



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

MANUEL VITOR DA CRUZ FERREIRA MACIEL

**Estudo da influência do tempo de ciclo térmico de reaquecimento nas propriedades
mecânicas e microestrutura dos aços SAE 5120.**

Guaratinguetá
2020

Manuel Vitor da Cruz Ferreira Maciel

Estudo da influência do tempo de ciclo térmico de reaquecimento nas propriedades mecânicas e microestrutura dos aços SAE 5120.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá
2020

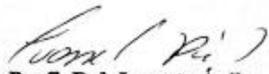
M152e	<p>Maciel, Manuel Vitor da Cruz Ferreira</p> <p>Estudo da influência do tempo de ciclo térmico de reaquecimento nas propriedades mecânicas e microestrutura dos aços SAE 5120 / Manuel Vitor da Cruz Ferreira Maciel – Guaratinguetá, 2020.</p> <p>97 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 97</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira</p> <p>1. Laminação (Metalurgia). 2. Aço de alta resistência. 3. Propriedades mecânicas. I. Título.</p> <p>CDU 621.771(043)</p>
-------	--

MANUEL VITOR DA CRUZ FERREIRA MACIEL

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

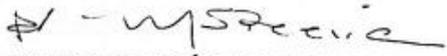
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: Mestrado**

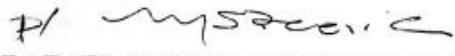
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. RAFAEL HUMBERTO MOTA DE SIQUEIRA
CTA

Dezembro de 2020

DADOS CURRICULARES

MANUEL VITOR DA CRUZ FERREIRA MACIEL

NASCIMENTO	08.05.1990 – SÃO ROQUE / SP
FILIAÇÃO	Manuel da Cruz Ferreira Maciel Zelia da Cruz Maciel
2009/2014	Curso de Graduação em Engenharia de Materiais Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2019/2020	Curso de MBA em Gestão de Negócios IBMEC.

*À toda a minha família,
Em especial aos meus pais Manuel da Cruz Ferreira Maciel e Zelia da Cruz Maciel.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela força e por guiar o meu caminho nos momentos mais difíceis. Agradeço a minha vida, minha proteção, minha família e meus amigos;

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira*, que me incentivou ao longo desta dissertação. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado não existiria;

” O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis. ”

José de Alencar

RESUMO

O constante aumento da competitividade do setor siderúrgico demanda cada vez mais esforços para a redução dos custos de produção. Este trabalho se propõe a estudar ciclos de reaquecimento capazes de produzir com eficiência e redução de custo, lingotes adequadamente aquecidos, com temperatura homogênea o suficiente para ser laminado em barras redondas de aço especial. Os ciclos de reaquecimento foram aplicados no aço SAE 5120. Após a preparação das corridas foram utilizados ciclos de reaquecimento alterando o tempo de permanência em forno, de forma a obter lingotes capazes de sofrer os processos posteriores de conformação, mantendo a integridade dos equipamentos e requisitos de qualidade das barras produzidas. Para avaliar as propriedades mecânicas foram realizados testes de dureza e tração. A microestrutura foi estudada a partir de amostras preparadas metalograficamente e analisadas por microscopia óptica. Foi testado um ciclo com características próximas as do padrão e outros dois ciclos em condições extremas. Os resultados mostraram que o Ciclo A, 410 minutos, apresentou propriedades mecânicas semelhantes às do Ciclo Padrão, porém, com menor custo de produção e tempo de reaquecimento. O ciclo na condição Ciclo B, 360 minutos, apresentou uma estrutura com grãos menores, mas o processo produtivo com esse ciclo mostrou-se instável e impraticável em escala de produção contínua, podendo comprometer a integridade dos equipamentos produtivos. Os materiais processados no Ciclo C, 800 minutos, apresentaram propriedades mecânicas próximas as da condição Padrão, mas o ciclo mostrou se insatisfatório operacionalmente.

PALAVRAS-CHAVE: Laminação. Lingotes. Conformação. Aços Especiais. Competitividade.

ABSTRACT

The constant increase in the competitiveness of the steel industry demands more and more efforts to reduce production costs. This work proposes to study reheating cycles capable of producing efficiently and cost-saving ingots, which are adequately heated, with a temperature homogeneous enough to be rolled in special steel round bars. The reheating cycles were applied to SAE 5120 steel. After the preparation of the heats, reheating cycles were used, changing the time spent in the furnace, in order to obtain ingots capable of undergoing the later forming processes, maintaining the integrity of the equipment and quality requirements of the bars produced. To measure the mechanical properties, hardness and tensile tests were performed. The microstructure was studied from samples prepared metallographically and analyzed by optical microscopy. One cycle was tested with characteristics close to the standard and two other cycles under extreme conditions. The results showed that Cycle B, 410 minutes, presented mechanical properties similar to those of the Standard Cycle, however, with lower production cost and reheating time. The cycle in the Cycle C condition, 360 minutes, presented a structure with smaller grains, but the production process with this cycle proved to be unstable and impractical on a continuous production scale, which could compromise the integrity of the production equipment. The materials processed in Cycle D, 800 minutes, had mechanical properties close to those of the Standard condition, but the cycle was operationally unsatisfactory.

KEYWORDS: Rolling Mill. Ingots. Conformation. Special Steels. Competitiveness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição química da família de aços 51XX.....	17
Figura 2 - Componentes produzidos com aço SAE 5120.....	18
Figura 3 - Composição química do aço SAE 5120.	19
Figura 4 - Fluxograma simplificado de produção em uma usina siderúrgica.	19
Figura 5 - Montagem esquemática para vazamento inferior.	20
Figura 6 - Os cinco principais tipos de moldes para lingotes.....	21
Figura 7 - Cortes transversais das principais formas de lingoteiras.	22
Figura 8 - a) Representação esquemática da variação do tipo de estrutura de um lingote solidificado; b) uma macroestrutura real.....	23
Figura 9 - Formas e tamanhos relativos de placas, blocos e tarugos.....	25
Figura 10 - Comportamento da temperatura da parede refratária de um forno ao longo do tempo de início de aquecimento.....	27
Figura 11 - Análise química da Dunita.....	30
Figura 12 - Seção transversal esquemática de uma instalação com forno poço.....	32
Figura 13 - Planta esquemática de um forno poço típico.	34
Figura 14 - Diferentes localizações de queimadores em fornos poço	35
Figura 15 - Vista superior e lateral de um forno poço de chama única.	38
Figura 16 - Os dois tipos de crescimento de grão durante o processo de reaquecimento	39
Figura 17 - Comportamento da temperatura do lingote nos períodos entre lingotamento e início de laminação.....	42
Figura 18 - Leito de resfriamento do tipo Pente Móvel.	44
Figura 19 - <i>Layout</i> de uma aciaria de aços especiais.....	45
Figura 20 - Início do processo de lingotamento convencional.....	46
Figura 21 - Lingoteiras com aço após o processo de solidificação.	47
Figura 22 - Layout do laminador de perfis pesados	48
Figura 23 - Desenfornamento de lingotes no forno poço.	49
Figura 24 - Conformação de lingote no laminador desbastador.....	50
Figura 25 - Escarfagem de bloco.....	51
Figura 26 - Corte das extremidades do bloco escarfado.....	52
Figura 27 - Conformação do bloco no laminador acabador.	53
Figura 28 - Corte das barras laminadas.	54

Figura 29 - Resfriamento das barras laminadas.....	55
Figura 30 - Processo de de inspeção por partículas magnéticas.....	56
Figura 31 - Remoção de defeito superficial.....	57
Figura 32 - Barra após a remoção dos defeitos superficiais.....	58
Figura 33 - Ciclo de reaquecimento padrão utilizado para o aço 5120 enornado a quente.....	64
Figura 34 - Ciclo de reaquecimento A utilizado para o aço 5120 enornado a quente. .	65
Figura 35 - Ciclo de reaquecimento B utilizado para o aço 5120 enornado a quente...	66
Figura 36 - Ciclo de reaquecimento C utilizado para o aço 5120 enornado a quente...	67
Figura 37 - Operação de corte em serra de fita.....	68
Figura 38 - Microscópio LEICA DMLM.	69
Figura 39 - Durômetro Heckert.	70
Figura 40 - Máquina Universal de Ensaio modelo ECC.....	71
Figura 41 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo Padrão.....	74
Figura 42 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo A.....	75
Figura 43 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo B.	76
Figura 44 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo C.	77
Figura 45 - Representação dos intervalos de dureza (HB) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.....	78
Figura 46 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de dureza.	78
Figura 47 - Intervalos de limite de resistência (MPa) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.....	80
Figura 48 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de resistência.....	80
Figura 49 - Intervalos de estrição (%) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C...	82
Figura 50 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de estrição.....	82
Figura 51 - Representação dos intervalos de alongamento (%) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.	84
Figura 52 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de alongamento.	84
Figura 53 - Representação dos intervalos de limite de escoamento (MPa) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.....	85
Figura 54 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de escoamento.....	86
Figura 55 - Porcentagem de carga média do <i>Bloom</i> para cada um dos ciclos.....	87
Figura 56 - Porcentagem de carga média do <i>Billet</i> para cada um dos ciclos.	88
Figura 57 - Peso de carepa formado em cada ciclo.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor calorífico aproximado dos gases combustíveis.....	33
Tabela 2 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo Padrão.....	61
Tabela 3 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo A.	61
Tabela 4 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo B.	62
Tabela 5 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo C.	62
Tabela 6 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição Padrão.....	64
Tabela 7 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição A.	65
Tabela 8 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição B.	66
Tabela 9 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição C.	67
Tabela 10 - Valores do tamanho de grão obtido para cada amostra do aço 5120 nas quatro condições de processamento.	73

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	AÇOS LIGA	16
2.1.1	Família 51XX	17
2.1.1.1	SAE 5120.....	18
2.2	CLASSIFICAÇÕES DE USINAS SIDERÚRGICAS	19
2.3	LINGOTAMENTO CONVENCIONAL	19
2.3.1	Estrutura bruta de solidificação no processo de lingotamento convencional.	22
2.4	PLACAS, BLOCOS E TARUGOS.....	24
2.5	FORNOS DE REAQUECIMENTO.....	25
2.5.1	Transferência de calor em fornos de reaquecimento	26
2.5.1.1	Condução	26
2.5.1.2	Convecção	28
2.5.1.3	Radiação	29
2.5.2	Reaquecimento em lingotes	29
2.5.3	Layout geral das instalações dos fornos poço	31
2.5.3.1	Projeto de um forno Poço	33
2.5.3.2	Refratário	36
2.5.3.3	Tipos de Forno Poço.....	36
2.5.3.3.1	<i>Fornos poço de chama única</i>	38
2.5.4	Objetivo do processo de reaquecimento	38
2.5.4.1	Requisitos para o processo de reaquecimento	39
2.5.5	Transferência de calor em lingotes.	41
2.6	CONDICIONAMENTO POR ESCARFAGEM	43
2.7	LEITO DE RESFRIAMENTO.....	43
2.8	PROCESSO PRODUTIVO	44
2.8.1	Fusão e preparo do aço	44
2.8.2	Reaquecimento e laminação	47
2.8.3	Inspeção e acabamento	55

3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	MATERIAIS	59
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	59
3.3	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	63
3.4	REAQUECIMENTO E LAMINAÇÃO	63
3.4.1	Ciclo de reaquecimento Padrão para o aço 5120	63
3.4.2	Ciclo de reaquecimento A para o aço 5120	64
3.4.3	Ciclo de reaquecimento B para o aço 5120	65
3.4.4	Ciclo de reaquecimento C para o aço 5120	66
3.5	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	67
3.6	ENSAIOS METALOGRÁFICOS E ENSAIOS MECÂNICOS	68
3.6.1	Determinação do Tamanho de Grão	69
3.6.2	Ensaio mecânicos	69
3.6.2.1	Ensaio de dureza	69
3.6.2.2	Ensaio de Tração	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1	TAMANHO DE GRÃO	72
4.2	ENSAIO DE DUREZA (HB)	77
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO	79
4.3.1	Limite de Resistência (MPa)	79
4.3.2	Estricção	81
4.3.3	Alongamento	83
4.3.4	Limite de escoamento	85
4.4	CARGA DOS MOTORES (%)	87
4.5	PESO DE CAREPA FORMADO (KG)	88
4.6	DISCUSSÃO	89
5	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

Antes de se iniciar o processo de conformação, há a etapa de reaquecimento. Sua função principal é elevar a temperatura dos produtos semi-acabados (lingotes, tarugos ou placas), até que o material esteja suficientemente plástico e homogêneo para permitir a redução mecânica ao perfil desejado.

A laminação, em geral, apresenta custos bastante elevados quando comparado aos processos de conformação posteriores. O reaquecimento é a etapa de maior custo de um laminador, podendo chegar a 60 por cento do custo total. Além disso, por conceito de projeto, os fornos são o gargalo do processo de laminação. Assim, aumentar a capacidade produtiva de um laminador muitas vezes exige a otimização dos ciclos de reaquecimento.

Com a grande concorrência existente na indústria automobilística, a pressão por custos vem reduzindo bastante as margens de toda a cadeia: produtores de aço, autopeças e montadoras. As importações de aço, de autopeças ou mesmo as diferenças no custo de produção em diferentes locais do mundo vem fazendo com que diversos projetos de redução de custos sejam desenvolvidos na cadeia automotiva em geral. Por este motivo, os ciclos térmicos e os processos de conformação vêm sendo bastante estudados no intuito de aumentar produtividade via redução de tempos de ciclo, ou mesmo aumento do tamanho das cargas reaquecidas.

Deve ser considerado que a redução excessiva do tempo de reaquecimento pode gerar dificuldades no processo de conformação, defeitos superficiais e alteração nas propriedades mecânicas dos produtos laminados. Isso ocasiona excesso de manutenção dos equipamentos, recondicionamento das barras laminadas e não atendimento dos requisitos dos clientes.

A redução do tempo dos ciclos de reaquecimento também reduz a emissão de gases para o meio ambiente.

1.1 OBJETIVO

O objetivo da pesquisa foi realizar o estudo de diferentes ciclos de reaquecimento de aços SAE 5120 para laminação a quente. Espera-se obter um ganho de produtividade e consumo de combustível, reduzindo o tempo total de reaquecimento sem reduzir o

desempenho do material e nível de segurança operacional. Objetiva-se, também, manter as propriedades mecânicas e microestrutura do material na faixa aceitável pelos clientes.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica devido ao aumento da disputa da indústria mundial. As indústrias de base, como a siderúrgica e a automobilística buscam o aumento da competitividade. Com isso se tornou importantíssimo reduzir os custos de produção para manter o segmento sustentável economicamente e competitivo frente aos concorrentes. O reaquecimento é a etapa de maior custo da laminação, isso justifica a análise de ciclos de reaquecimento e a otimização dos mesmos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS LIGA

Os aços ligas, que podem conter até aproximadamente 50% dos elementos de liga, são definidos como aqueles aços que possuem propriedades melhoradas devido à presença de um ou mais elementos especiais. Também podem ser definidos pela presença de maiores concentrações de elementos, como manganês e silício, do que estaria normalmente presente nos aços de carbono simples. A principal classificação dos aços contendo elementos de liga é a seguinte: (CHIAVERINI, 2005)

- 1) liga SAE-AISI
- 2) de baixa liga de alta resistência
- 3) fase dupla
- 4) elétrico ou silicone
- 5) aço inoxidável
- 6) aço ferramenta de liga

Além disso, os aços são frequentemente classificados como resistentes ao calor se forem adequados para serviços de temperatura elevada.

De acordo com o *American Iron and Steel Institute* (AISI), a definição de uma liga de aço é a seguinte:

“Pelo costume comum, o aço é considerado como uma liga de aço quando o máximo da faixa dada para os elementos de liga excede um ou mais dos seguintes limites: manganês, 1,65%; silício, 0,60%; cobre, 0,60%; ou em que uma faixa definida ou uma quantidade mínima definida de qualquer um dos seguintes elementos é especificada ou solicitada dentro dos limites do campo reconhecido de aços de liga de construção. Alumínio, cromo até 3,9%, cobalto, nióbio, molibdênio, níquel, titânio, tungstênio, vanádio, zircônio ou qualquer outro elemento de liga adicionado para obter um efeito de liga desejado.”

A este respeito, deve-se notar que os aços contendo 4,00% ou mais de cromo devem ser classificados como aços inoxidáveis. Além disso, os seguintes elementos são

considerados incidentais quando suas concentrações caem abaixo dos níveis indicados: cobre, 0,35%; silicone, 0,35%; cromo, 0,2%, e molibdênio, 0,06%.

Os aços de liga foram padronizados e classificados em conjunto pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) e o AISI usando um código de quatro dígitos. O primeiro dígito indica o tipo de aço com o segundo dígito significando a porcentagem do elemento de liga predominante. Os dois últimos dígitos geralmente indicam o teor médio de carbono em “pontos” ou centésimos de um por cento. Este sistema de classificação é apresentado na listagem a seguir.

1. SAE 1XXX – aço-carbono simples
2. SAE 2XXX – aço-Níquel
3. SAE 3XXX – aço-Níquel-Cromo
4. SAE 4XXX – aço-Molibdênio
5. SAE 5XXX – aço-Cromo
6. SAE 6XXX – aço-Cromo-Vanádio
7. SAE 7XXX – aço-Cromo-Tungstênio
8. SAE 8XXX – aço-Níquel-Cromo-Molibdênio
9. SAE 92XX – aço-Silício-Manganês
10. SAE 93XX, 94XX, 97XX e 98XX – aço-Níquel-Cromo-Molibdênio

2.1.1 Família 51XX

Abaixo será apresentada a família SAE 51XX, que será estudada neste trabalho. Os aços dessa família são aços que tem como característica uma alta porcentagem de cromo em sua composição. A porcentagem de Cr varia de 0,80% a 1,10%. É mostrada na Figura 1 a composição química da família de aços 51XX.

Figura 1 - Composição química da família de aços 51XX.

Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
1,00 - 1,30	0,035	0,035	0,40	-	0,80 - 1,10	-

Fonte: Acovisa (2020).

2.1.1.1 SAE 5120

O aço SAE 5120, ou 20MnCr5, na norma DIN, é um aço de média temperabilidade, boa usinabilidade, boa soldabilidade e média resistência mecânica. Amplamente utilizado para cementação e posterior beneficiamento ligado ao manganês e cromo. Tipicamente é aplicado em eixos, pino guia, engrenagens, virabrequins, colunas, catracas, capas e anéis de engrenagem. É mostrado na Figura 2 os componentes produzidos pelo aço 5120. (CHIAVERINI, 2005)

Figura 2 - Componentes produzidos com aço SAE 5120.



Fonte: Thyssenkrupp (2020).

A composição química segue as faixas mostradas na Figura 3.

Figura 3 - Composição química do aço SAE 5120.

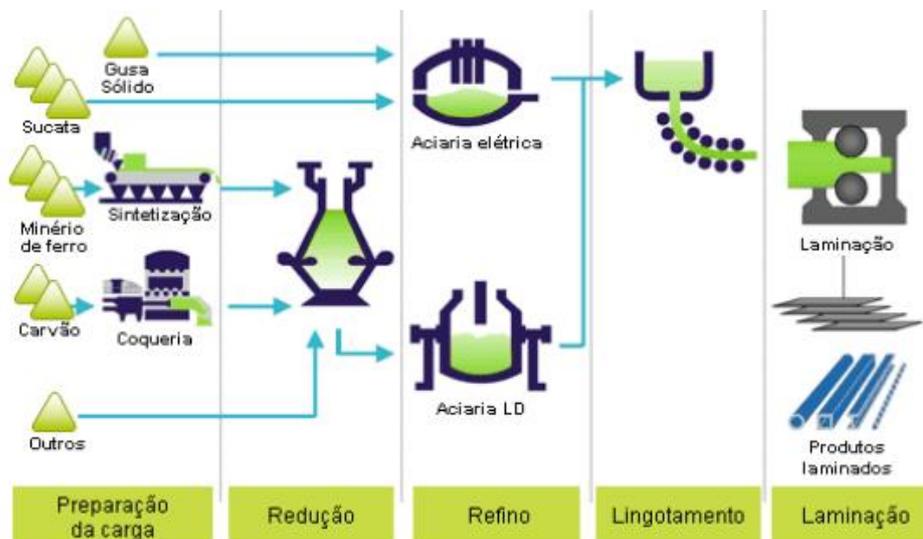
ABNT/SAE	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Ni	Cr	Mo
5120	0,17 - 0,22	1,10 - 1,40	0,035	0,035	0,40	-	1,00 - 1,30	-

Fonte: Favorit (2020).

2.2 CLASSIFICAÇÕES DE USINAS SIDERÚRGICAS

Classifica-se uma usina siderúrgica de acordo com seu processo produtivo, podendo ser integrada ou semi-integrada. A primeira opera com três processos principais: redução, refino e laminação. Partindo do minério de ferro e entregando produtos acabados de aço. As semi-integradas operam com os processos de refino e laminação. Partem de sucata metálica, ferro gusa ou ferro esponja para produzirem aço, que posteriormente será conformado. É mostrado na Figura 4 um fluxograma simplificado de produção em uma usina siderúrgica. (PLENTZ, 2009)

Figura 4 - Fluxograma simplificado de produção em uma usina siderúrgica.



