJECTION PERFORMANCE
1	SAE 1045	1,88%	11,38%	505,86%
2	SAE 1045	1,88%	0,00%	-100,00%
3	SAE 1141	2,06%	2,54%	23,44%
4	ABNT 1040	2,07%	0,39%	-81,31%
5	ABNT 1040	2,07%	0,00%	-100,00%
6	DIN 41CRS4 MOD	9,66%	9,63%	-0,38%
7	DIN 20MNCR5 MOD	6,08%	5,52%	-9,20%

Fonte: Autor

Considerando que os testes realizados foram casos a parte, pois tiveram três veios com diferentes parâmetros sendo testados (receitas de refrigeração secundária), além de

uma relação Mn/S baixa e um SH acima 10°C do objetivado – possivelmente não é uma piora em performance sistêmica. Um estudo com um maior volume de dados amostrais seria o mais indicado para elucidar as correlações existentes e resultados frente as mudanças. O *outlier* da corrida 1, na tabela 4.10 não, necessariamente. Deve ser entendido como uma piora de performance pelo fato da sucata não seguir o mesmo comportamento (zero sucata por TS).

4.3.1.1 DIN 20MNCR5 MOD

A qualidade DIN20MNCR5 MOD foi testado, primariamente, com o intuito de avaliar a qualidade superficial com o advento da nova zona e novos parâmetros de refrigeração secundária. Por ser um material peritético tipo A e microligado, se configura como um material crítico para defeitos superficiais e, portanto, foi testado nas condições demonstrados na Tabela 4.11 para avaliação superficial da nova zona.

Tabela 4.11 com dados de processo da corrida teste 7.

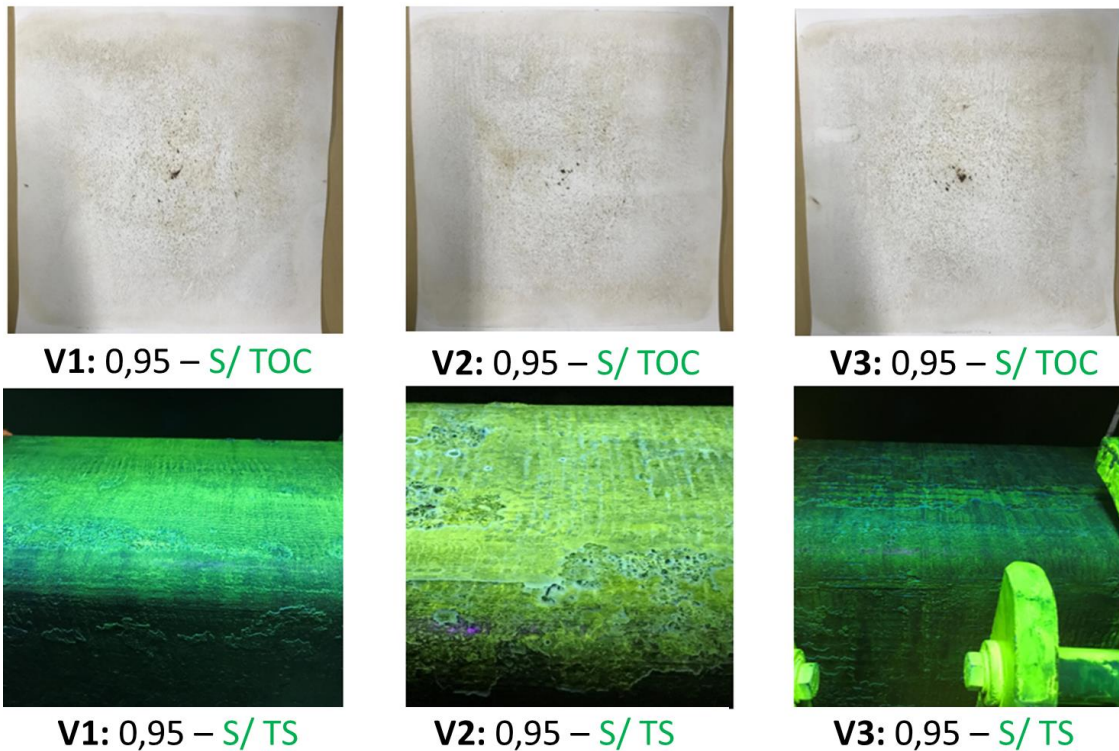
Corrida	7			
Qualidade	DIN 20MNCR5 MOD			
		Veio 1	Veio 2	Veio 3
Zona 1	-	NOVA	NOVA	Exist
Zona 2	-	NOVA	NOVA	Exist
Velocidade #1-3	[m/min]	0,95	0,95	0,95
Velocidade #4-5	[m/min]			
Distribuição	[%]	60-40	60-40	60-40
Mn/s, real	-	101,0		
SH, real	[°C]	25		
Temperatura Endireitamento	[°C]	1080	1090	1100
OBS	-	Teste para avaliação		
Velocidade, nom	[m/min]	0,95		
SH, nom	[°C]	25		
Mn/s, nom	-	101		

Fonte: Autor

A corrida 7 foi testada para avaliação criteriosa da qualidade superficial do material bruto de fusão. Visto que o aço DIN 20MNCR5 MOD é um aço peritético e microligado ele serve de balizador como um dos aços mais críticos em termos de qualidade superficial – caso não houvesse impacto no mesmo, é entendível que a qualidade superficial geral dos materiais não sofreu nenhum demérito.

Para tal, foram amostrados os três veios e levados a inspeção manual de líquidos penetrantes. Conforme Figura 4.6 os resultados mostraram um bom aspecto superficial para todas as condições (zona existente e nova) sem nenhum indício de defeitos superficiais.

Figura 4.6 Resultados da corrida 7 com macrografias por veios e dos ensaios de partículas magnéticas.



Fonte: Autor.

4.3.2. PÓS IMPLEMENTAÇÃO ZONA SECUNDÁRIA

Os resultados a seguir visam avaliar as influências da nova zona de refrigeração propriamente dita na qualidade superficial nos materiais laminados. Os dados foram coletados após a posta em marcha que foi serviu como avaliação e validação da zona para sua implementação. Por questões de praticidade, foram escolhidas qualidades críticas para defeitos superficiais originados em tarugos assim como, as qualidades utilizadas na posta em marcha.

Conforme Tabela 4.12, os resultados de sucata por trincas superficiais apresentaram uma constante de redução para todas as qualidades avaliadas. Os dados aqui apresentados comparam uma base histórica (anos de 2019 e 2020) frente aos resultados das corridas pós implementação, portanto, os resultados afirmam, pelo menos, uma estabilidade frente a mudança estrutural, mas não, necessariamente, que essa melhora em performance está relacionada a nova zona.

Especialmente ao fato de que, dentro desses resultados não estão atrelados os aumentos de velocidades que estão mapeados para os próximos passos do projeto.

Tabela 4.12 Tabela com resultados de sucata por trincas superficiais das corridas teste do Pós implementação.

Qualidade	Sucata Histórica (kg/t)	Sucata Real (kg/t)	SCRAP PERFORMANCE
ABNT 1040B	1,89	1,83	-3,08%
SAE 1045	4,25	3,01	-29,29%
SAE 1141	3,81	1,68	-55,98%
DIN 41CRS4 MOD	4,99	2,16	-56,63%
DIN 20MNCR5 MOD	9,76	2,04	-79,14%

Fonte: Autor

Em relação aos dados de rejeição (Tabela 4.13) vemos algumas qualidades com uma piora significativa nos percentuais de rejeição. Esses dados são possivelmente explicados pelas **mudanças e apertos nos critérios de inspeção**, visto que os dados de sucata para os mesmos aços, no mesmo período não apresentam uma piora análoga.

Tabela 4.13 Tabela com resultados de rejeição por defeitos superficiais das corridas teste do Pós implementação.