Fonte: Acobrasil (2015).

Este trabalho foi realizado em uma usina semi-integrada.

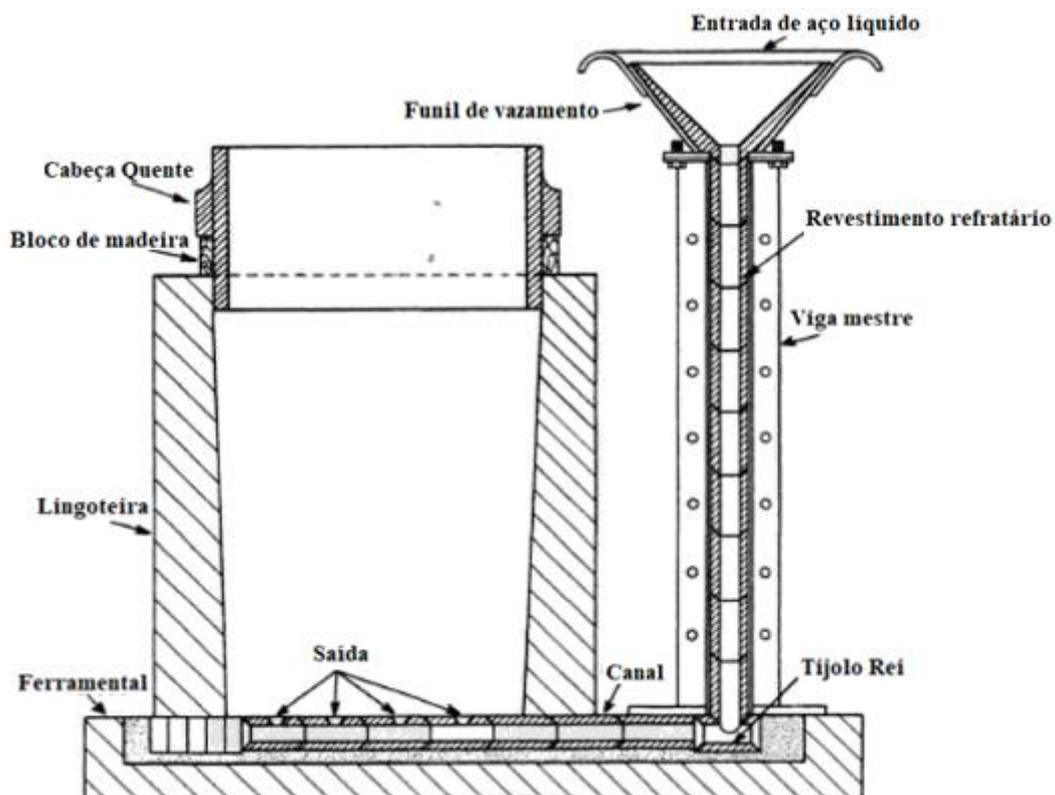
2.3 LINGOTAMENTO CONVENCIONAL

É o processo do qual o aço fundido é vazado da panela nos moldes de lingotes sob a ação da gravidade. Isso constitui o vazamento superior. A transferência do aço pode ser direta da panela para o molde ou indireta pelo uso de um recipiente de vazamento intermediário, como uma caixa de vazamento, cesta ou distribuidor. Embora mais caro que o método direto, este último oferece as seguintes vantagens: (BARTOLOMEU; BUCIUMEANU; PINTO; ALVES; CARVALHO; SILVA; MIRANDA, 2017)

- 1) melhor separação de inclusões não metálicas do metal fundido;
- 2) menos *splash* no molde;
- 3) melhor controle da taxa de vazamento;
- 4) diminuição da temperatura de vazamento.

Alternativamente, o aço pode ser vazado diretamente no molde ou forçado pelo fluxo gravitacional no fundo do molde usando o arranjo mostrado esquematicamente na Figura 5.

Figura 5 - Montagem esquemática para vazamento inferior.

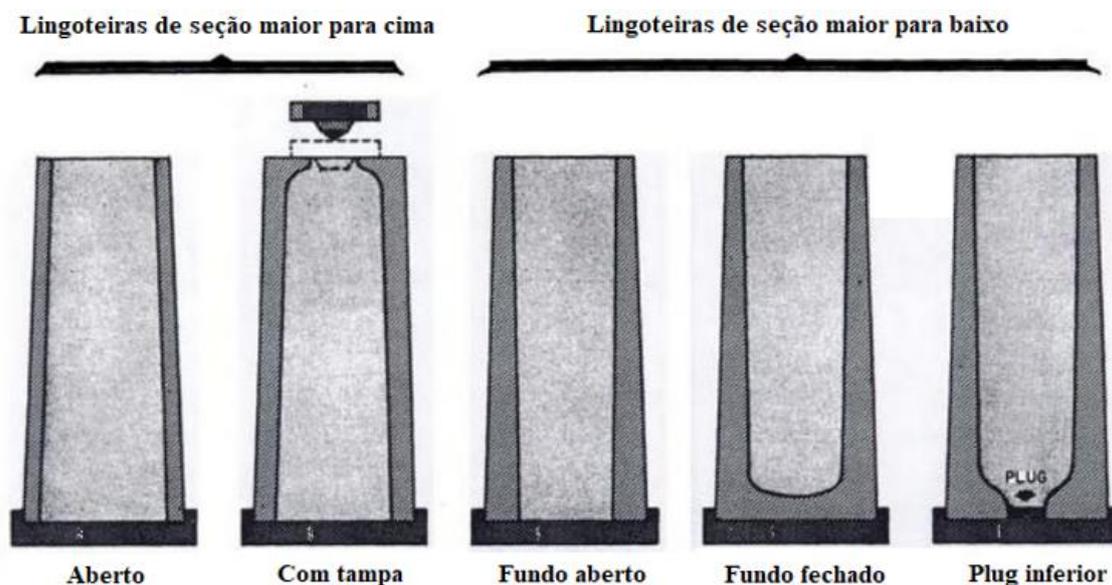


Fonte: Roberts (1983).

O aço líquido é vazado em um funil revestido com refratários e deixa-se fluir através de um corredor de refratários ocos, saindo em um ou mais moldes através de tijolos de saída. Este método, embora proporcionando melhor qualidade de superfície para certas classes de aço, também pode desenvolver mais inclusões devido ao aumento da exposição a refratários. (KEMP, 2017)

Os moldes para os lingotes, também chamados de lingoteiras, comumente são altos, de seção quadrada, feitos de ferro fundido e pesando um a um quarto de vezes o peso de aço vazado neles. As seções transversais verticais das lingoteiras geralmente são afuniladas para facilitar sua remoção dos lingotes (designados por "estripamento"). Conforme mostrado na Figura 6, existem dois tipos principais de lingoteiras, seção maior para baixo e seção maior para cima. As de seção maior para baixo são ainda classificadas como abertas e com tampa. Os de seção maior para cima como fundo aberto, fechado e *plug* inferior. (ROBERTS, 1983)

Figura 6 - Os cinco principais tipos de moldes para lingotes.

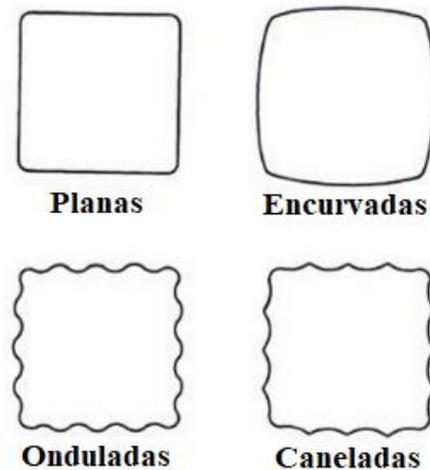


Fonte: Roberts (1983).

Conforme mostrado na Figura 7, as paredes internas dos moldes podem ser planas, curvadas, onduladas ou caneladas. O uso dos dois últimos tipos de paredes destina-se a minimizar a formação de trincas superficiais em alguns tipos de lingotes durante a

solidificação e o resfriamento, aumentando a espessura inicial da pele do lingote. (ROBERTS, 1983)

Figura 7 - Cortes transversais das principais formas de lingoteiras.



Fonte: Roberts (1983).

2.3.1 Estrutura bruta de solidificação no processo de lingotamento convencional.

Na fabricação de componentes pelo processo de fundição, os metais fundidos são vazados em moldes onde se solidificam. O molde possibilita a obtenção de uma forma acabada, conhecida como fundido. Em outros casos, o molde produz formas simples, chamadas de lingote. O lingote é um produto intermediário, que normalmente requer conformação plástica para se chegar a um produto acabado. A macroestrutura, às vezes denominada estrutura do lingote consiste em três regiões ou zonas: (ASKELAND, 2008)

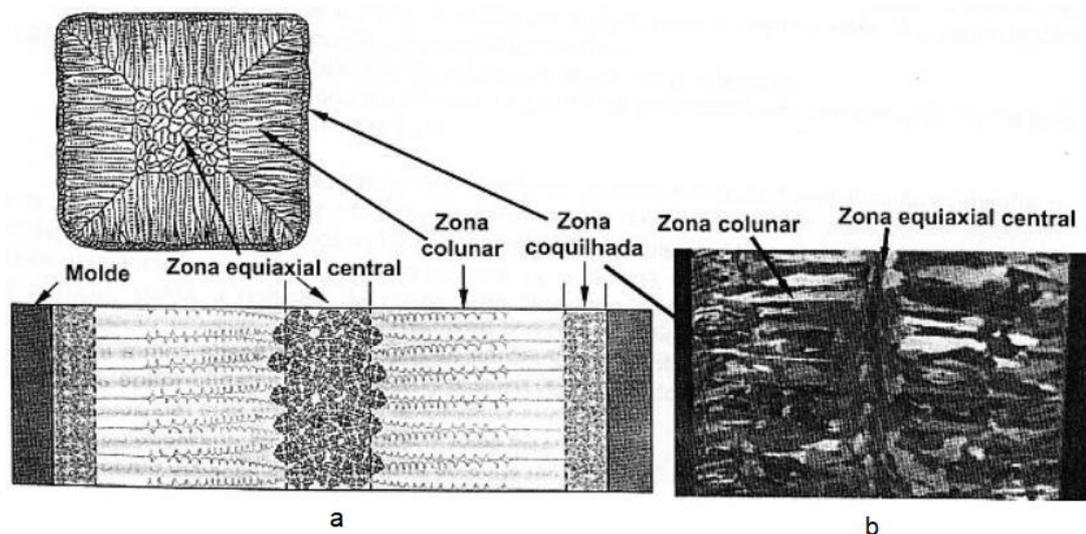
1 - Zona coquilhada: É uma faixa estreita de grãos orientados aleatoriamente na superfície do fundido. A parede do molde atua como substrato para a nucleação heterogênea. Dessa forma, o metal junto à parede do molde é a primeira região a resfriar até a temperatura de solidificação;

2 - Zona colunar: Contém grãos alongados orientados em uma dada direção cristalográfica. À medida que o calor é dissipado do fundido para o molde, os grãos na zona coquilhada crescem na direção oposta à do fluxo de calor, ou seja, crescem das áreas

mais frias para as mais quentes. Essa tendência normalmente significa que os grãos colunares crescem perpendicularmente à parede do molde;

3 - Zona equiaxial: Apesar do sólido continuar a crescer de uma forma colunar até que todo o líquido esteja solidificado, frequentemente é formada uma região com grãos equiaxiais no centro do lingote. A zona equiaxial contém grãos novos, orientados aleatoriamente, geralmente associados a uma temperatura de vazamento baixa, presença de elementos de liga ou agentes refinadores ou inoculadores de grãos. Também é possível que grãos pequenos ou dendritas se soltem da região coquilhada em razão de fortes correntes de convecção, que são criadas quando o fundido começa a resfriar. Esses fragmentos também atuam como locais para a nucleação heterogênea na região equiaxial. Esses grãos crescem com forma aproximadamente esférica ou equiaxial, sem uma orientação espacial específica, e barram o crescimento dos grãos colunares. A formação da zona equiaxial é um processo controlado pela nucleação e resulta num comportamento mecânico isotrópico que esta região apresenta. É ilustrado na Figura 8 as três regiões da macroestrutura de um lingote solidificado.

Figura 8 - a) Representação esquemática da variação do tipo de estrutura de um lingote solidificado; b) uma macroestrutura real.



Fonte: Rizzo (2005).

Normalmente, o tempo para que um lingote se solidifique (em um processo de lingotamento convencional industrial), é de aproximadamente 120 minutos o que proporcionará a formação de uma estrutura dendrítica com grandes espaçamentos.

2.4 PLACAS, BLOCOS E TARUGOS

Com base na sua forma geométrica, os produtos semi-acabados são geralmente classificados como placas, blocos e tarugos. Embora não estejam sujeitas a definições precisas, as distinções entre as três formas são feitas de acordo com a aparência geral, com base nas três dimensões lineares (comprimento, largura e espessura) e também pelo uso pretendido.

A distinção entre lingotes (*blooms*) e tarugos (*billets*) é baseada principalmente no tamanho, sendo os tarugos menores do que os lingotes na área da seção transversal, mas ambos tendo um comprimento várias vezes maior em sua dimensão transversal. A distinção entre lingotes e placas é principalmente uma das proporções dimensionais transversais, sendo os lingotes geralmente quadrados ou quase quadrados e as placas sendo retangulares com larguras superiores às suas espessuras. No entanto, existem muitas exceções e há designações especiais para produtos semi-acabados destinados a usos específicos. Por exemplo, qualquer material a ser laminado em uma chapa é chamado de placa, independentemente de suas dimensões. Da mesma forma, qualquer peça laminada em um laminador *Billet* é denominada tarugo, independentemente de sua forma ou tamanho, com a exceção de tarugos redondos (como tarugos de tubos). Em comprimentos curtos, os lingotes são frequentemente chamados de blocos ou *blanks*, e os lingotes especialmente formados para seções estruturais são chamados de *blanks*, independentemente do comprimento. (TSELIKOV; ZJUKIN, 1978)

As seções transversais típicas e as dimensões das placas, blocos e tarugos são ilustradas na Figura 9.

Figura 9 - Formas e tamanhos relativos de placas, blocos e tarugos.



PLACAS

Sempre retangulares.
Geralmente com espessura entre 50 e 230mm e 600 a 1500mm de largura.



BLOCOS

Quadrados ou ligeiramente retangulares.
Geralmente na faixa entre 150x150 a 300x300mm.



TARUGOS

Quadrados.
Geralmente na faixa entre 50x50 a 150x150mm.

Fonte: o autor.

Os três tipos de produtos semiacabados são obtidos principalmente por lingotamento contínuo ou lingotes laminados a quente em placas e blocos, com o laminador a mais para a formação dos tarugos. No entanto, alguns blocos e placas são produzidas por forjamento. (REED-HILL, 2008)

2.5 FORNOS DE REAQUECIMENTO

Um forno de reaquecimento pode ser definido com uma caixa de fogo, uma grande câmara onde entram peças frias ou mornas e saem peças quentes. Ele deve aquecer os produtos semiacabados, até que o material esteja suficientemente plástico para permitir a redução mecânica à dimensão desejada. (ARAUJO, 2005)

Além de lingotes uniformemente aquecidos, as condições devem ser repetitivas. Ou seja, repetibilidade é um parâmetro mais importante do que a própria temperatura. O

laminador pode ser ajustado para uma peça mais fria ou menos quente, mas não pode ser ajustado a cada peça ou a cada lote de peças.

Os fornos de reaquecimento são divididos em dois grupos principais: intermitentes e contínuos. (ARAUJO, 2005)

Os intermitentes são aqueles que o material a ser aquecido é carregado e permanece estacionário sobre a soleira até atingir a temperatura de laminação ou forjamento. Os contínuos possuem, em geral, várias zonas e o material é carregado em uma extremidade do forno e descarregado na outra. (ARAUJO, 2005)

2.5.1 Transferência de calor em fornos de reaquecimento

Em um forno de laminação 80% da energia que chega aos tarugos é proveniente da irradiação das chamas e dos gases (fumos ou produtos da combustão). Outros 15% são provenientes da radiação dos refratários das paredes e da abóbada e apenas 5% é calor convectivo devido ao movimento dos gases queimados até o canal dos fumos. (KEENER; BOGGS; BRIDGES, 1980)

Existem 3 mecanismos de transferência de calor agindo simultaneamente em um forno de reaquecimento: condução, convecção e irradiação.

2.5.1.1 Condução

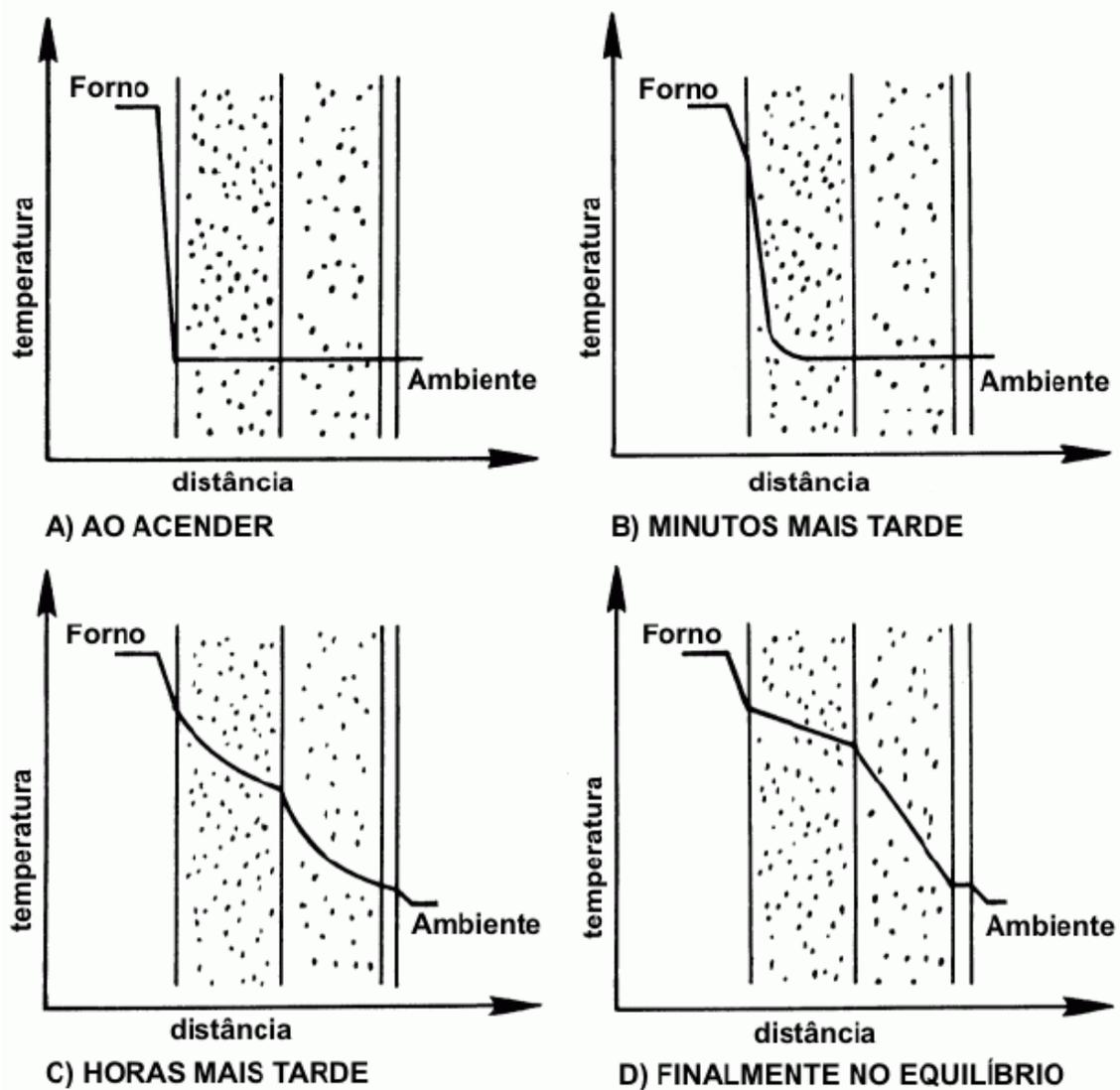
Pode ser definida como o calor transferido de uma molécula a outra de uma substância por contato íntimo. Este mecanismo é típico dos sólidos. O exemplo clássico é uma barra de aço que sendo aquecida apenas em uma ponta, depois de certo tempo a outra ponta também estará aquecida. (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2010)

A difusividade vai determinar o tempo, ou melhor, a velocidade com a qual o calor se desloca de uma ponta a outra. Já a diferença de temperatura entre as pontas será definida pela condutividade ou habilidade de um material conduzir calor. (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2010)

Um bom exemplo de condutividade e difusividade pode ser observado nas paredes refratárias de um forno. Os materiais refratários são maus condutores de calor, mas mesmo assim o conduzem. Como as paredes de um forno são espessas (400 a 500 mm),

o tempo para atingir o equilíbrio é de dias e não horas. Esse comportamento é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Comportamento da temperatura da parede refratária de um forno ao longo do tempo de início de aquecimento.



Fonte: Gerdau (2013).