Qualidade	Rejeição Histórica (%)	Rejeição Real (%)	REJECTION PERFORMANCE
ABNT 1040B	2,22%	5,53%	149,14%
SAE 1045	1,97%	0,91%	-54,00%
SAE 1141	2,39%	1,59%	-33,37%
DIN 41CRS4 MOD	9,77%	9,14%	-6,44%
DIN 20MNCR5 MOD	6,35%	11,62%	83,00%

Fonte: Autor

Em casos como esse, em que há uma certa piora em rejeição, mas não há um aumento em sucateamento é seguro nortear as avaliações pelos dados de sucata. Esses são os valores mais assertivos quanto a performance do material em análise.

5. CONCLUSÕES

1. A nova zona de refrigeração secundária apresentou uma significativa melhora na qualidade subsuperficial para todas as qualidades e para todas as condições testadas;
2. Uma distribuição de água mais gradual (55%-45%) frente a antiga (60%-40%) se fez mais eficiente no sentido de redução de defeitos do tipo *trincas off corner*;
3. Os resultados de limpeza inclusionária dos testes de posta em marcha não se provaram fatores limitantes para o aumento de velocidade. Porém, será necessário testes em cenários com o aumento pleno e amostragens maiores para validação completa, em especial, qualidades críticas para macro e microinclusões;
4. Os resultados de qualidade superficial foram satisfatórios, a influência da nova zona de refrigeração foi estável e com valores de performance positivos de até 57% frente a base histórica utilizada;
5. De forma geral, os testes de aumento de velocidade foram um sucesso e viabilizaram os próximos passos com aumentos plenos com o advento da nova zona de refrigeração e mitigação significativa de até 57% de defeitos subsuperficiais.

6. TRABALHOS FUTUROS

1. Avaliação criteriosa e com uma amostragem significativa de corridas com aumento de velocidade pleno visando a validação no sentido de limpeza inclusionária, além do ganho potencial em qualidade superficial;
2. Avaliação criteriosa de segregação e defeitos internos com aumento de velocidade pleno validando as diferentes condições de refrigeração secundária e aumentos de velocidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SAMARASEKERA, I.V. **The Making, Shaping and Treating of Steel**, 11ª Edition, Casting Volume, 17, Continuous Casting of Steel Billets, 2003.

Thomas, B. G. (2000). **Continuous casting operation: Fluid flow**. In *Making, Shaping, and Treating of Steel* (11th ed., Vol. 11).

MOURÃO, M. B. *et al.* **Introdução à siderurgia**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

FERNANDES, P. C. **Otimização dos parâmetros de lingotamento contínuo para minimizar a ocorrência de trincas superficiais no aço DIN-20MnCr5 MOD**. Dissertação. UFRGS, 2005.

WOLF, M.M. **Estimation of Crack Susceptibility for New Steel Grades**. In: *1º European Conference on Continuous Casting*, Florence, Italy, 1991, p. 2.489-2.499

HOWE, A.A. **Development of a Computer Model of Dendritic Microsegregation for use with Multicomponent Steels**. In: *Modelling the Flow and Solidification of Metals*. Ed. T.J. Smith, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1987. p. 51-59.

YASUMOTO, K. **Metallographic Study of Surface Cracking Mechanism**. In: *Continuously Cast Steel Slabs*. 1988. Thesis (PhD), Imperial University, Tokyo.

HOWE, A.A. **Segregation and Phase Distribution during Solidification Structure of Rapidly Solidified 18Cr-8Ni Stainless Steel**. In: *Tetsu-to Hagané*, v. 78, 1992, p. 1369-1376

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).

BARCELLOS, V. K. **Análise da transferência de calor durante a solidificação de aços em moldes no lingotamento contínuo**. Dissertação. UFRGS, 2007.

BRIMACOMBE, J.K.; HAWBOLT E.B. & WEINBERG, F. **Formation of off-corner internal cracks in continuously-cast billets**. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v.19, p. 215-227, 1980.

HO, K.; PEHLKE, R. D. **Mechanisms of heat transfer at a metal-mold interface**. *AFS Transactions*, v. 92, p. 587-598, 1984.

SANTOS C. A, **Solidification heat transfer and a neural network based algorithm applied to continuous casting of billets and blooms.** *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, v, 13. p. 1-17. 2005.

SAMARASEKERA I.V. **Crack formation in the continuous casting of steel.** *Brimacombe Continuous Casting Course*. Vancouver: Brimacombe Continuous Casting Society; 2011.