A condução vai sempre definir o tempo de homogeneização ou tempo de encharque necessário para atingir a temperatura requerida na peça ao ser descarregada.

Tanto o tipo de aço como suas ligas afetam a condutibilidade e a difusividade, especialmente como a condutibilidade diminui com o teor de carbono, logo aumenta o tempo de encharque diminuindo a capacidade do forno.

2.5.1.2 Convecção

O calor transferido entre sólidos e fluidos leva o nome de convecção e pode ser entendido como uma combinação de uma condução de calor às moléculas próximas à superfície do sólido e o movimento destas moléculas do fluido afastando as moléculas aquecidas e apresentando novas moléculas mais frias. (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2010)

Na convecção natural, o ar quente mais próximo da superfície do sólido, torna-se mais leve e sobe, dando lugar a um ar mais frio. Isso cria uma corrente ascendente de ar quente.

Já na convecção forçada o ar é soprado por um ventilador ou pelo vento.

Como o coeficiente de transmissão de calor por convecção depende da velocidade, quanto maior essa velocidade maior será a troca térmica, logo a convecção forçada é muito mais eficiente do que a natural. (HAN; CHANG; HUH, 2011)

A turbulência no escoamento do fluido também aumenta a convecção.

Os fluidos tanto podem ser líquidos como gases e vapores, porém estes possuem uma baixa condutividade, logo um baixo coeficiente de convecção.

Os materiais isolantes são um bom exemplo da utilização do baixo coeficiente de convecção do ar para reduzir as perdas térmicas. São os poros ou os vazios de um material isolante os grandes responsáveis pelo seu baixo índice de perdas térmicas, como na fibra cerâmica, na fibra de vidro, etc. (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2010)

A temperatura da face externa de uma parede (face fria) é sempre uma temperatura de equilíbrio, ou seja, é aquela em que o fluxo térmico por condução através da parede é igual às perdas totais (convecção e radiação) pela face externa. Quanto mais alta esta temperatura da face fria maiores são as perdas, por isso uma maneira usual de definir a qualidade do isolamento de uma parede é estabelecer a temperatura máxima da face fria. Valores aceitáveis vão de 50 a 100°C. (KIN, 2007)

Apenas na região de entrada de um forno contínuo, denominada de zona convectiva ou zona sem queimadores a convecção apresenta alguma participação, sendo responsável por apenas 5% da transmissão total de calor para a carga.

Já nos recuperadores de calor colocados no canal de fumos, toda a troca térmica é por convecção, primeiro dos fumos para os tubos do trocador de calor e, depois, destes para o ar de combustão. (HAN; CHANG; HUH, 2011)

2.5.1.3 Radiação

O calor é uma das formas de radiação e sua transmissão pode ser entendida como uma transmissão de energia semelhante à da luz. No amplo espectro das radiações, a luz ocupa uma pequena faixa conhecida como espectro visível entre o ultravioleta e o infravermelho. (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2010)

Apesar de não ser visível, a radiação infravermelha, assim como a luz apresenta características muito próprias, tais como:

- Transmissão em linha reta, reflexão, sombra;
- Passagem pelo vácuo, pelo ar, por alguns gases e alguns líquidos e através de uns poucos sólidos (vidro, quartzo). (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2010)

O calor radiante pode ser facilmente percebido pela sensação de calor diante de uma placa aquecida ou pela exposição ao sol (que ilumina e aquece a Terra através do vácuo).

Assim, toda superfície ou corpo quente aquece outro corpo frio por radiação.

Quase a totalidade do aquecimento da carga de um forno de laminação é feita por radiação, ou seja, 95 %.

Destes 95%, a chama e gases representam 80% e os outros 15% são provenientes dos refratários da abóbada e das paredes. Vale salientar que os refratários também são inicialmente aquecidos por radiação da chama e dos gases e, subsequentemente, reirradiam grande parte deste calor para a carga. (KEENER; BOGGS; BRIDGES, 1980)

Esta radiação da camada de gases da combustão depende da espessura da camada e da sua composição (tipo de combustível empregado).

Já a radiação da chama depende da sua luminosidade que, por sua vez, depende de tipo de combustível empregado (mais ou menos carbono, mais ou menos hidrogênio).

A radiação das paredes e abóbada depende da temperatura que é sempre de 20 a 40°C inferior à da câmara do forno ou zona do forno (que é um misto da camada dos gases e chama).

As extremidades dos tarugos ou peças sempre apresentam um sobre aquecimento em relação ao restante da peça pois apresentam uma face lateral exposta à radiação e muito próxima da parede. (KRZYZANOWSKI; BEYNON; FARRUGIA, 2010)

2.5.2 Reaquecimento em lingotes

Em operações de laminação a quente, é desejável que a temperatura da peça de trabalho seja tão uniforme quanto possível. No entanto, quando os lingotes convencionais são estripados (ou removidos de seus moldes) dentro de um período razoável após o vazamento, suas temperaturas internas são ligeiramente superiores às suas temperaturas superficiais. A intenção original em relação aos fornos poço era ter o calor no lingote sozinho, trazendo o interior do poço e o exterior do lingote até a temperatura de laminação. No entanto, isso foi considerado impraticável, por isso os fornos poço normalmente possuem queimadores. Além disso, muitas vezes é necessário carregar lingotes frios nos fornos e, é claro, esses lingotes devem ser aquecidos antes de serem laminados. (YANUSHKEVICH; LUGOVSKAYA; BELYAKOV; KAIBYSHEV, 2016)

A quantidade de calor que deve ser aplicada a lingotes para elevá-los a temperaturas de laminação a quente depende do "*track time*" ou tempo entre o início do lingotamento do aço e o carregamento dos lingotes nos fornos poço. Idealmente, o local da estação estripamento deve ser tal que o tempo seja o mínimo entre a estripamento e a inserção dos lingotes nos fornos. Embora seja usual que os lingotes devam estar completamente solidificados durante o processo de reaquecimento, algumas usinas laminam lingotes que não estão com o núcleo completamente solidificado. Tal prática resulta em melhor homogeneidade das peças e grandes reduções no combustível consumido pelos fornos. (WICK, 1981)

A base interior do forno deve ser tal que não seja prejudicado pela carepa. Normalmente, eles são cobertos com Dunita que absorverá a carepa fundida e evitará a corrosão do fundo do forno. É mostrado na Figura 11 a análise química da Dunita utilizada.

Figura 11 - Análise química da Dunita.

Análise Química (%)		
MgO	≥ 28,0	30.40
SiO₂	≥ 34,0	53.05
Al₂O₃	< 6,00	2.30
Fe₂O₃	≤ 10,0	7.62
MnO	< 0,20	0.09
CaO	< 3,00	1.33

Fonte: o autor.

Uma série de defeitos de qualidade atribuíveis a condições nos fornos poços tornam-se evidentes durante a laminação a quente. Estes podem incluir temperaturas de lingote impróprias, aço queimado e captação de material de fundo de forno na base dos lingotes. (SKRYABIN; LIKHANOV, 2019)

2.5.3 Layout geral das instalações dos fornos poço

Os fornos poço estão fisicamente localizados entre as instalações da aciaria e laminação primária. Os poços são câmaras profundas de forma quadrada, retangular ou circular, nos quais os lingotes são colocados na posição vertical através de aberturas na parte superior dos fornos, que normalmente são fechadas por tampas removíveis. Geralmente são dispostos sob a tampas que se movimentam lateralmente e são posicionados próximos ao laminador desbastador. (TSELIKOV; ZJUKIN, 1978)

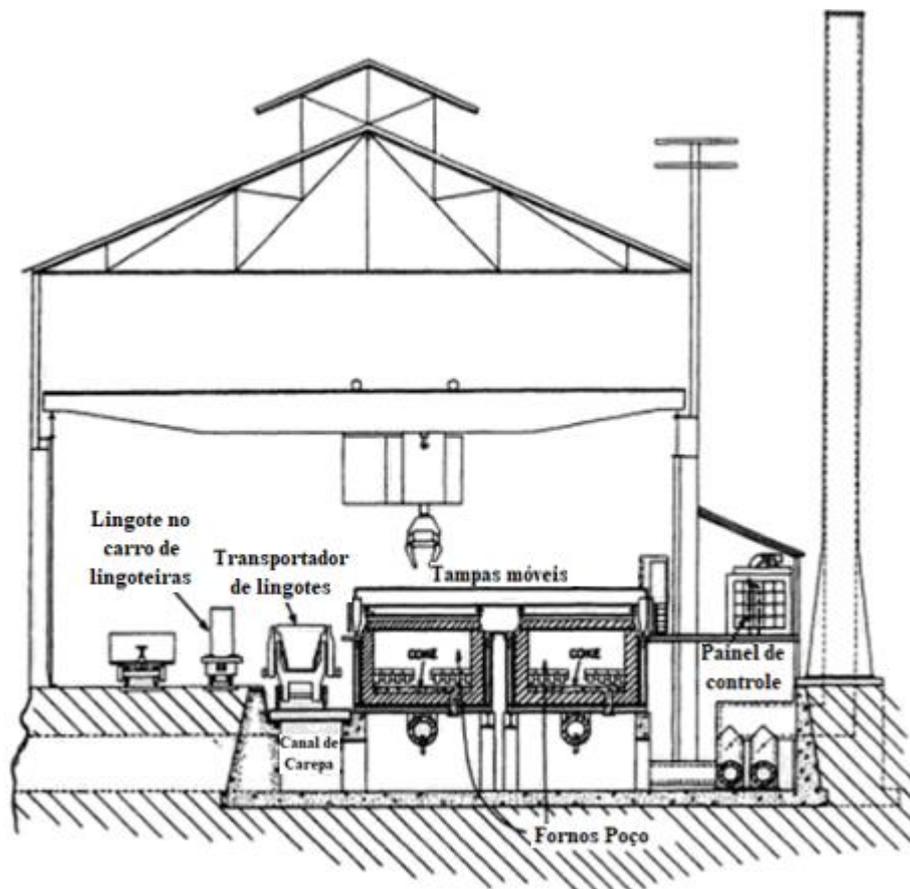
Ao lado dos poços há um ou mais trilhos para carros transportadores que transportam os lingotes removidos dos fornos para as mesas de entrada do laminador desbastador. Em alguns casos, esses trilhos fazem *looping* para permitir a operação unidirecional dos carros. Paralelamente aos trilhos há uma linha adicional que tem a finalidade de trazer os lingotes mais próximos dos fornos para que sejam carregados e descarregados.

O manuseio dos lingotes dentro e fora dos poços é realizado por uma ponte rolante equipada com pinças capazes de agarrar duas faces opostas do lingote, próximo a região do topo. (ROBERTS, 1983)

Associados a cada forno estão os queimadores, recuperadores ou regeneradores, combustíveis e controles necessários nas operações de aquecimento. Os porões são geralmente concebidos para a conveniência de manipulação de escória de poça, dunita para a forração do fundo dos fornos e para o armazenamento e movimento de cinzas, caixas de cinza e tijolos paletizados usando caminhões de elevação. (ROBERTS, 1983)

Uma seção transversal esquemática de um prédio típico com forno poço é ilustrada na Figura 12.

Figura 12 - Seção transversal esquemática de uma instalação com forno poço.



Fonte: Roberts (1983).

Uma variedade de combustíveis é utilizada para operar fornos poço convencionais, incluindo gás natural, gás de coqueria e gás de alto forno. Os valores caloríficos aproximados desses gases são dados na Tabela 1. Quando um gás com valor calorífico variável é usado juntamente com um gás de valor calorífico fixo, a proporção dos dois gases pode ser controlada por um microprocessador para produzir uma entrada térmica constante para os fornos.

Tabela 1 - Valor calorífico aproximado dos gases combustíveis.

Tipos de gás	Valor Calorífico [kJ/m ³]
Natural	39000
Coque	18000
Alto Forno	3300

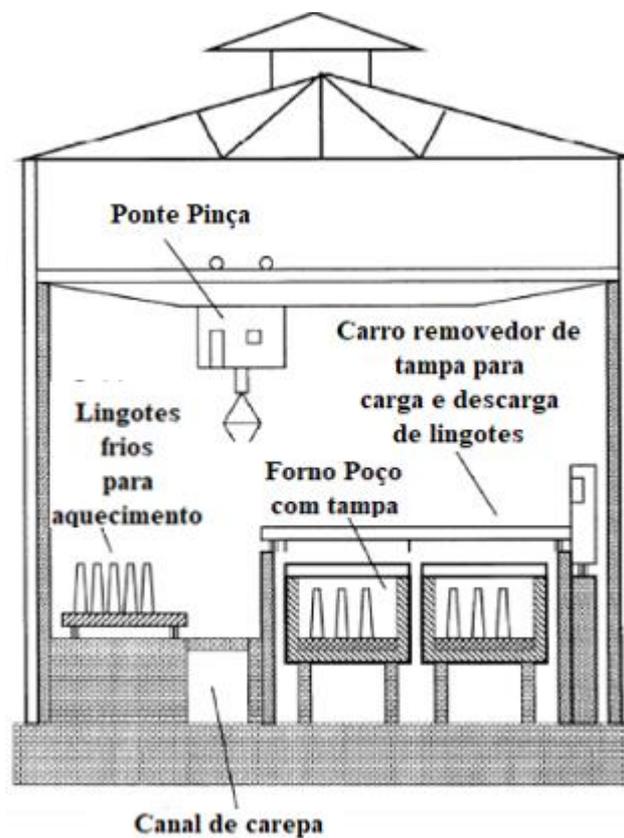
Fonte: O autor.

O valor calorífico do gás é importante para alcançar a temperatura de trabalho do forno de aproximadamente 1350°C e aproximadamente 1250°C no lingote. (WICK, 1981)

2.5.3.1 Projeto de um forno Poço

A forma do forno poço é como uma caixa com câmara profunda de secção transversal retangular com tampa móvel no topo. Os lingotes de aço são mantidos na câmara na posição de cima para a direita usando uma ponte sobre o topo depois de deslizar a tampa superior para abrir a posição. O forno geralmente é acionado por queimadores a gás. Os gases de combustão quentes são autorizados a sair da atmosfera depois de passar pelo trocador de calor (recuperador ou regenerador). A Figura 13 mostra um forno de poço de típico. (WICK, 1981)

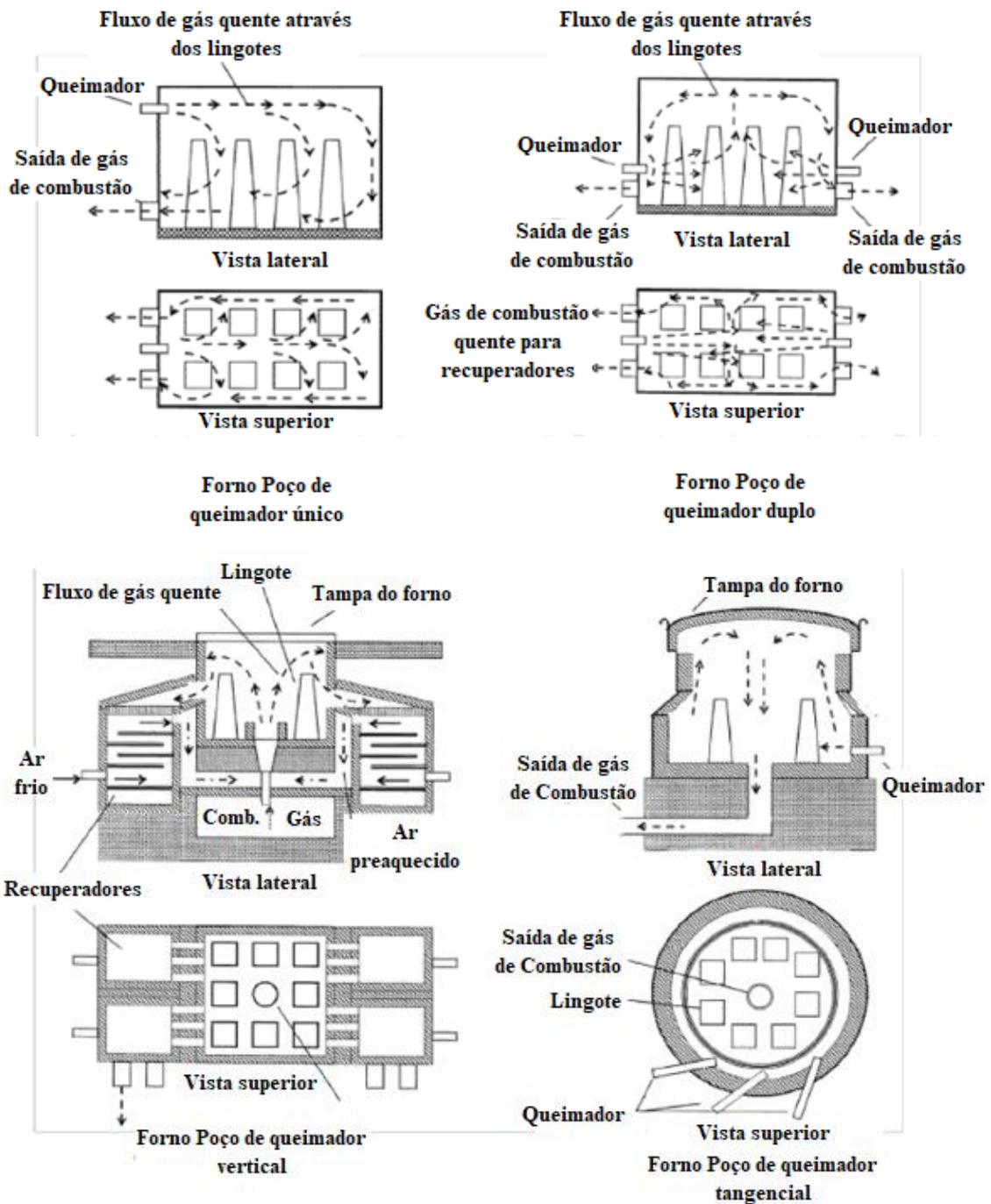
Figura 13 - Planta esquemática de um forno poço típico.



Fonte: Roberts (1983).

A localização do queimador varia de acordo com os tipos de fornos poço e tem o objetivo de proporcionar diferentes padrões de fluxo de gás, dando taxas de aquecimento variadas. Os diferentes locais do queimador são indicados em diferentes tipos de fornos poço, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Diferentes localizações de queimadores em fornos poço



Fonte: Roberts (1983).

Forno poço com queimador único (design antigo): neste projeto, os queimadores de gás estão localizados em uma das paredes curtas e os gases de combustão quentes saem por portas localizados na parede oposta. Este gás quente passa através do recuperador antes de sair para a atmosfera.

Forno poço com queimador único (design modificado): este é um design melhorado com sistema de recuperação. Neste forno, o espaço de combustão extra é proporcionado sobre os lingotes e os gases de combustão saem pelas portas localizadas na parede com queimadores. (GHADAMGAHI; OLUND; LUGNET; SAFFARI; YANG, 2014)

2.5.3.2 Refratário

Os requisitos dos refratários para uso em forno poço são definidos em função da resistência a erosão e à corrosão. A alta refratariedade é necessária para manter alta temperatura (1350°C) sob carga de lingotes, juntamente com a forte abrasão causada pelo posicionamento dos lingotes. O refratário também deve resistir à corrosão por carepa (óxido de ferro), particularmente na região inferior. A seção superior do forno poço e refratário da cobertura devem ser resistentes ao choque térmico submetido durante a operação de carregamento e descarregamento de lingotes. (KRZYZANOWSKI; BEYNON; FARRUGIA, 2010)

O tipo de refratário usado em cada uma das seções difere devido às seguintes condições de trabalho.

1 - A parede superior do forno poço requer tijolos de sílica ou semi-sílica para melhor resistência à fragmentação. O uso de tijolo refratário pode ser menos satisfatório.

2 - A região inferior das paredes precisa de tijolos básicos para resistir ao ataque de escória por queda de carepa (óxido de ferro). O tijolo de magnesita ($MgCO_3$) é comum na região inferior das paredes.

3 - O fundo do forno é feito com tijolos refratários, enquanto se utiliza uma espessa camada de Dunita como proteção a corrosão por queda de carepa (óxido de ferro). Em alguns casos, o fundo é feito usando-se magnesita, cromo-magnesita ou tijolos de alta alumina.

4 - Na tampa utiliza-se semi-sílica ou refratário monolítico.

2.5.3.3 Tipos de Forno Poço

Existem três tipos de forno poço. Fornos regenerativos, combustão contínua e elétricos.

Os fornos regenerativos, onde os lingotes são aquecidos pela queima do gás através de uma porta na parede lateral do forno, permitindo que os produtos da combustão passem

através do poço e saíam pelas tubulações do regenerador e escapem até a atmosfera. A direção da passagem de gás é periodicamente invertida. O ar, após cada inversão, é passado através do lado quente do regenerador para produzir calor para a combustão do combustível. A fim de melhor equalizar a temperatura do lingote, a prática de regulagem do queimador e do *dumper* é geralmente utilizada. (TSELIKOV; ZJUKIN; 1978)

Nos fornos de combustão contínua é fornecido um espaço suficiente para a combustão do combustível. Estes fornos são geralmente equipados com recuperadores. Podem ser de chama de sentido único, onde o espaço de combustão é localizado acima dos lingotes. O combustível é queimado horizontalmente e o fluxo de gás de combustão é vertical, de acordo com os princípios hidrostáticos. Em fornos de chama inferior centralizada, o combustível é queimado verticalmente através de uma porta, localizada centralmente no fundo do poço, em torno da qual os lingotes são colocados. (TSELIKOV; ZJUKIN; 1978)

Em poços circulares, a queima tangencial de combustível é empregada a partir de uma série de queimadores embutidos localizados na periferia inferior das paredes laterais inclinadas.

Nos poços de duplo queimador inferior, os queimadores estão localizados em paredes opostas, a cerca de 600 mm acima do fundo do poço, e as portas de gases residuais estão localizadas nas extremidades de cada um dos quatro cantos do poço. A combustão do combustível ocorre no centro do poço. Este método de aquecimento fornece turbulência ao fluxo de gases no poço, melhorando assim o aquecimento do fundo dos lingotes. Em poços de duplo queimador superior, o combustível é queimado em extremidades opostas em um espaço de combustão acima dos lingotes. Um movimento de redemoinho dos gases é fornecido colocando os queimadores para queimar horizontalmente, em um ângulo com a linha central do poço. (TSELIKOV; ZJUKIN; 1978)

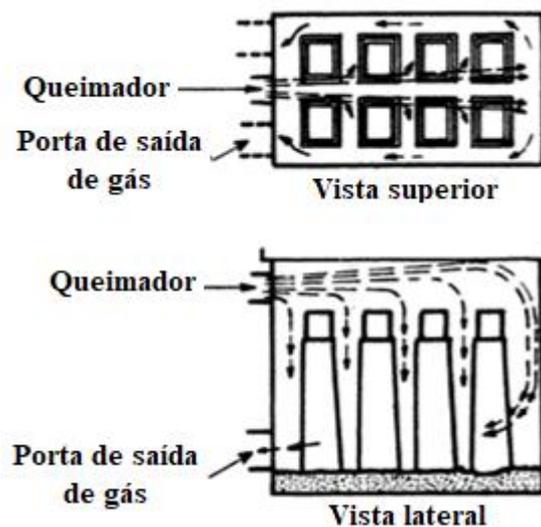
Por fim, os fornos poço elétricos, onde o próprio poço consiste em uma carcaça de aço retangular com um revestimento refratário e um isolamento, que formam uma unidade fechada. Os elementos de aquecimento percorrem todo o comprimento do poço. A energia é aplicada aos elementos de aquecimento por eletrodos, que são inseridos através de cada extremidade das paredes do poço. Os fornos poço elétricos permitem proporcionar um melhor controle da atmosfera do forno durante o aquecimento de lingotes de aço inoxidável e aços altamente ligados. (TSELIKOV; ZJUKIN; 1978)

2.5.3.3.1 Fornos poço de chama única

Tais fornos são projetados para chama contínua ou pulsante, sendo o espaço de combustão acima dos lingotes conforme ilustrado na Figura 12. A utilização de fornos deste tipo tornou-se muito popular porque, quando instalada em bancos de três ou quatro com as paredes em comum, dessa forma é possível aproveitar melhor o calor gerado pelos fornos. (ROBERTS, 1983)

Em algumas instalações, no entanto, cada poço é um forno separado, com uma bateria de poços (geralmente quatro). Embora esse tipo de construção represente um investimento de capital mais alto, o custo agregado é compensado pelo aumento da disponibilidade do poço devido a recondiçõamentos mais rápidos.

Figura 15 - Vista superior e lateral de um forno poço de chama única.



Fonte: Roberts (1983).

2.5.4 Objetivo do processo de reaquecimento

O aquecimento de lingotes e placas tem os seguintes propósitos:

- 1 - Formação de carepa para remoção de defeitos superficiais
- 2 - Facilitar a conformação do aço na laminação
- 3 - Fornecer uma temperatura inicial suficientemente alta, de modo que o processo de laminação ocorra na região de temperatura completamente austenítica.

4 - Dissolvendo (quando aplicável) carbonetos ou nitretos que devem ser precipitados em uma fase posterior de processamento. (GHADAMGAHI; OLUND; LUGNET; SAFFARI; YANG, 2014)

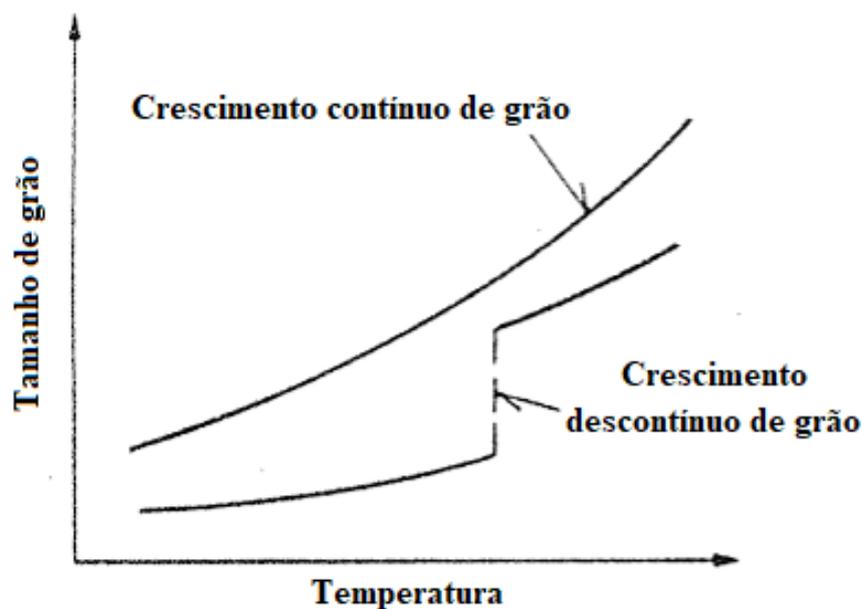
2.5.4.1 Requisitos para o processo de reaquecimento

Devido à sua natureza, o processo de reaquecimento produz o crescimento da estrutura austenítica com diâmetros de grãos na faixa de 100 a 1000 microns. No processo de crescimento de grãos, os grãos maiores aumentam e os menores tendem a desaparecer. (ADEBI; HANZAKI; LIU; XIN; HAGHDADI; HODGSON, 2017)

O crescimento do grão pode prosseguir com o aumento da temperatura de duas maneiras. Uma é o crescimento contínuo que é típico do aço carbono comum. A outra é o crescimento descontínuo, que é típico dos aços isolados com alumínio e microligados. (LINO, 2017)

Durante o processo de crescimento contínuo de grãos, há a ocorrência de granulação grosseira de aços C-Mn, entre 900 e 1200°C. É mostrado na Figura 16 os dois tipos de crescimento de grão durante o reaquecimento.

Figura 16 - Os dois tipos de crescimento de grão durante o processo de reaquecimento



Fonte: Roberts (1983).

Em caso de crescimento descontínuo de grãos, o processo é suprimido até uma determinada temperatura, após a qual ocorre um aumento repentino no tamanho dos grãos. Este crescimento de grão descontínuo também pode começar depois de manter o material na mesma temperatura durante períodos de tempo mais longos. A principal razão para o grão descontínuo é a supressão do movimento de contorno dos grãos pelos precipitados que são dissolvidos no aço. (QIN; LI; LIU; KANG; ZHU; SHU; PENG; SHE; MENG, 2019)

Os aços com elevado teor de vanádio geralmente resistem ao coalescimento apenas até 1000 a 1050°C. Aços que contêm nióbio resistem a formação de grãos grosseiros a temperaturas de até 1100 a 1150°C. O aço contendo uma dispersão fina e estável de titânio pode resistir aos grãos grosseiros a temperaturas acima de 1200°C. Outra característica do processo de aquecimento é o aumento não uniforme da temperatura dos lingotes ou placas. Isto é principalmente devido aos seguintes fatores: (SILVERIO, 2008)

- 1 - Penetração do calor da superfície do metal até o seu centro, que produz rápido aumento na temperatura da superfície, enquanto o centro da placa permanece frio
- 2 - Condições de aquecimento irregulares nas zonas em torno do lingote ou placa
- 3 - Maior relação superfície / volume em um volume unitário do lingote ou a camada superficial de suas bordas em comparação com sua porção média
- 4 - Dissipadores de calor para os dispositivos de suporte/apoio dos lingotes ou placas que produzem as chamadas “marcas de soleira”

No processo de laminação a quente de aços planos, os principais requisitos para o processo de aquecimento são: (SICILIANO; JONAS; 2000)

- 1 - Atingir a temperatura desejada do material que, para o aço carbono comum, é geralmente entre 1200 e 1320°C.
- 2 - Reduzindo o diferencial de temperatura entre a superfície e o centro para um nível desejado que pode ser tão baixo quanto 14°C para as placas de 250 mm de espessura
- 3 - Reduzindo o efeito das marcas de SOLEIRA.
- 4 - Evitar o superaquecimento (“lavagem”) da superfície da placa, a fim de reduzir o acúmulo de grãos, bem como a formação excessiva de carepa.
- 5 - Redução do consumo de energia para aquecimento.

2.5.5 Transferência de calor em lingotes.

O tempo de transferência de calor do lingote antes da laminação pode ser dividido nos três períodos de tempo seguintes:

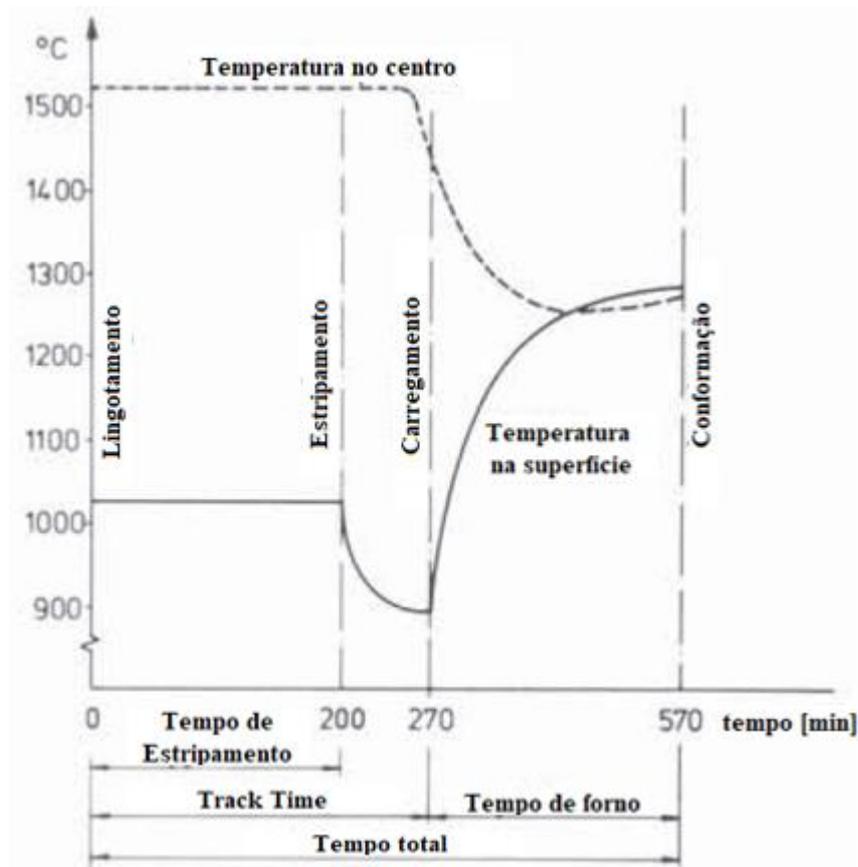
1 - Tempo de estripamento - Começa com o início da extração do lingote e termina após a remoção da lingoteira (estripamento). Este período de tempo inclui o tempo de transporte do lingote na lingoteira até a baía de estripamento e o tempo de remoção da lingoteira (estripamento).

2 - Tempo de carregamento (*track time*) - Começa no momento que o lingote está fora da lingoteira e aguarda para ser carregado no forno poço.

3 - Tempo de reaquecimento - Começa a partir do momento em que o lingote é colocado no forno poço. O objetivo do aquecimento é reduzir as diferenças de temperatura no lingote e atingir um nível de temperatura médio, de forma que o lingote possa ser laminado.

A Figura 17 mostra o comportamento da temperatura do lingote nos períodos entre a aciaria e laminação.

Figura 17 - Comportamento da temperatura do lingote nos períodos entre lingotamento e início de laminação.



Fonte: Wick (1981).

O perfil de temperatura ao longo da secção transversal do lingote no momento de carregamento no forno tem um gradiente de temperatura considerável. O centro é mais quente, estando entre 1400 e 1520°C e, às vezes, ainda é líquido. A temperatura cai para 800 a 1000°C na superfície. Este gradiente de temperatura extremo é removido no forno poço; o tempo de aquecimento no forno é escolhido de modo que, no final do período de aquecimento, o lingote tenha uma temperatura bastante uniforme ao longo de toda a secção transversal. (WICK, 1981)

Em usinas onde os fornos são distantes da aciaria, o track time tende a ser elevado. Com isso, a temperatura dos lingotes reduz consideravelmente. Nesses casos o tempo de reauecimento precisa ser maior.

Ao final do processo de reauecimento, a faixa de temperatura dos lingotes deve estar entre 1150 e 1300°C, dependendo das condições de laminação.

2.6 CONDICIONAMENTO POR ESCARFAGEM

No processo de escaufagem de superfícies de aço, o oxigênio é aplicado na superfície do aço quente, rapidamente oxidando-o e produzindo temperaturas nas quais o óxido é fundido e capaz de ser lavado. No início da operação, um gás combustível é queimado para pré-aquecer uma parte da superfície até a temperatura necessária para a oxidação ou, alternativamente, uma pequena haste pode ser estendida para dentro da chama para que funda o metal na superfície da peça em processo. A pressão do gás sopra o óxido fundido para longe da área que está sendo escaufada. (LESLIE, 1982)

Máquinas com quatro unidades de escaufe são as mais utilizadas devido ao condicionamento simultâneo de todos os lados de peças frias e quentes, ambas lingotadas e laminadas convencionalmente.

Economicamente pode não ser viável remover todos os defeitos através do uso de um passe completo em toda a superfície, conseqüentemente, os defeitos remanescentes são removidos por uma operação secundária de escaufagem manual. (LESLIE, 1982)

2.7 LEITO DE RESFRIAMENTO

O leito de resfriamento é projetado para receber, transferir e resfriar o material laminado. Ele é dimensionado para que o produto esfrie dentro de um tempo de ciclo específico. A largura de um leito de resfriamento é determinada com base na produtividade do laminador (toneladas/hora) e no tempo necessário para o resfriamento. (HISSANAGA, 2013)

O leito de resfriamento do tipo Pente Móvel é constituído por dois conjuntos de pentes, um móvel e um fixo, para transportar as barras pelo leito. O pente faz o movimento de levantar, avançar e abaixar várias vezes, mudando o ponto de contato com as barras, permitindo que todo o comprimento das barras esfrie na mesma taxa. É mostrado na Figura 18 um leito de resfriamento desse tipo. (GOME, 2012)

Figura 18 - Leito de resfriamento do tipo Pente Móvel.



Fonte: Clmachinerycn (2020).

2.8 PROCESSO PRODUTIVO

2.8.1 Fusão e preparo do aço

A aciaria de aços especiais da usina onde foram realizados os testes possui a configuração semelhante à mostrada na Figura 19.

Figura 19 - *Layout* de uma aciaria de aços especiais



Fonte: Gerdau (2013).

A partir da sucata recebida no Pátio de Sucatas, inicia-se a separação desse material por tipo e tamanho.

Essa sucata, somada a elementos de liga e ao ferro gusa, abastece um compartimento chamado de Cestão que por sua vez abastece o forno elétrico a arco.

No forno a carga é totalmente fundida, ocorrendo o refino primário e, posteriormente, o vazamento em uma panela. Esta panela é carregada por uma ponte rolante até o Forno Panela, onde ocorrerá o refino secundário, ajustando a composição química do aço. Na sequência é realizada a desgaseificação a vácuo.

Com a finalização da etapa de refino secundário, a panela com aço líquido é enviada a área de lingotamento contínuo. Nela as lingoteiras, canais e placas refratárias são previamente preparadas e montadas em um vagão. Em seguida o vagão é posicionado próximo ao carro lingotador que irá receber a panela com aço líquido e se inicia o processo de lingotamento convencional. É mostrado na Figura 20 o início do processo de lingotamento convencional.

Figura 20 - Início do processo de lingotamento convencional.



Fonte: o autor.

Após o lingotamento, espera-se finalizar o processo de solidificação dos lingotes que seguirão para o processo de estripamento e montagem no vagão para transporte até o

prédio da laminação. É mostrado na Figura 21 as lingoteiras com aço após o processo de solidificação.

Figura 21 - Lingoteiras com aço após o processo de solidificação.



Fonte: o autor.

2.8.2 Reaquecimento e laminação

A laminação de aços especiais da usina onde foram realizados os testes possui a configuração semelhante à mostrada na Figura 22.

Figura 22 - Layout do laminador de perfis pesados



Fonte: Gerdau (2013).

Os lingotes chegam no galpão do forno dentro das lingoteiras montadas em vagões, sendo 8 lingoteiras por vagão.

Com uma ponte rolante do tipo pinça, os lingotes são colocados em um dos fornos.

Na sequência é iniciado o ciclo de aquecimento. Este ciclo possui duas principais etapas, aquecimento e encharque. A primeira é uma rampa, com taxa de aquecimento constante e, por questões de qualidade do produto, limitada em um valor máximo. A segunda ocorre quando o forno alcança a temperatura desejada e a mantém por um determinado período de tempo.

Passado o tempo de ciclo, a ponte pinça retira o lingote do forno e o deposita em uma mesa de rolos que dá acesso a uma balança, que tem a função de registrar o peso do material que entra. É mostrado na Figura 23 o processo de retirada de lingotes do forno.

Figura 23 - Desenformamento de lingotes no forno poço.



Fonte: o autor.

Avançando a mesa de rolos há um laminador desbastador do tipo *Bloom*, nele os lingotes sofrem a primeira sequência de reduções e são transformados em blocos de transferência de seção quadrada. É mostrado na Figura 24 a conformação de um lingote no laminador desbastador.

Figura 24 - Conformação de lingote no laminador desbastador



Fonte: o autor.

Os blocos avançam e passam pelo processo de escarrafagem, removendo parte da superfície do material e eliminando os defeitos superficiais oriundos do processo de lingotamento. É mostrado na Figura 25 o processo de escarrafagem de um bloco.

Figura 25 - Escarfagem de bloco.



Fonte: o autor.

As extremidades dos blocos são cortadas na tesoura de corte a quente, com o objetivo evitar que as pontas se abram no processo de laminação posterior. É mostrado na Figura 26 o processo de corte na tesoura.

Figura 26 - Corte das extremidades do bloco escarificado.



Fonte: o autor.

Após o corte, os blocos, já preparados, passam por uma mesa de transferência e iniciam o processo de laminação no laminador acabador do tipo *Billet*. Nesta etapa do processo tem-se as características dimensionais finais do produto. Estas características são monitoradas através de um equipamento medidor de dimensional em tempo real. É mostrado na Figura 27 o processo de conformação no laminador acabador.

Figura 27 - Conformação do bloco no laminador acabador.



Fonte: o autor.

Posteriormente o material é cortado em barras de comprimento pré-determinado pelo cliente. O corte é realizado à quente por uma serra metálica de disco. É mostrado na Figura 28 o processo de corte na serra.

Figura 28 - Corte das barras laminadas.

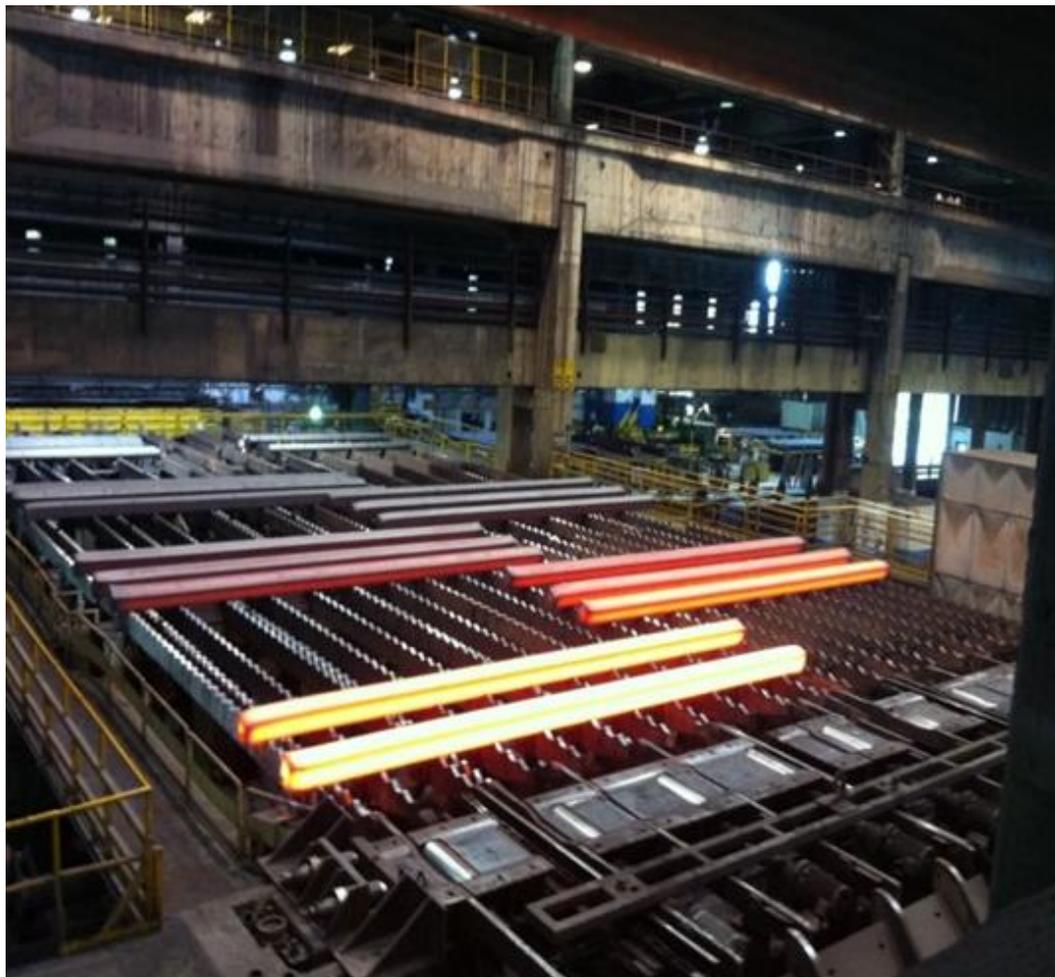


Fonte: o autor.