BRIMACOMBE JK, Sorimachi K. **Crack formation in the continuous casting of steel.** *Metallurgical Transactions*. 1977; 8:489-505.

C.A.M. PINHEIRO, I.V. Samarasekera, J.K. Brimacombe & B.N. Walker (2000) **Mould heat transfer and continuously cast billet quality with mould flux lubrication Part 1 Mould heat transfer**, *Ironmaking & Steelmaking*, 27:1, 37-54,

SATO, C.; BOSCO, M.A.; RIBEIRO, W.J. & BORNACKI, A.A. **Redução de trincas de solidificação recusáveis no aço A40.** *Seminário interno de siderurgia da BELGO - Usina de Monlevade-GTEC/GGJM*, 2003.

Castilhos, Érica & Janoski, Jair & Fernandes, Paulo & Strohaecker, Telmo. (2018). **Contribuição para a caracterização e diminuição da ocorrência de defeitos internos do tipo trinca off-corner em barras laminadas.**

Li, C., & Thomas, B.G. (2002). **Maximum casting speed for continuous cast steel billets based on sub-mold bulging computation.**

PARK J.K.; THOMAS, B.G. & SAMARASEKERA, I.V. **Analysis of thermomechanical behavior in billet casting with different mould corner radii.** *Ironmaking and Steelmaking*, v. 29, n. 5, p. 359-375, 2002.

SAMARASEKERA, I.V.; CHANDRA, S.; CAMPBELL, A.Z. & BRIMACOMBE, K.J. **Mould shape, heat transfer and mould strand interactions in the casting of steel billets.** *Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries*, Beijing, China, 1993.

ZETTERLUND, E.H. & KRISTIANSSON, J.O. **Continuous casting-a numerical study of the influence of mould wear on crack formation.** *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v. 12, p. 211-216, 1983.

HAUBOLD, V. H. **Análise de confiabilidade da inspeção por ultrassom através de curvas POD.** Trabalho de diplomação. UFRGS, 2021.

FERREIRA, F. N. **Controle da temperatura de aço líquido em uma aciaria elétrica.** Tese. UFRGS, 2000.

Penna, V. L. **TRINCA DE SOLIDIFICAÇÃO *OFF-CORNER* NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TARUGOS.** Dissertação. UFMG, 2005

Oliveira, S. J. L. **COMPORTAMENTO DOS AÇOS PERITÉTICOS DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO NO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.** Dissertação. UFMG, 2009

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIDADE DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
NO LUME - REPOSITÓRIO DIGITAL DA UFRGS**

Uso interno

Nº de sistema SAbi:

1 Identificação do autor e do documento

Nome completo: Andrei Corrado Curatoli Ferreira

RG: 3112616176 CPF: 045.038.100-57

E-mail: andreicorrado@hotmail.com Telefone: (51) 996390303

Curso de Graduação: Engenharia Metalúrgica

Nome do orientador: Professor Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos Data da apresentação: 26 / 11 / 2021

Título do documento: AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO AUMENTO DE VELOCIDADE DE LINGOTAMENTO EM
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇOS ESPECIAIS VIA LINGOTAMENTO CONTÍNUO.

Conceito final: A

2 Disponibilização no Lume - Repositório Digital da UFRGS


Autorizo a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS a disponibilizar gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, o documento supracitado, de minha autoria, no Lume - Repositório Digital da UFRGS para fins de leitura e/ou impressão pela Internet:

De imediato ou A partir de ___/___/___ (no máximo até dois anos após a data da apresentação)

Porto Alegre, RS, 03/12/2021

Local

Data



Assinatura do(a) autor(a) ou seu representante legal

Não autorizo. Justificativa (preenchimento obrigatório): _____

Local

Data

Assinatura do(a) autor(a) ou seu representante legal


Assinatura do(a) orientador(a)

Campo de uso exclusivo da Biblioteca

COMPROVANTE DE ENTREGA DO DOCUMENTO NA BIBLIOTECA SETORIAL

Em: ___/___/___

Carimbo e assinatura

Agosto/2011