Cada barra recebe em seu topo o estampo de um número de identificação, para manter a rastreabilidade do produto.

Por fim, as peças são enviadas para um leito de resfriamento, onde irão perder temperatura de maneira uniforme e serão enviadas para a área de inspeção e acabamento. É mostrado na Figura 29 o processo de resfriamento das barras laminadas.

Figura 29 - Resfriamento das barras laminadas.



Fonte: o autor.

2.8.3 Inspeção e acabamento

Após resfriarem no leito de resfriamento, as barras laminadas são retiradas por uma ponte rolante com eletroímãs e alocadas em berços de estocagem. O material é estocado em pilhas a uma temperatura de aproximadamente 400°C e leva cerca de 72 horas para chegar a temperatura ambiente.

Quando as barras estão totalmente resfriadas, inicia-se o processo de inspeção em equipamento de partículas magnéticas. Neste equipamento as barras são depositadas em uma mesa de entrada, recebem um banho de particulado. Na sequência são expostas a luz ultravioleta (comprimento de onda de 365 +/- 5nm), que revela as discontinuidades superficiais. Elas são marcadas com giz industrial para posterior retrabalho. Nas corridas

testadas não houve aumento na média de defeitos encontrados por barra. É mostrado na Figura 30 o processo de inspeção por partículas magnéticas.

Figura 30 - Processo de de inspeção por partículas magnéticas.



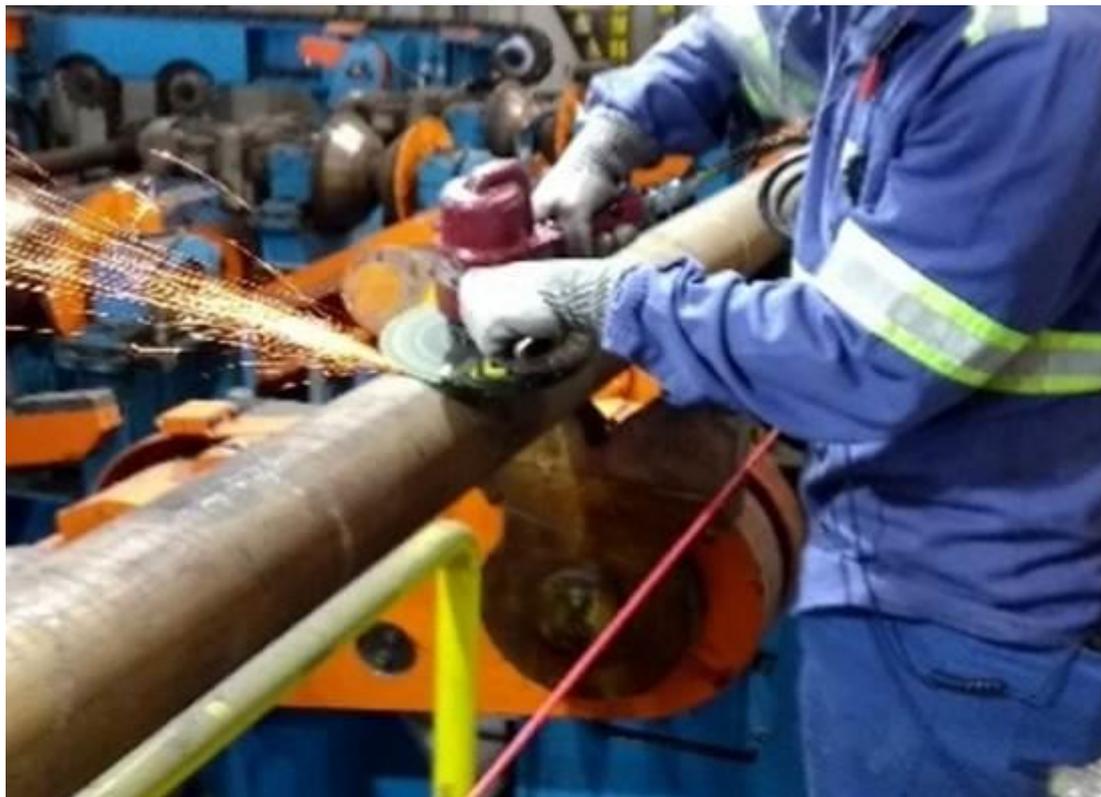
Fonte: o autor.

Depois de marcadas, as barras partem para as mesas de inspeção, onde ficam dispostas lado a lado para ensaio de ultrassom e ensaio de fagulha para verificação de segregação de carbono acima do permitido.

Caso o ensaio de ultrassom encontre alguma região com defeitos como vazios internos e falta de compactação de núcleo, a região é cortada em serra de disco e descartada. O mesmo vale para regiões que apresentem segregação acima do especificado. Em nenhuma das corridas testadas foram encontradas indicações nos ensaios de ultrassom e segregação.

Em seguida é realizada a inspeção visual e remoção dos defeitos superficiais com esmeril manual, juntamente com a remoção das rebarbas das extremidades das barras. É mostrada na Figura 31 a atividade de remoção de defeito superficial.

Figura 31 - Remoção de defeito superficial.



Fonte: o autor.

Após a finalização das atividades de retrabalho, o inspetor de qualidade realiza a inspeção final e avaliação da qualidade da recuperação. É mostrado na Figura 32 a barra após a remoção dos defeitos superficiais.

Figura 32 - Barra após a remoção dos defeitos superficiais.



Fonte: o autor.

Por fim, o material é embalado, pesado e liberado para transporte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesse trabalho foram amostras de barras de aço laminadas a quente em um laminador para aços especiais de perfis pesados.

Foi escolhido um único tipo de aço para este trabalho, o aço SAE 5120.

Coletou-se 1 amostra de cada uma das 20 corridas para que fosse possível realizar a análise de 7 amostras na condição padrão, 7 na condição com redução de 90 minutos do tempo de encharque (ciclo A), 3 na condição com redução de 140 minutos do tempo de encharque (ciclo B) e 3 na condição de 300 minutos de excesso de tempo de encharque (ciclo C).

Devido à grande variedade de produtos produzidos pela usina do qual foram coletadas as amostras o diâmetro das amostras foi fixado em 76,20 mm, em uma barra de perfil redondo.

A diferença de diâmetro entre as diferentes amostras é de no máximo 1,50mm e não irá interferir nas análises, pois é uma diferença pequena para o tipo de processo e produto estudado. Não haverá interferência em relação aos resultados de resistência mecânica, pois estas serão feitas a partir de corpos de prova padrão.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram vazadas corridas de mesma composição química, com as faixas de composição dentro do especificado pela norma SAE.

Todas as corridas foram produzidas com a mesma faixa de parâmetros de processo.

As porcentagens de cada tipo de sucata utilizada nas corridas foram semelhantes e dentro das faixas permitidas.

Os parâmetros de forno elétrico, forno panela e vácuo estavam dentro dos padrões especificados pelo processo.

No lingotamento foram utilizadas as mesmas faixas de temperaturas e mesma vazão da válvula gaveta. Foram utilizados os mesmos formatos de lingoteiras, garantindo o mesmo dimensional dos lingotes.

O estripamento e envio dos lingotes levaram a mesma faixa de tempo, garantindo o parâmetro denominado de *Track Time* ou tempo de carregamento. Este é o tempo entre o início do lingotamento e final do enformamento do último lingote.

Foram testados 17 lingotes de cada corrida, sendo o peso do lingote de 4200kg, podendo variar 5%. Esta é a quantidade suportada por cada forno.

As amostras dos aços da família 5120 utilizadas para os testes de variação do tempo de ciclo térmico foram obtidas a partir de lingotes através de lingotamento convencional, com seção quadrada média de 536 mm e peso médio de 4200kg para laminação em barras redondas, a partir de laminação a quente. A bitola final de laminação foi de 76,20mm, podendo variar 1mm para mais ou 1mm para menos.

Para desenvolver a análise da influência dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas deste aço, foi realizada a laminação de 20 corridas, que geraram um total de 340 lingotes que após laminação resfriaram ao tempo. Após o processamento de cada corrida, os dados de temperatura e tempos de ciclo foram extraídos dos sistemas supervisórios.

Foram utilizados somente os fornos Ishikawagima de numeração par, por possuírem queimadores mais modernos e de maior eficiência térmica.

Os fornos apresentavam condições de estrutura, refratários e instrumentação semelhantes.

Parâmetros de processo do forno, como tempo de enformamento, taxa de aquecimento, temperatura de encharque e tempo de desenformamento, foram os mesmos.

Foram produzidas 7 corridas na condição padrão de reaquecimento, objetivando-se 200 minutos de tempo de curva de aquecimento e 300 minutos de tempo de encharque.

Em função das condições físicas dos fornos, como refratários e estrutura mecânica, existe uma pequena variação no tempo que pode chegar a 10 minutos.

Como o enformamento, desenformamento e alimentação da linha de laminação é feita por uma única ponte rolante, é comum ter variações no tempo de encharque que podem chegar a 15 minutos.

Estes valores são considerados aceitáveis em função das características do processo.

As corridas testadas foram nomeadas, hipoteticamente, com letras do alfabeto.

Outras 7 corridas foram colocadas em condição de teste, alterando-se somente o tempo de encharque para 210 minutos.

Posteriormente dois testes foram realizados, em condições mais extremas, para avaliação do comportamento do processo e propriedades mecânicas.

O primeiro foi realizado o teste com um tempo de encharque de 160 minutos.

O segundo encharcou durante 600 minutos.

Os parâmetros objetivados em cada uma das corridas são mostrados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo Padrão.

Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque [°C]
1	Padrão	17	200	300	500	1280
2	Padrão	17	200	300	500	1280
3	Padrão	17	200	300	500	1280
4	Padrão	17	200	300	500	1280
5	Padrão	17	200	300	500	1280
6	Padrão	17	200	300	500	1280
7	Padrão	17	200	300	500	1280

Fonte: o autor.

Tabela 3 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo A.

Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque [°C]
8	A	17	200	210	410	1280
9	A	17	200	210	410	1280
10	A	17	200	210	410	1280
11	A	17	200	210	410	1280
12	A	17	200	210	410	1280
13	A	17	200	210	410	1280
14	A	17	200	210	410	1280

Fonte: o autor.

Tabela 4 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo B.

Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque [°C]
15	B	17	200	160	360	1280
16	B	17	200	160	360	1280
17	B	17	200	160	360	1280

Fonte: o autor.

Tabela 5 - Parâmetros de processo objetivados para cada uma das corridas no ciclo C.

Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque [°C]
18	C	17	200	600	800	1280
19	C	17	200	600	800	1280
20	C	17	200	600	800	1280

Fonte: o autor.

No processo de laminação foi utilizado o mesmo ferramental e conjuntos de cilindros nos laminadores *Bloom* e *Billet*.

Durante a produção dos materiais testados, a linha de laminação estava limpa e sem qualquer ponto gerasse defeitos superficiais que pudessem influenciar na caracterização de defeitos dos produtos acabados.

Foram mantidos todos os parâmetros do processo de escarfigem, como pressão de ar, gás e velocidade de avanço da mesa de rolos.

Foram realizados descartes intermediários das extremidades do bloco de transferência, eliminando qualquer defeito de forma, como “boca de jacaré”, que pudesse ocasionar redução de ritmo do processo de conformação ou danos físicos aos cilindros do laminador acabador.

O posicionamento e velocidade da mesa de transferência da escarfigem ao laminador *Billet* foi o mesmo para todos os materiais testados.

A velocidade de laminação no *Billet* se manteve em todos os casos, utilizando-se também o mesmo plano de reduções, garantindo, dessa forma, a mesma taxa de conformação.

As cargas dos motores foram obtidas nos sistemas de monitoramento dos laminadores.

Após a barra ter atingido o diâmetro de 76,20mm, descartaram-se as duas extremidades da barra, equivalentes a cabeça e pé do lingote para que evitassem amostras com maior quantidade de segregação de carbono. Em seguida realizou-se o corte em barras menores, de comprimento especificado pelo cliente.

As barras menores foram enviadas ao leito de resfriamento, onde foi mantido o mesmo avanço e espaçamento entre barras, garantindo a mesma condição de resfriamento para todas as barras do teste.

Para realização dos ensaios mecânicos e metalografia, durante o processo de inspeção, foi retirada uma amostra de cada corrida. Essas amostras foram cortadas com 500mm, em serra de fita, a temperatura ambiente e identificadas para envio ao laboratório metalúrgico.

Foram evitados os 6 primeiros e 6 últimos lingotes de cada corrida, a fim de se evitar influências de início e final de processo. Da mesma forma, a primeira e última barra do lingote foi descartada do processo de amostragem, visto que um lingote origina várias barras.

3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

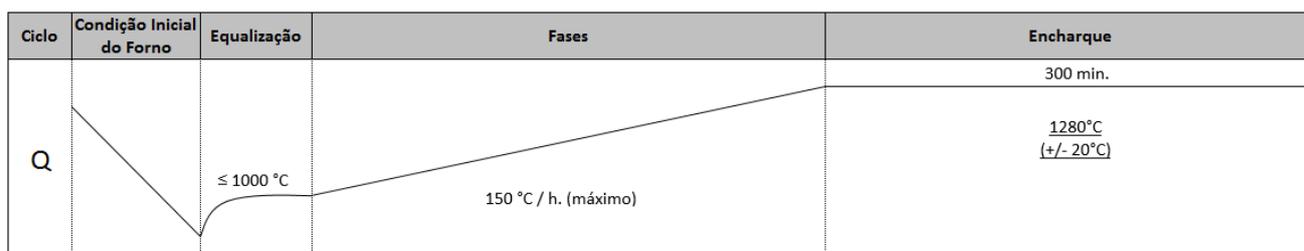
O experimento é descrito de acordo com as seguintes etapas: reaquecimento e laminação (3.4), planejamento do experimento (3.5) e ensaios metalográficos e ensaios mecânicos (3.6).

3.4 REAQUECIMENTO E LAMINAÇÃO

3.4.1 Ciclo de reaquecimento Padrão para o aço 5120

Foram produzidas 7 corridas na condição padrão de reaquecimento, objetivando-se 200 minutos de tempo de curva de aquecimento e 300 minutos de tempo de encharque. O ciclo térmico é apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Ciclo de reaquecimento padrão utilizado para o aço 5120 enornado a quente.



Fonte: o autor.

Os dados específicos de cada corrida, com suas médias e desvios padrão, são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição Padrão.

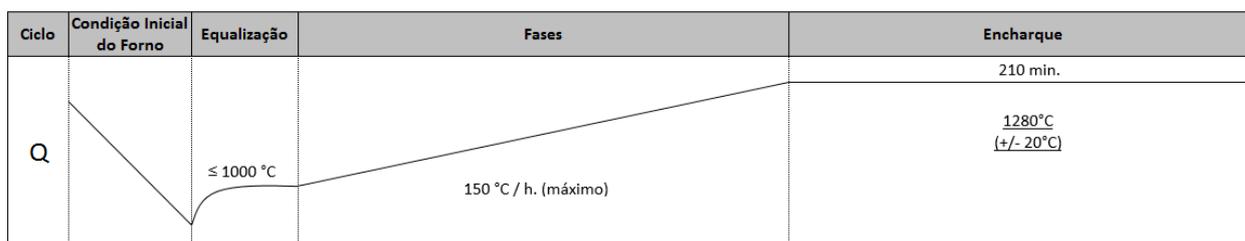
Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque[°C]
1	Padrão	17	200	310	510	1280
2	Padrão	17	205	305	510	1280
3	Padrão	17	200	305	505	1280
4	Padrão	17	210	305	515	1280
5	Padrão	17	210	300	510	1280
6	Padrão	17	200	305	505	1280
7	Padrão	17	205	300	505	1280

Fonte: o autor.

3.4.2 Ciclo de reaquecimento A para o aço 5120

Foram produzidas outras 7 corridas na condição de teste, alterando-se somente o tempo de encharque para 210 minutos. O ciclo térmico é apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Ciclo de reaquecimento A utilizado para o aço 5120 enforado a quente.



Fonte: o autor.

Os dados específicos de cada corrida, com suas médias e desvios padrão, são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição A.

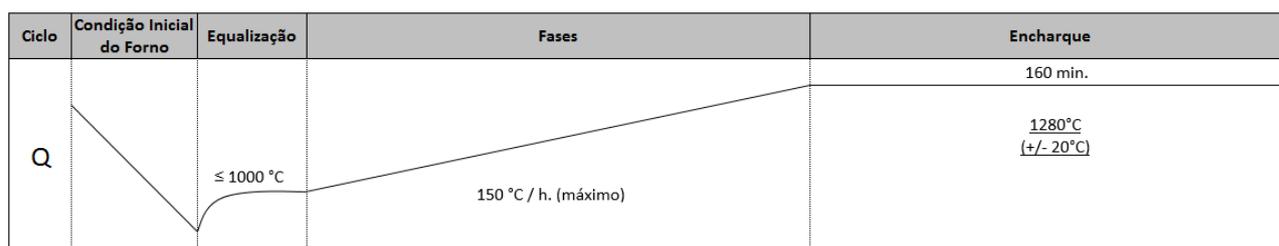
Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque[°C]
8	A	17	205	210	415	1280
9	A	17	205	215	420	1280
10	A	17	200	220	420	1280
11	A	17	210	210	420	1280
12	A	17	200	210	410	1280
13	A	17	205	215	420	1280
14	A	17	200	210	410	1280

Fonte: o autor.

3.4.3 Ciclo de reaquecimento B para o aço 5120

Foram produzidas outras 3 corridas que foram colocadas em condição de B, onde se mantiveram os tempos de aquecimento, mas reduziu se o tempo de encharque consideravelmente, passando para 160 minutos. O ciclo térmico é apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Ciclo de reaquecimento B utilizado para o aço 5120 enornado a quente.



Fonte: o autor.

Os dados específicos de cada corrida, com suas médias e desvios padrão, são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição B.

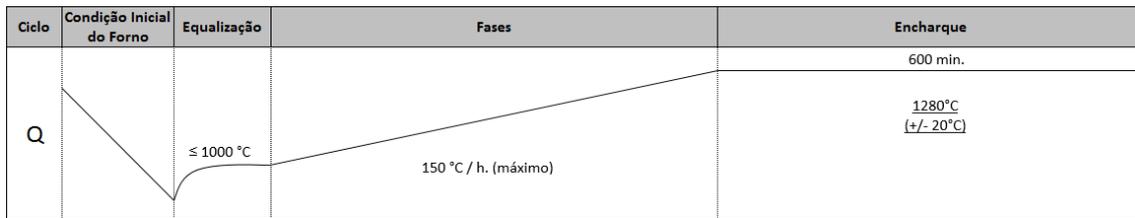
Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque[°C]
15	B	17	205	160	365	1280
16	B	17	200	165	365	1280
17	B	17	200	160	360	1280

Fonte: o autor.

3.4.4 Ciclo de reaquecimento C para o aço 5120

Por fim, foram produzidas 3 corridas colocadas em condição de C, onde se mantiveram os tempos de aquecimento, mas aumentou se o tempo de encharque consideravelmente, objetivando em 600 minutos. O ciclo térmico é apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Ciclo de reaquecimento C utilizado para o aço 5120 enornado a quente.



Fonte: o autor.

Os dados específicos de cada corrida, com suas médias e desvios padrão, são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de processo realizados para cada uma das corridas na condição C.

Ordem de Produção	Ciclo	Quantidade de Lingotes	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Encharque [min]	Tempo de Ciclo [min]	Temperatura de Encharque[°C]
18	C	17	210	610	820	1280
19	C	17	200	610	810	1280
20	C	17	210	615	825	1280

Fonte: o autor.

3.5 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

As variáveis-resposta consideradas no experimento são:

- Limite de Resistência (MPa);
- Limite de escoamento (MPa);
- Dureza (HB);
- Alongamento (%);
- Estricção (%);
- Tamanho de Grão;
- Carga dos Motores (%);
- Peso de carepa formado (kg).

3.6 ENSAIOS METALOGRAFICOS E ENSAIOS MECÂNICOS

Para realização dos ensaios mecânicos e metalográficos, foram retiradas amostras de 300mm durante o processo de inspeção, com as barras em temperatura ambiente, em uma serra de fita. Todas as amostras foram identificadas com o número da ordem de produção e foram enviadas ao laboratório metalúrgico. É mostrado na Figura 37 o processo de corte em serra de fita.

Figura 37 - Operação de corte em serra de fita.



Fonte: o autor.

No laboratório as amostras foram destinadas para preparação que inclui, basicamente:

- a) Corte das amostras em serra de fita para metalografia e dureza (HB);
- b) Lixamento das amostras embutidas com lixas d'água com granulometria #100, #220, #320 e #600 gramas/mm²;
- c) Polimento das amostras embutidas com alumina de 6 μ m e 1 μ m;
- d) Ataque químico com Nital 2%;
- e) Análise metalográfica e de tamanho de grão utilizando microscópio LEICA DMLM equipado com câmera LEICA DFC 295, software LEICA QWINV3 para análise de imagens. É mostrado na Figura 38 o modelo do microscópio utilizado.

Figura 38 - Microscópio LEICA DMLM.



Fonte: Leica (2020).

3.6.1 Determinação do Tamanho de Grão

Para a determinação do tamanho de grão foi utilizado o Método de McQuaid Ehn – quadro IV da norma ASTM E 112.

3.6.2 Ensaios mecânicos

3.6.2.1 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza com as amostras cortadas a partir das barras redondas laminadas, foram realizados da seguinte forma:

a) Retirada um corpo de prova na serra de fita AROTEC CSB - 100, com a medida do diâmetro original e com comprimento de 20 mm;

- b) Realização de lixamento na seção transversal da amostra utilizando lixas grão 80 e 220;
- c) Posicionamento da esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf conforme ASTM E10 (2014), seguido pelo nivelamento da superfície do corpo de prova;
- d) Aplicação da carga lentamente, sem choques ou vibrações, até o repouso da alavanca lateral;
- e) Espera de aproximadamente 10 a 15 segundos após a carga plena ter sido aplicada;
- f) Realizada a leitura no visor do equipamento HECKERT 308 / 98. É mostrado na Figura 39 um durômetro Heckert.

Figura 39 - Durômetro Heckert.



Fonte: o autor.

3.6.2.2 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração com as amostras cortadas a partir das barras redondas laminadas, foram realizados da seguinte forma:

- a) Corte de amostras de 300mm em serra de fita AROTEC CSB - 100;
- b) Os corpos-de-prova são retirados em um quadrado de 25mm, a $\frac{1}{2}$ distância entre a superfície e o núcleo do topo das amostras;
- c) Usinagem do corpo de prova em torno universal ROMI S20A, conforme Norma ASTM E8;
- d) Ensaio com máquina de tração KRATOS ECC – 4547, conforme norma NBR 6152 (1992). É mostrado na Figura 40 uma máquina de ensaio hidráulica KRATOS.

Figura 40 - Máquina Universal de Ensaio modelo ECC.



Fonte: Kratos (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram apresentados no formato gráfico de intervalos para melhor visualização da distribuição dos resultados, assim como da média dos mesmos e do desvio padrão. Além disso, os gráficos foram divididos por ensaio para facilitar a comparação entre os dados obtidos das amostras produzidas no ciclo Padrão, A, B e C.

O plano de amostragem foi de 1 amostra por corrida, sendo posteriormente separada em suas respectivas condições de produção (Padrão, A, B e C). Dessa forma, o total de amostras é de 20. Os resultados abaixo estão divididos em relação às características que foram estudadas nos materiais. Inicialmente serão apresentados os resultados de: dureza, limite de resistência, estrição, alongamento, escoamento, cargas dos motores e peso de carepa formado.

4.1 TAMANHO DE GRÃO

Na tabela 10 são apresentados os resultados das medições de tamanho de grão das amostras em cada uma das condições.

Tabela 10 - Valores do tamanho de grão obtido para cada amostra do aço 5120 nas quatro condições de processamento.

Ordem de Produção	Ciclo	Tamanho de Grão Ferrítico
1	Padrão	5
2	Padrão	5
3	Padrão	5
4	Padrão	5
5	Padrão	5
6	Padrão	5
7	Padrão	5
8	A	5
9	A	5
10	A	5
11	A	5
12	A	5
13	A	5
14	A	5
15	B	6
16	B	6
17	B	6
18	C	5
19	C	5
20	C	5

Fonte: o autor.

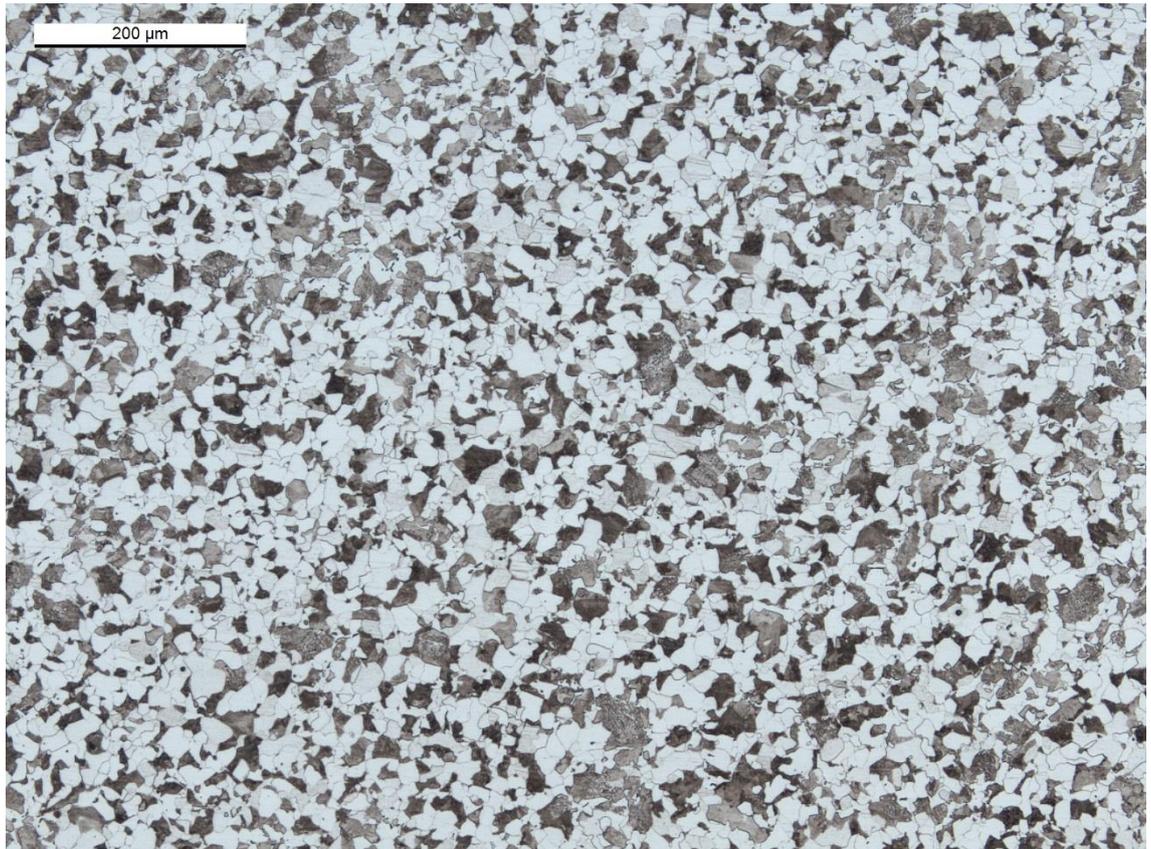
A partir da análise da Tabela 10, pode-se concluir que a laminação de lingotes com tempo muito baixo de encharque, ciclo B, resultou em um tamanho de grão menor que nas demais condições. Isso é explicado pela menor temperatura do núcleo no lingote, somado as reduções obtidas nos passes de laminação.

O tempo excessivo na etapa de encharque não apresentou variações consideráveis no tamanho de grão.

Os requisitos internos especificam que o tamanho de grão ferrítico esteja entre 5 e 10.

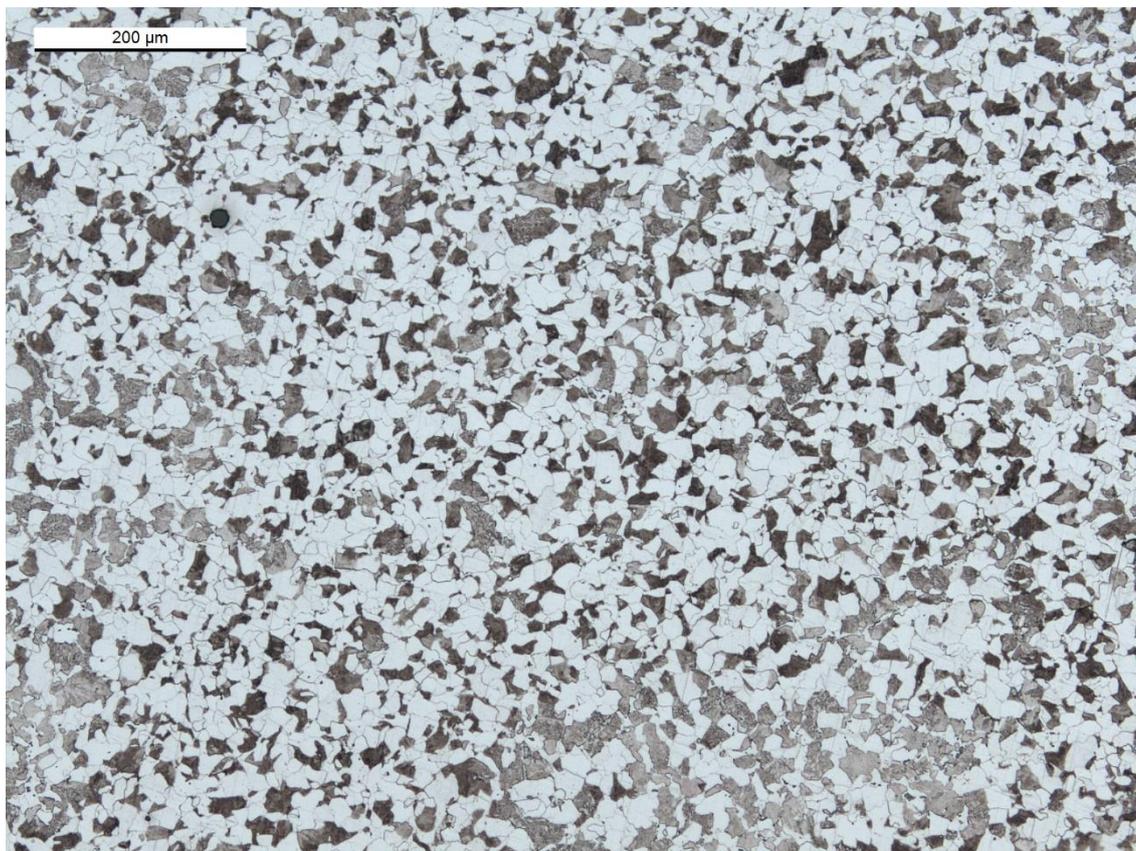
É mostrado nas Figura 41, 42, 43 e 44 a microestrutura para cada um dos ciclos utilizados.

Figura 41 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo Padrão.



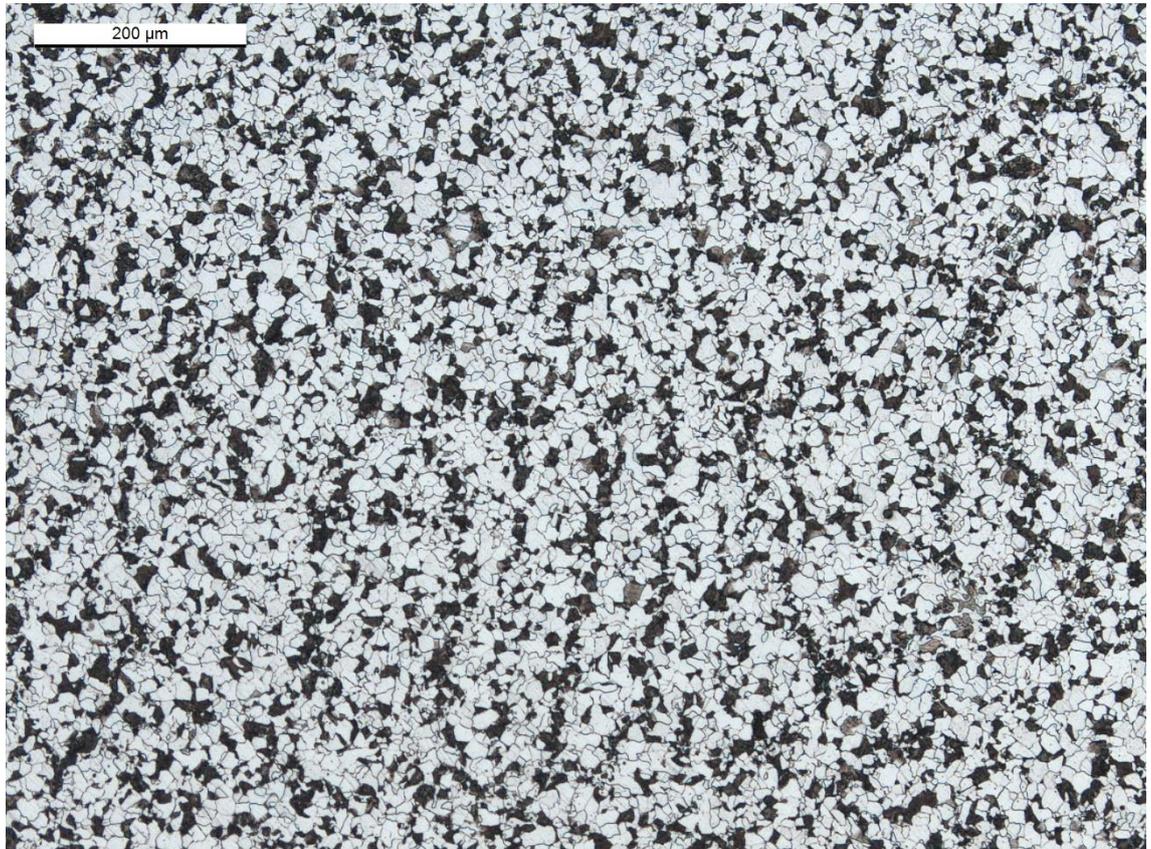
Fonte: o autor.

Figura 42 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo A.



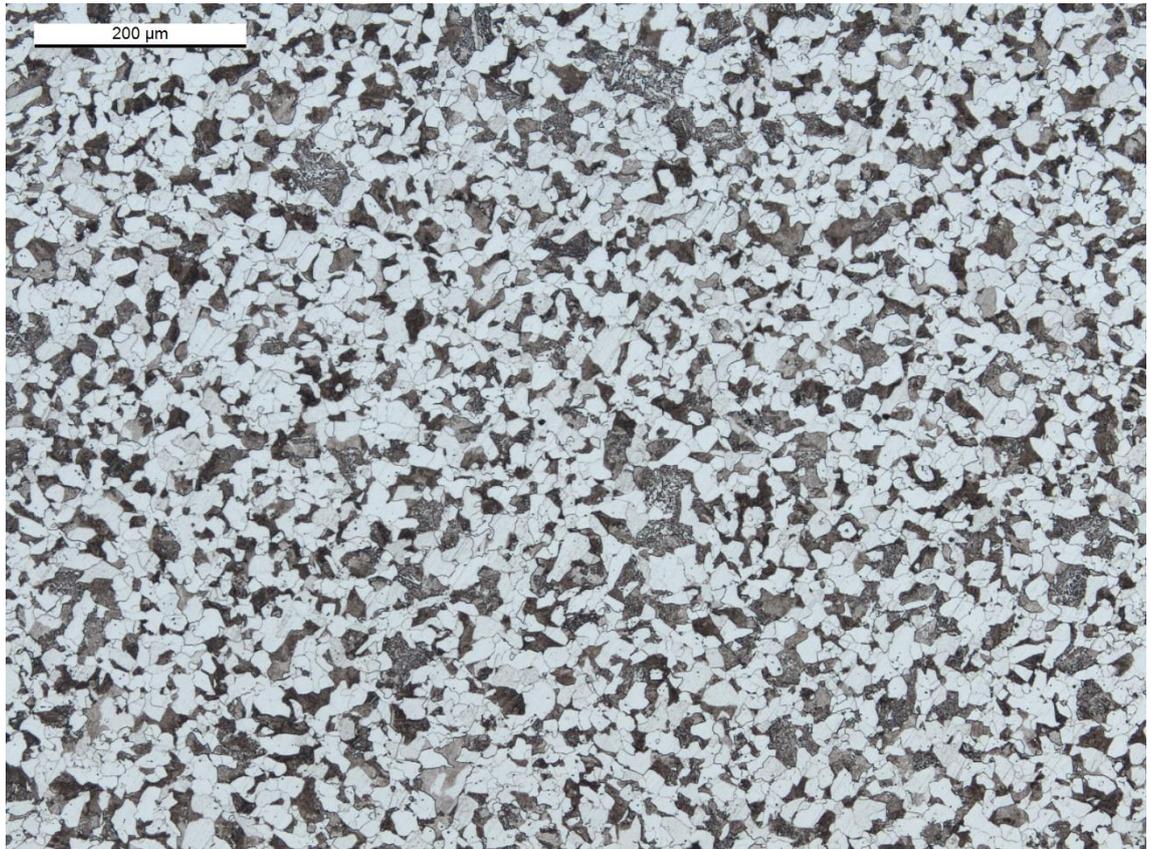
Fonte: o autor.

Figura 43 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo B.



Fonte: o autor.

Figura 44 - Microestrutura obtida para amostra processada no ciclo C.

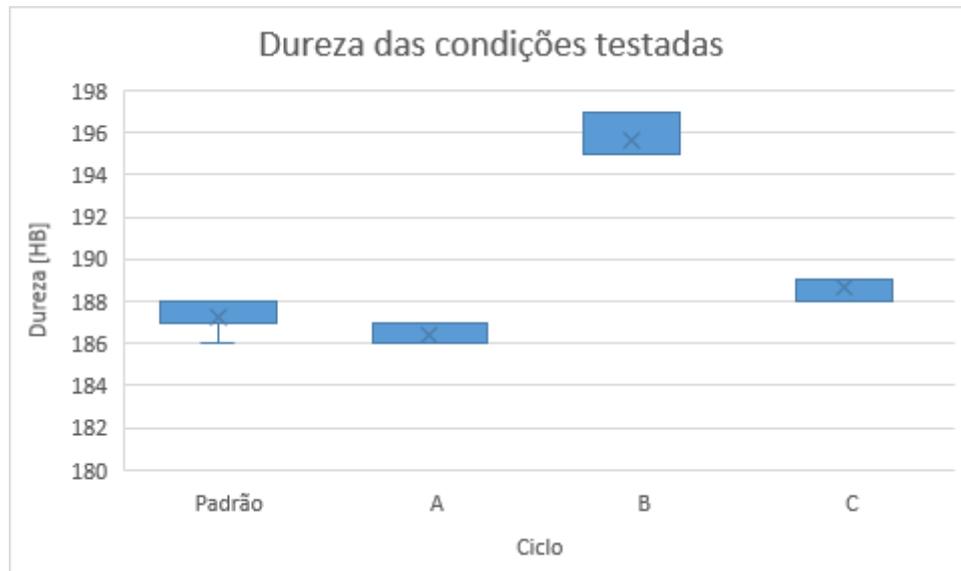


Fonte: o autor.

4.2 ENSAIO DE DUREZA (HB)

Na Figura 45 são apresentados os resultados das médias, medianas e limites dos valores coletados dos ensaios de dureza das amostras em cada uma das condições.

Figura 45 - Representação dos intervalos de dureza (HB) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.



Fonte: o autor.

É mostrado na Figura 46 o teste de Anova e Tukey para os resultados de dureza encontrados em cada uma das ordens de produção.

Figura 46 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de dureza.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Padrão	7	1311	187,286	0,57143
A	7	1305	186,429	0,28571
B	3	533	177,667	1,33333
C	3	566	188,667	0,33333

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	241,274	3	80,4246	151,813	5,8E-12	3,23887
Dentro dos grupos	8,47619	16	0,52976			

Total 249,75 19

Teste Tukey

	Padrão	A	B	C
Padrão		0,3526	0,0001855	0,06192
A	2,413		0,0001855	0,002153
B	27,08	24,67		0,0001855
C	3,888	6,302	30,97	

Fonte: o autor.

A partir da análise dos dados das Figura 45 e 46, pode-se concluir que o resultado de dureza encontrado nas condições A e C são muito próximas da Padrão, mantendo, no que se refere a dureza, as características do produto final.

O B apresentou um valor de dureza cerca de 4,3% mais alto, mas que ainda está dentro da faixa aceitável para o produto. Isso é explicado pelo menor tamanho de grão encontrado nas amostras que passaram por essa configuração de ciclo. (HU; SHI; SAUVAGE; SHA; LU, 2017)

Verificou-se que a dureza aumenta com a diminuição do tamanho dos grãos, isso é atribuído ao aumento da fração de área de contornos de grão, que atuam como fortes barreiras aos movimentos das discordâncias. (LIU; YUAN; WEI, 2013)

Como visto, o valor de F é maior que F crítico, mostrando que existe significância. O valor-P é menor que 0,05, comprovando a significância.

O teste Tukey marca na cor rosa as condições que diferem.

Com base nos dados apresentados, não houve diferenciação significativa entre os valores de dureza do Ciclo Padrão e Ciclo A, dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

Os requisitos internos especificam que a dureza não seja maior que 262HB.

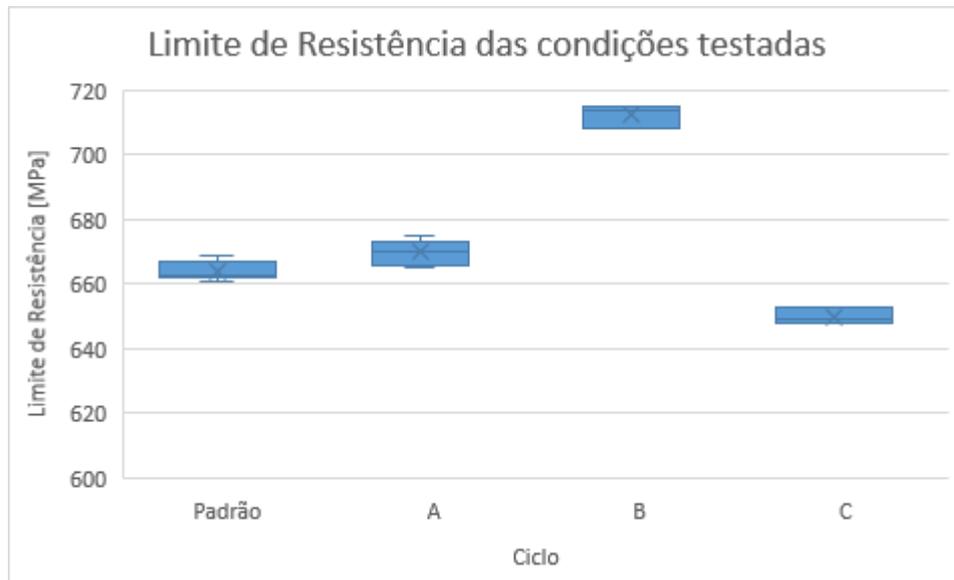
4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados de limite de resistência, estrição, alongamento e limite de escoamento são mostrados nas Figuras 47, 49, 51 e 52.

4.3.1 Limite de Resistência (MPa)

São apresentados na Figura 47 os resultados das médias, medianas e limites dos valores coletados dos ensaios de tração das amostras em cada uma das condições.

Figura 47 - Intervalos de limite de resistência (MPa) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.



Fonte: o autor.

É mostrado na Figura 48 o teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de resistência encontrados em cada uma das ordens de produção.

Figura 48 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de resistência.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Padrão	7	4648	664	8,66667
A	7	4690	670	14,6667
B	3	2137	712,333	14,3333
C	3	1950	650	7

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6797,08	3	2265,69	198,455	7,3E-13	3,23887
Dentro dos grupos	182,667	16	11,4167			
Total	6979,75	19				

Teste Tukey

	Padrão	A	B	C
Padrão		0,08591	0,0001855	0,0002698
A	3,639		0,0001855	0,0001857
B	29,32	25,68		0,0001855
C	8,491	12,13	37,81	

Fonte: o autor.

Pode-se notar que os valores encontrados para o ciclo A foram ligeiramente maiores que a condição Padrão, não gerando diferença significativa nas condições finais do produto.

Para as amostras que foram processadas na condição de B houve um aumento de 6,8% no limite de resistência médio. Este aumento pode ser explicado pelo menor tamanho de grão encontrado na microestrutura desses materiais. (HUANG; HU; WANG; WANG; YANG; ZHU, 2015)

Os limites de grãos podem obstruir o movimento de discordâncias que servem como principais portadores de deformação plástica à temperatura ambiente. Como resultado, quanto menores os grãos, maiores as resistências que os contornos de grãos proporcionam contra o movimento de discordâncias e maior a tensão de escoamento do fluxo plástico. Em outras palavras, a resistência dos metais policristalinos pode ser aumentada pela redução do tamanho dos grãos. (WU; YANG; YUAN; WU; WEI; HUANG; ZHU, 2015).

O ciclo C apresentou, na média, valores 2,1% menores que na condição Padrão, isso pode ser explicado pela maior homogeneidade de temperatura no centro do lingote, formando um núcleo mais quente e facilitando as etapas de conformação.

Como visto, o valor de F é maior que F crítico, mostrando que existe significância. O valor- P é menor que 0,05, comprovando a significância.

O teste Tukey marca na cor rosa as condições que diferem.

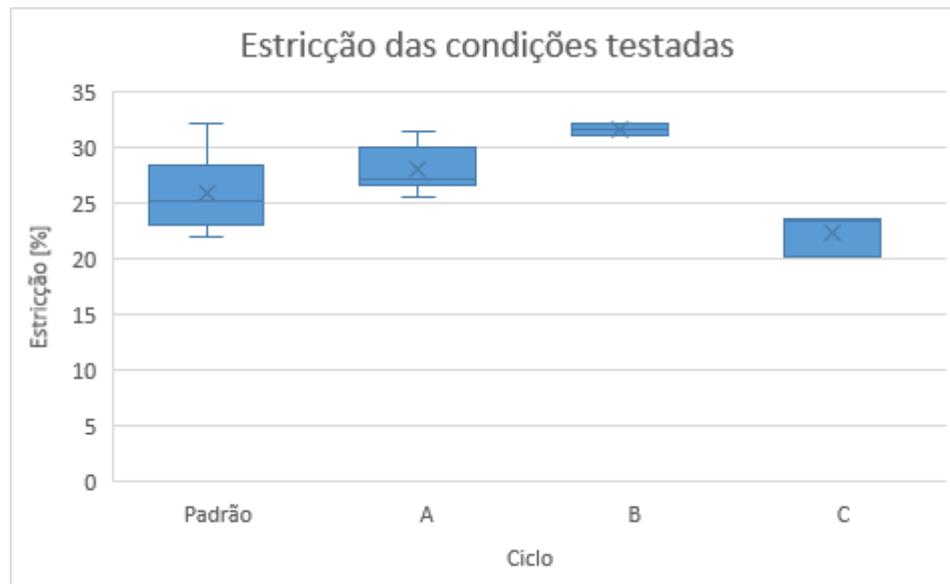
Com base nos dados apresentados, não houve diferenciação significativa entre os valores de limite de resistência do Ciclo Padrão e Ciclo A, dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

Os requisitos internos especificam que o limite de resistência esteja entre 560 e 850MPa.

4.3.2 Estricção

Os resultados a seguir apresentam a porcentagem de estricção, ou redução de área, após o ensaio de tração para cada uma das amostras. Eles decorrem dos dados obtidos nos ensaios de tração, já discutidos para o limite de resistência mecânica. É mostrado na Figura 49 o resultado de estricção para cada condição.

Figura 49 - Intervalos de estrição (%) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.



Fonte: o autor.

É mostrado na Figura 50 o teste de Anova e Tukey para os resultados de estrição encontrados em cada uma das ordens de produção.

Figura 50 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de estrição.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Padrão	7	180,9	25,8429	12,5162
A	7	196,7	28,1	4,39333
B	3	94,7	31,5667	0,30333
C	3	66,9	22,3	3,99

ANOVA

Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	146,644	3	48,8814	7,10719	0,003	3,23887
Dentro do:	110,044	16	6,87774			
Total	256,688	19				

Teste Tukey

	Padrão	A	B	C
Padrão		0,6075	0,02786	0,2445
A	1,764		0,2607	0,02563
B	4,473	2,709		0,0006873
C	2,769	4,532	7,241	

Fonte: o autor.

Para todos os casos, a redução de área encontrada para o ciclo A é tão eficaz quanto a do padrão, indicando que, para esta propriedade, mantêm-se os valores desejáveis.

O ciclo A apresentou um aumento médio na estrição em 8%. A média dos resultados das amostras que passaram pelo ciclo B apresentaram um aumento ainda maior, se aproximando a 22,1%. Mesmo com os aumentos nos valores de estrição, todas as condições encontram-se dentro da faixa desejada.

No C houve a redução média de 13,7%.

Vale salientar que o resultado para o ciclo A apresentou um desvio padrão menor do que o resultado do ciclo Padrão, ou seja, o resultado foi mais estável.

Como visto, o valor de F é maior que F crítico, mostrando que existe significância. O valor-P é menor que 0,05, comprovando a significância.

O teste Tukey marca na cor rosa as condições que diferem.

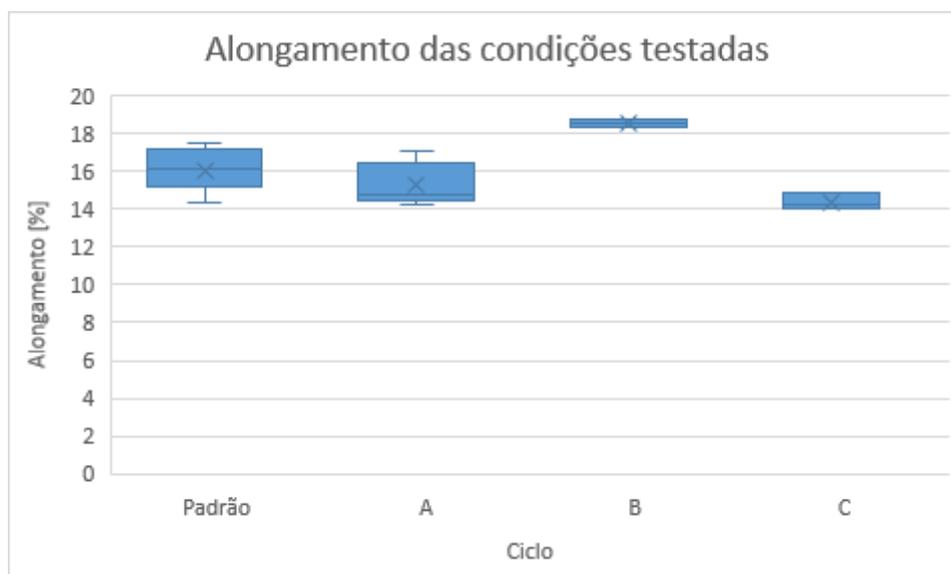
Com base nos dados apresentados, não houve diferenciação significativa entre os valores de limite de resistência do Ciclo Padrão e Ciclo A, dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

Os requisitos internos especificam que a estrição esteja entre 14 e 46%.

4.3.3 Alongamento

São apresentados na Figura 51 os resultados das médias, medianas e limites dos valores dos valores de alongamento obtidos nos ensaios de tração para cada uma das amostras em suas respectivas condições de processamento

Figura 51 - Representação dos intervalos de alongamento (%) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.



Fonte: o autor.

É mostrado na Figura 52 o teste de Anova e Tukey para os resultados de alongamento encontrados em cada uma das ordens de produção

Figura 52 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de alongamento.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Padrão	7	112,2	16,0286	1,39238
A	7	107,2	15,3143	1,19476
B	3	55,5	18,5	0,04
C	3	43,1	14,3667	0,22333

ANOVA

Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	29,8505	3	9,95016	9,91946	0,00062	3,23887
Dentro do:	16,0495	16	1,0031			
Total	45,9	19				

Teste Tukey

	Padrão	A	B	C
Padrão		0,7329	0,01223	0,1164
A	1,462		0,001616	0,5341
B	5,057	6,519		0,0002737
C	3,401	1,939	8,458	

Fonte: o autor.

As que passaram pelo ciclo B obtiveram um resultado de alongamento de, na média, 15,4% a mais.

Como visto, o valor de F é maior que F crítico, mostrando que existe significância. O valor-P é menor que 0,05, comprovando a significância.

O teste Tukey marca na cor rosa as condições que diferem.

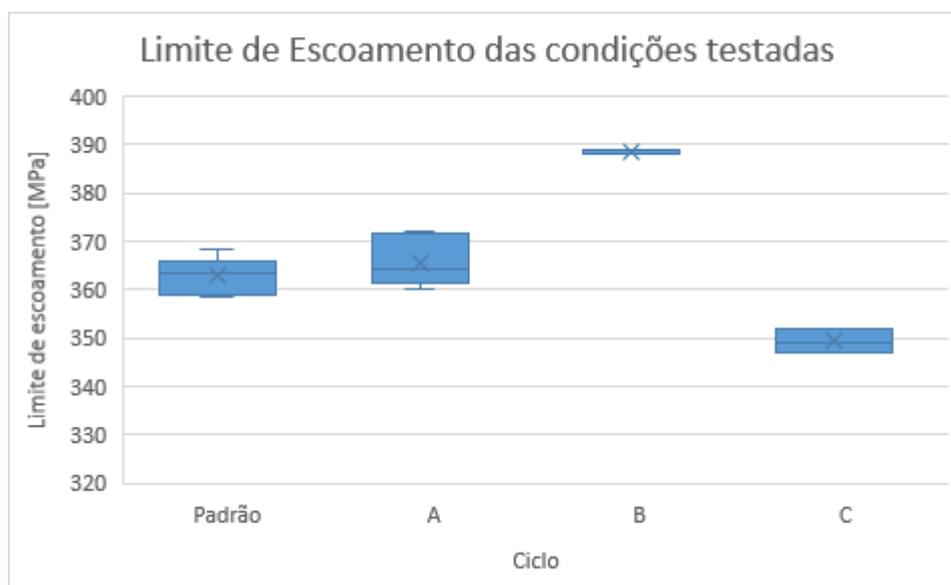
Com base nos dados apresentados, não houve diferenciação significativa entre os valores de limite de resistência do Ciclo Padrão e Ciclo A, dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

Os requisitos internos especificam que o alongamento esteja entre 10 e 36%.

4.3.4 Limite de escoamento

Os resultados dos limites de escoamento medidos para o aço 5120 em cada um dos ciclos são apresentados na Figura 53.

Figura 53 - Representação dos intervalos de limite de escoamento (MPa) para o aço 5120 nos ciclos Padrão, A, B e C.



Fonte: o autor.

É mostrado na Figura 54 o teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de escoamento encontrados em cada uma das ordens de produção

Figura 54 - Teste de Anova e Tukey para os resultados de limite de escoamento

Anova: fator único

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Padrão	7	2541,83	363,119	14,594
A	7	2558,39	365,485	22,2556
B	3	1165	388,333	0,33333
C	3	1048	349,333	6,33333

ANOVA						
Fonte da varia	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grup	2387,32	3	795,774	54,3119	1,3E-08	3,23887
Dentro do	234,431	16	14,6519			
Total	2621,75	19				

Teste Tukey				
	Padrão	A	B	C
Padrão		0,8617	0,0001855	0,0007194
A	1,106		0,0001858	0,0002945
B	12,92	11,82		0,0001855
C	7,198	8,304	20,12	

Fonte: o autor.

No B houve um aumento médio de 6,9% nos valores de limite de escoamento. Da mesma forma que no limite de resistência, esse fato se deve ao menor tamanho médio de grão encontrado nas amostras.

Nas amostras do C ocorreu um aumento médio de 3,8%. Da mesma forma que no limite de resistência, tal aumento pode ser explicado pela conformação de um material com o núcleo mais encharcado que na condição Padrão.

Como visto, o valor de F é maior que F crítico, mostrando que existe significância. O valor-P é menor que 0,05, comprovando a significância.

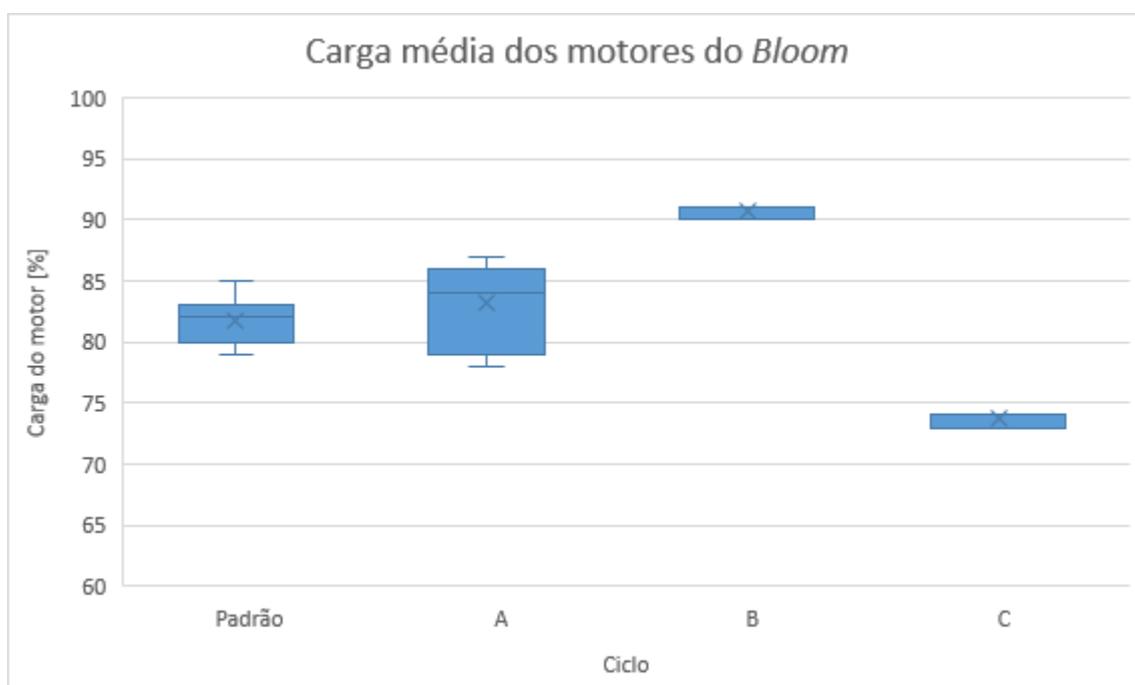
Com base nos dados apresentados, não houve diferenciação significativa entre os valores de limite de resistência do Ciclo Padrão e Ciclo A, dessa forma o resultado é positivo para a validação do ciclo proposto.

Os requisitos internos especificam que o limite de escoamento esteja entre 280 e 460MPa.

4.4 CARGA DOS MOTORES (%)

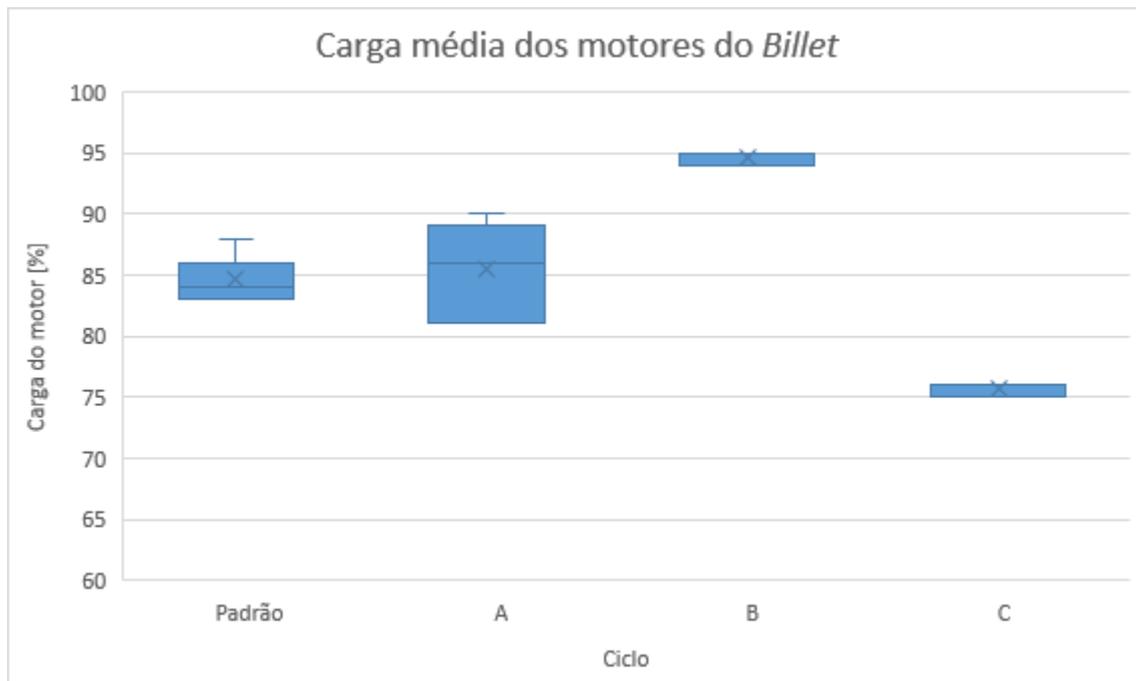
Durante o processo de laminação, as cargas dos motores do *Bloom* e *Billet* foram monitoradas pelo sistema supervisório. A carga considerada é a média de carga de todos os lingotes da ordem de produção. Os resultados da porcentagem de carga média do *Bloom* para cada um dos ciclos são apresentados na Figura 55.

Figura 55 - Porcentagem de carga média do *Bloom* para cada um dos ciclos.



Fonte: o autor.

Os resultados da porcentagem de carga média do *Billet* para cada um dos ciclos são apresentados na Figura 56.

Figura 56 - Porcentagem de carga média do *Billet* para cada um dos ciclos.

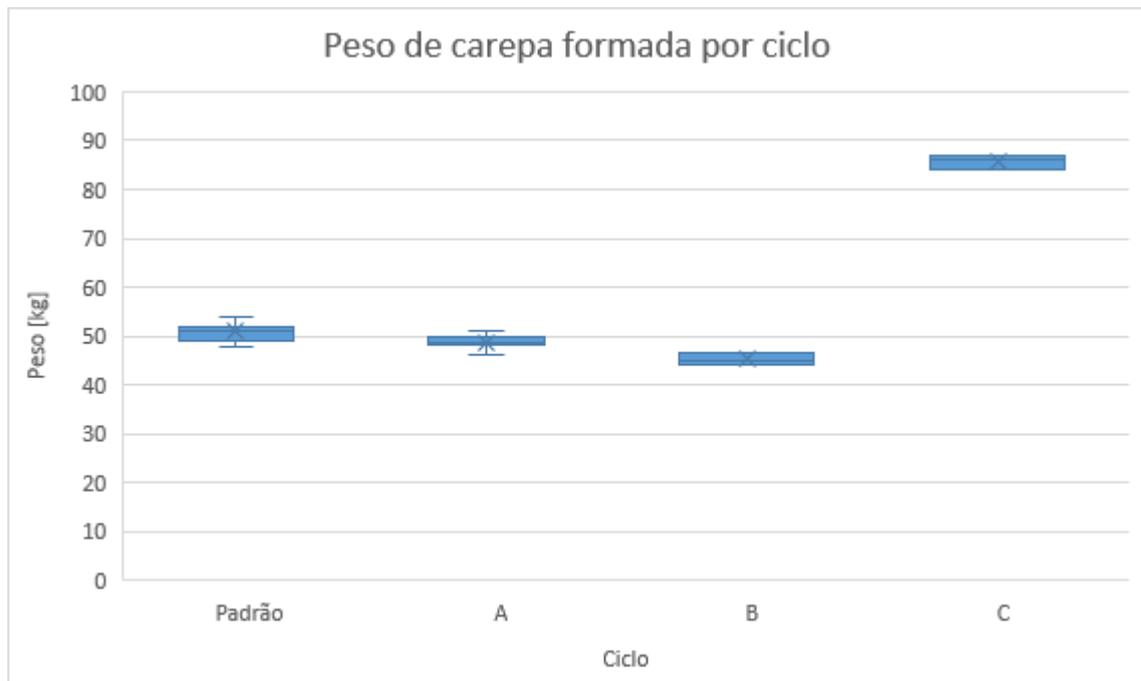
Fonte: o autor.

Para atender os requisitos de segurança operacional, os motores não podem operar com cargas acima de 90%.

4.5 PESO DE CAREPA FORMADO (KG)

Os resultados do peso de carepa formada para o aço 5120 em cada um dos ciclos são apresentados na Figura 57.

Figura 57 - Peso de carepa formado em cada ciclo.



Fonte: o autor.

4.6 DISCUSSÃO

No ciclo A as ordens de produção apresentaram lingotes ligeiramente mais pesados, devido a menor formação de carepa devido ao menor tempo de exposição a temperatura de encharque.

Não houve variações consideráveis nas cargas dos motores dos Laminadores *Bloom* e *Billet*, toda a operação de manuseio e redução dos lingotes ocorreu conforme o padrão.

A escarfagem foi a etapa do processo onde se notou a maior variação de temperatura em relação a condição de rea aquecimento Padrão, sendo até 3% menor, mas ainda dentro das tolerâncias desta etapa de produção. No entanto, esta diferença deixou de existir após o processo de laminação no Laminador *Billet*. Isso ocorreu, pois, à medida que o bloco sofre o processo de redução, mesmo que em uma etapa acabadora, parte da energia que é aplicada é dissipada na forma de calor, fazendo com a temperatura ao longo da seção do material tenda a se equalizar.

Na fase de corte da Serra a Quente e resfriamento no Leito de Resfriamento, não houve variações perceptíveis.

Em todas as condições houve ordens de produção que tiveram tempo de encharque real diferente do objetivado, contudo, essa variação foi baixa se considerado o tempo de ciclo de reaquecimento.

No ciclo B houve grande esforço nos laminadores *Bloom* e *Billet*, elevando as cargas de seus motores para mais de 90% da capacidade, extrapolando os limites de segurança de operação do equipamento. Isto ocorreu em função da menor temperatura do núcleo dos lingotes devido ao menor tempo para a homogeneização da temperatura da carga colocada no forno. A temperatura para a realização da escarfigem estava no mínimo da faixa permitida, o mesmo ocorreu na etapa de corte da serra a quente. Qualquer interrupção na linha de produção que pudesse gerar a parada do material na linha de laminação elevaria consideravelmente as chances de sucateamento em função da baixa temperatura para processamento.

Variações nas curvas de aquecimento, condição física dos fornos e refratários, causaram pequenas variações no ciclo térmico, que em função do tempo consideravelmente reduzido, provocavam heterogeneidade de temperatura entre os lingotes de uma mesma fornada.

A operação nessa configuração de reaquecimento tornou o processo inviável quando consideradas suas realidades e necessidades. Com baixa repetibilidade e com os parâmetros de processo no limite da faixa, podendo sair dos valores especificados do processo.

A laminação de lingotes nessa faixa de temperatura também aumenta consideravelmente o desgaste dos cilindros de laminação dos laminadores *Bloom* e *Billet*. Esses cilindros são de ferro fundido nodular e precisam passar por um processo de usinagem a cada ciclo de vida. O mesmo pode ser notado no disco de serra da Serra a Quente. A vida útil do disco pode chegar a reduzir em até 20% quando são cortadas barras na faixa inferior do limite de temperatura.

Por conta do elevado tempo de encharque, as corridas que passaram pelo ciclo C tiveram uma formação de carepa 68% maior que no ciclo Padrão, como esperado em função do tempo excessivo de forno. Isso também ficou nítido pelo aumento na quantidade de carepa que se acumulou na linha de laminação. (KRZYZANOWSKI; BEYNON; FARRUGIA, 2010)

Houve uma menor carga nos dois laminadores. Isto ocorreu devido a maior temperatura alcançada no núcleo dos lingotes. Consequentemente, a carga nos

laminadores foi cerca de 10% menor que na condição Padrão. (ADEBI; HANZAKI; LIU; XIN; HAGHDADI; HODGSON, 2017)

A temperatura para a realização da escarfagem estava na máxima da faixa permitida, acima dela pode ocorrer o fenômeno internamente denominado de gotejamento. Nele, parte do aço da superfície do bloco se funde durante o processo de escarfagem, gerando irregularidades ao longo da peça. Quando essas irregularidades são conformadas no Laminador *Billet*, há a formação de um defeito superficial denominado marca de escarfagem. Dependendo da profundidade esses defeitos podem ser recuperados na etapa de acabamento, através de um esmerilhamento localizado. Porém, esta etapa agrega custo ao produto e deve ser evitada.

Durante a etapa de corte na Serra a Quente a maior temperatura das barras ocasionou a formação de rebarba nas extremidades da barra. As normas e requisitos dos clientes exigem a isenção de rebarbas nos topos das barras, dessa forma, foi adicionada uma etapa de retrabalho, realizando o chanfro manual das barras que apresentavam o defeito. Da mesma forma que o esmerilhamento, o chanfro deve ser evitado por motivos de custo.

O tempo de encharque foi o dobro do que se pratica como padrão, aumentando o tempo de ciclo térmico em mais de 60%. Isso implica na perda de produtividade dos fornos, aumento do consumo de gás e perda da sincronia entre lingotamento convencional e o forno poço. Por se tratar de um fluxo de fabricação contínuo, atrasos nas bateladas dos fornos ocasionam impacto direto no ritmo de produção do lingotamento convencional na aciaria.

Também deve ser levado em conta que caso os fornos estejam com os ciclos atrasados e cheguem mais vagões com lingotes, estes devem ser resfriado em caixas térmicas por conta da indisponibilidade de fornos. Esse resfriamento, mesmo que controlado, gera um aumento na incidência de defeitos superficiais no produto final. Estes defeitos, em sua maioria, são trincas superficiais. Dependendo da profundidade tais defeitos podem ou não removidos durante a etapa de inspeção.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas neste trabalho é possível chegar às seguintes conclusões:

- Em todos as ordens de produção testadas, as propriedades atenderam a especificação internas.
- A condição A apresentou resultados semelhantes a condição Padrão, porém com um tempo de ciclo de reaquecimento 90 minutos menor e sem esforços maiores nos Laminadores *Bloom* e *Billet*, passando o tempo total de ciclo de 500 para 410 minutos.
- A condição B mostrou se impraticável em condições normais de operação do laminador em questão. Os equipamentos têm suas capacidades levadas a máxima e necessitam de acompanhamento específico durante o processamento de lingotes com esse ciclo de reaquecimento. Além disso, após o Laminador *Bloom*, as barras chegam com temperatura bem próxima da faixa inferior, aumentando a possibilidade de geração de defeitos superficiais.
- A partir das microestruturas obtidas para as 4 condições, pode se dizer que o menor tempo de reaquecimento promoveu uma estrutura de menor tamanho de grão na condição B. Isso foi possível devido a menor temperatura do material durante as etapas de conformação nos laminadores. Consequentemente, o menor tamanho de grão promoveu uma melhora nas propriedades mecânicas, conforme demonstra a lei de Hall-Petch. (AZIMI; BRITZ; ENGSTLER; FRITZ; MUCKLICH, 2018)
- A condição C se mostrou insatisfatória operacionalmente. Além de diminuir a capacidade produtiva dos fornos e aumentar o consumo de gás combustível, esse ciclo gerou materiais com maior quantidade de óxido de ferro (carepa) que se acumulam no fundo dos fornos e na linha de laminação, tendo que serem limpos posteriormente. Também foi notado uma elevada quantidade de barras com rebarbas do corte, tal efeito ocasionado pela maior temperatura de chegada das barras na Serra a Quente.
- Somente a condição A foi capaz de atender, simultaneamente, os objetivos de obter um ganho de produtividade e consumo de combustível, reduzindo em 18% o tempo total de reaquecimento sem reduzir o desempenho do material e nível de

segurança operacional. Dessa forma pode se alterar o ciclo de reahecimento desse aço para a condição denominada A.

REFERÊNCIAS

- ADEBI, H.R.; HANZAKI, A. Z.; LIU, Z.; XIN, R.; HAGHDADI, N.; HODGSON, P. D. Continuous dynamic recrystallization in low density steel. **Materials Science and Engineering**, Tehran, v. 114, n. 15, p. 55-61, jan. 2017.
- ANDERSEN, I.; GRONG, O. Analytical modelling of grain growth in metals and alloys in the presence of growing and dissolving precipitates: I. normal grain growth, **Acta Metallurgica et Materialia**, Trondheim, v. 43, n. 7, p. 2673-2688, jul. 1995.
- ASKELAND, D. R.; PHULE, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152**: materiais metálicos: ensaios de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 35p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6506**: ensaio de dureza Brinell. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1**: determinação das propriedades mecânicas à tração de materiais metálicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 70p.
- AZIMI, S. M.; BRITZ, D.; ENGSTLER, M.; FRITZ, M.; MUCKLICH, F. Advanced steel microstructural classification by deep learning methods, **Scientific Reports**, Saarbrücken, v. 8, n. 3, p 2128-2142, feb. 2018.
- BARTOLOMEU, F.; BUCIUMEANU, M.; PINTO, E.; ALVES, N.; CARVALHO, O.; SILVA, F. S.; MIRANDA, G. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior: a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. **Additive Manufacturing**, Guimarães, v. 16, n. 23, p. 81-89, may 2017.
- BECKER, R. H. S. **Estudo da influência da taxa de resfriamento e temperatura nos últimos passes de laminação de fio máquina sobre a resposta ao tratamento térmico de esferoidização em um aço DIN 41Cr4**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2002. 589 p.
- CHEN, W.; VOISIN, T.; ZHANG, Y; FLORIEN, J.; SPADACCINI, C. M.; MCDOWELL, D. L.; ZHU, T.; WANG, Y. M. Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel. **Nature Communications**, Livermore, v. 10, n. 4338, p.323 - 327, sep. 2019.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599 p.

CHOI, H.; LEE, S.; LEE, J.; BARLAT, F.; COOMAN, B. C. Characterization of fracture in medium Mn steel. **Materials Science and Engineering**, Nam-Gu, v. 687, n. 27, p. 200-210, feb. 2017.

CONRAD, H. Grain-size dependence of the flow stress of Cu from millimeters to nanometers. **Metallurgical and Materials Transactions**, Raleigh, v. 35, n. 3, p. 2681-2695, sep. 2004.

DAO, M.; LU, L.; ASARO, R.; HOSSON, J. T. M.; MA, E. Toward a quantitative understanding of mechanical behavior of nanocrystalline metals. **Acta Materialia**, Baltimore, v. 55, n. 143, p. 4041-4065, mar. 2007.

GHADAMGAHI, M.; OLUND, P.; LUGNET, A.; SAFFARI, M.; YANG, W. Design optimization of Flameless-Oxyfuel soaking pit furnace using CFD technique, **Energy Procedia**, Stockholm, v. 61, n. 6, p. 611-614, jun. 2014.

GIGA, A.; KIMOTO, Y.; TAKIGAWA, Y.; HIGASHI, K. Demonstration of an inverse Hall–Petch relationship in electrodeposited nanocrystalline Ni–W alloys through tensile testing, **Scripta Materialia**, Osaka, v. 55, n. 2, p. 143-146, may. 2006.

GOME, T. E. **Efeitos da temperatura de laminação na formação e na reversão de martensita induzida por deformação no aço inoxidável austenítico AISI 304L**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GORNI, A. A.; SILVA, M. R. S. Evolução do tamanho de grão austenítico durante a laminação de tiras a quente de aço microligados ao nióbio. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 109-114, abr. 2015.

HAN, S. H.; CHANG, D.; HUH, C. Efficiency analysis of radiative slab heating in a walking-beam-type reheating furnace. **Energy**, Daejeon, v. 36, n. 2, p.1265-1272, feb. 2011.

HISSANAGA, B. M. M. S. **Variáveis do processo termomecânico que influenciam na relação elástica do vergalhão CA-60**. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

HU, J.; SHI, Y. N.; SAUVAGE, X.; SHA, G.; LU, K. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals. **Science**, Nanjing, v. 355, n. 6331, p. 1292-1296, mar. 2017.

HUANG, C. X.; HU, W. P.; WANG, Q. Y.; WANG, C.; YANG, G.; ZHU, Y. T. Na ideal ultrafine-grained structure for high strength and high ductility, **Materials Research Letters**, Chengdu, v. 3, n. 2, p. 88-94, jan. 2015.

KEENER, E. L.; BOGGS, W. E.; BRIDGES, W. **Blast-furnace gas enrichment control**. Documento apresentado no 1980 IEEE Mid'con Professional Program, de 4 a 6 de novembro de 1980.

KEMP, A. Estudo do efeito da composição química e dos parâmetros de lingotamento na ocorrência de trincas em barras laminadas: RCTM. *In: SEMINÁRIO DE ACIARIA, FUNDIÇÃO E METALURGIA DE NÃO-FERROSOS*, 48., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2017. p. 447-455.

KIN; M. Y. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Chonbuk, v. 50, n. 19, p. 3740-3748, sep. 2007.

KREITH F.; MANGLIK R. M.; BOHN M. S. **Princípios da transferência de calor**. 7. ed. São Paulo: Cengage, 2010. 676 p.

KRZYKANOWSKI, M.; BEYNON, J. H.; FARRUGIA, D. C. J. **Oxide scale behavior in high temperature metal processing**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010. 386 p.

LESLIE, W. C. **The physical metallurgy of steels**. Auckland: McGraw-Hill, 1982. 396 p.

LINO, J. J. P. **Laminação controlada de um aço microligado ao nióbio visando a obtenção do grau API X60 em laminador Steckel**. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

LIU, X.; YUAN, F.; WEI, Y. Grain size effect on the hardness of nanocrystal measured by the nanosize indenter. **Applied Surface Science**, Beijing, v. 279, n. 15, p. 159-166, aug. 2013.

MA, E.; ZHU, T. Towards strength-ductility synergy through the design of heterogeneous nanostructures in metals. **Materials Today**, Baltimore, v. 20, n. 6, p. 323-331, jul. 2017.

MEYERS, M. A.; MISHRA, A.; BENSON, D. J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. **Progress in Materials Science**, San Diego, v. 51, n. 4, p. 427-556, may. 2006.

MORRIS, J. W. **The influence of grain size on the mechanical properties of steel**. 2001. 8 f. Dissertação (Materials Science and Engineering) – University of California, California, 2001.

ODNOBOKOVA, M.; KIPELOVA, A.; BELYAKOV, A.; KAIBYSHEV, R. Microstructure Evolution um a 312L stainless steel subjected to multidirectional forging and unidirectional bar rolling. **IOP conference series: materials science and engineering**, Belgorod, v. 6, n. 63, p. 120-129, oct. 2014.

OHASHI, Y.; WOLFENSTEIN, J.; KOCH, R.; SHERBY, O.D. Fracture behavior of a laminated steel-brass composite in bend tests. **Materials Science and Engineering**, A151, p. 37-44, may. 1992.

PADILHA, A. F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. São Paulo: ABM, 1996. 158 p.

PLENTZ, R. S. **Otimização do processo de resfriamento do aço mola SAE 9254 durante laminação**. 2009. 49 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

QIN, W.; LI, J.; LIU, Y.; KANG, J.; ZHU, L.; SHU, D.; PENG, P.; SHE, D.; MENG, D.; LI, Y. Effects of grain size on tensile property and fracture morphology of 316L stainless steel. **Materials Science and Engineering**, Beijing, v. 254, n. 12, p. 116-119, nov. 2019.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 2008. 776 p.

ROBERTS, W. L. **Hot Rolling of steel: manufacturing engineering and materials processing**. 10. ed. New York: Marcel Dekker, 1983. 1040 p.

SCHUH, C.; NIEH, T.; YAMASAKI, T. Hall - Petch breakdown manifested in abrasive wear resistance of nanocrystalline nickel. **Scripta Materialia**, Hyogo, v. 46, n. 10, p. 735-740, may. 2002.

SICILIANO, F.; JONAS, J. J. Mathematical modelling of the hot strip rolling of microalloyed Nb, multiply-alloyed Cr-Mo, and plain C-Mn steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 31, n. 2, p. 511-530, feb. 2000.

SILVÉRIO, A. S. **Estudo da evolução do tamanho de grão na laminação a quente de barras de aço médio carbono microligado ao vanádio – 38MnSiV5**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SKRYABIN, M. L.; LIKHANOV, V. A. The study of casting defects in steel 35HGSL. **Journal of Physics**, v. 1399, n. 44063, p. 1088-1094, may 2019.

TSELIKOV, A. I.; ZJUKIN, V. Modern rolling mills in the URSS. **Iron Book**, Moskow, v. 20, n. 3, p. 355-561, may 1978.

WICK, H. J. Estimate of ingot temperatures in a soaking pit using an extended Kalman filter. **IFAC Control Science and Technology**, Kyoto, v. 14, n. 2, p. 2569-2574, aug. 1981.

WU, X. L.; JIANG, P.; CHEN, L.; ZHANG, J. F.; YUAN, F. P.; ZHU, Y. T. Synergetic strengthening by gradient structure, **Materials Research Letter**, Nanjing, v. 2, n. 4, p. 185-191, jun. 2014.

WU, X.; JIANG, P.; CHEN, L.; YUAN, F.; ZHU, Y. T. Extraordinary strain hardening by gradient structure. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Beijing, v. 111, n. 20, p. 7197-7201, may 2014.

WU, X.; YANG, M.; YUAN, F.; WU, G.; WEI, Y.; HUANG, X.; ZHU, Y.
Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Beijing, v. 112, n. 47, p. 14501-14505, nov. 2015.

WU, X.; ZHU, Y. Heterogeneous materials: a new class of materials with unprecedented mechanical properties. **Materials Research Letter**, Nanjing, v. 5, n. 8, p. 527-532, jun. 2017.

YANG, M.; PAN, Y.; YUAN, F.; ZHU, Y.; WU, X. Back stress strengthening and strain hardening in gradient structure. **Materials Research Letter**, Shanghai, v. 4, n. 3, p. 145-151, mar. 2016.

YANUSHKEVICH, Z.; LUGOVSKAYA, A.; BELYAKOV, A.; KAIBYSHEV, R.
Deformation microstructures and tensile properties of an austenitic stainless steel subjected to multiple warm rolling. **Materials Science and Engineering**, Belgorod, v. 667, n. 14, p. 279-285, jun. 2016.