

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

Departamento de Metalurgia

ESTUDO DE AÇO AO CARBONO PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA PRODUÇÃO DE
ARAME NERVURADO CA60.

Bruna Iost Camacho

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre
2015

“Laissez-faire, laissez-passer,
lê monde va de lui-même.”
(Vicent de Gournay)

AGRADECIMENTOS

À UFRGS pelo ensino de excelência oferecido.

Ao meu pai Claudio pelo apoio incansável, presença ativa e por ser o meu maior incentivador ao longo de toda minha graduação e pelo suporte financeiro na realização dos meus sonhos.

À minha irmã Amanda pela presença em minha vida.

À minha avó Irene e aos meus tios Eduardo, Luis Henrique, Solange e Elisabeth por acreditarem em mim nos momentos em que eu mesma tive dificuldades de acreditar.

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt pela orientação, paciência e ensinamentos não apenas no desenvolvimento deste trabalho, mas ao longo de toda minha graduação.

Ao professor Antônio Vilela e demais professores do curso pelo aprendizado e conhecimento transmitido.

Aos colegas de trabalho Ricardo Ilha, João Vares, Rafael Wolanin, Elidiane Jacques, Janine Scherer e demais colegas da GERDAU pelo apoio e aprendizado ao longo do período de estágio.

Aos engenheiros Silvio Sacramento, Marcus Steffenon, Fabio Rocha e Anderson Kempka pelo incentivo e confiança na realização desse trabalho e pelo tempo investido na minha formação durante o período de estágio.

Às minhas grandes amigas Manoela, Karla, Luiza, Virginia, Viviane e Deise e à minha prima Luiza pelo carinho, paciência e conversas.

Aos colegas de graduação e meus grandes amigos Caroline e Rodrigo pela amizade e companheirismo em todos os momentos.

Aos colegas Henrique Brum, Alexander Vilela e Luciana Wist pela realização dos ensaios expostos nesse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização desse trabalho bem como na minha formação acadêmica.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO AÇO	3
2.1.1 PRODUÇÃO DE AÇO EM USINAS SEMI INTEGRADAS	5
2.1.1.1 PÁTIO DE SUCATAS.....	5
2.1.1.2 REFINO PRIMÁRIO – FORNO ELETRICO A ARCO (FEA).....	5
2.1.1.3 REFINO SECUNDÁRIO.....	7
2.1.1.3.1 DESSULFURAÇÃO DO AÇO.....	8
2.1.1.4 LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....	9
2.3.1 LAMINAÇÃO A QUENTE.....	12
2.3.2 LAMINAÇÃO A FRIO.....	13
2.2 ARAME NERVURADO PARA CONCRETO ARMADO-VERGALHÃO	10
2.3 PROCESSOS DE LAMINAÇÃO.....	11
2.3.1 LAMINAÇÃO A QUENTE.....	12
2.3.2 LAMINAÇÃO A FRIO.....	13
2.4 ENCRUAMENTO.....	16
2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS	17
2.6 ENSAIO DE TRAÇÃO	19
2.7 NORMA ABNT NBR 7480.2007.....	21
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	22
3.2.1 CORRIDAS 1 e 2.....	23
3.2.2 CORRIDAS 3 e 4.....	23
3.3 ENSAIO EM TARUGO	23

3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS CA60.....	24
3.5	ENSAIOS NO PRODUTO FINAL	25
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1	CORRIDAS TESTE	27
	4.1.2 ENSAIOS DE DOBRAMENTO E ENROLAMENTO.....	29
	4.1.3 ANÁLISE METALOGRAFICA.....	30
	4.1.4 AMOSTRAGEM PASSE A PASSE.....	31
	4.1.5 ANÁLISE TARUGO.....	32
4.2	PRODUÇÃO EM ESCALA INDUSTRIAL.....	32
	4.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	33
	4.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	37
	4.2.3 PARADAS DE PRODUÇÃO.....	41
	4.2.4 CONSUMO FeSiMn.....	43
5.0	CONCLUSÕES	46
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
7.0	REFERÊNCIAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Principais Rotas de produção do aço.....	4
Figura 2.2	Forno Elétrico a Arco.....	5
Figura 2.3	Etapas Processamento do FEA.....	6
Figura 2.4	Relação alongação do aço e temperatura do processo..	7
Figura 2.5	Processo Lingotamento contínuo..	8
Figura 2.6	Principais regiões de troca termica no lingotamento contínuo..	9
Figura 2.7	Fio-máquina..	11
Figura 2.8	Esquema de funcionamento da redução da área do fio-máquina pelos discos de metal duro disposto 120° uns dos outros..	13
Figura 2.9	Vergalhão CA60.....	13
Figura 2.10	Relação deformação mecânica e efeito encruamento no material	15
Figura 2.11	Efeito da redução em área no aumento da resistência à tração..	16
Figura 2.12	Variação das propriedades mecânicas no trabalho a frio..	16
Figura 2.13	Norma ABNT NBR 7480. 2007.....	19
Figura 3.1	Divisão das seções do tarugo para análise..	23
Figura 3.2	Amostras de ensaio de enrolamento (a) e dobramento (b).....	24
Figura 3.3	Vista transversal treliça..	25
Figura 3.4	Ensaio compressão treliça... ..	25
Figura 4.1	Detalhamento ensaio enrolamento realizado no material. ...	29
Figura 4.2	Detalhamento ensaio enrolamento realizado no material... ..	29
Figura 4.3	Análise metalográfica CA60 4,20 mm na superfície (a), meio raio (b) e núcleo (c)..	30
Figura 4.4	Análise blow-holes seção transversal tarugo..	31
Figura 4.5	Capabilidade %C antes e depois alteração do aço..	32
Figura 4.6	Capabilidade %Mn antes e depois alteração do aço..	33
Figura 4.7	Capabilidade %Si antes e depois alteração do aço.....	33

Figura 4.8	Capabilidade Limite de Escoamento antes e depois alteração do aço..	34
Figura 4.9	Capabilidade Limite de Resistência antes e depois alteração do aço.....	34
Figura 4.10	Capabilidade % alongamento antes e depois alteração do aço..	35
Figura 4.11	Enleio central de solda laminador a frio.....	36
Figura 4.12	Gráfico média mensal de enleios por tonelada.....	37
Figura 4.13	Gráfico total minutos de parada de produção por enleio por mês.....	37
Figura 4.14	Gráfico média enleios diários por mês.....	38
Figura 4.15	Consumo mensal liga FeSiMn (kg/t)..	39
Figura 4.16	Capabilidade Carbono Equivalente (Ceq) antes e depois alteração do aço.. .	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição química inicial do material	20
Tabela 3.2	Composição química proposta	21
Tabela 3.3	Composição química das corridas teste	21
Tabela 4.1	Composição química corridas teste.....	26
Tabela 4.2	Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 1.....	26
Tabela 4.3	Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 2.....	27
Tabela 4.4	Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 3.....	27
Tabela 4.5	Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 4.....	27
Tabela 4.6	Propriedades mecânicas CA60 segundo Norma ABNT NBR 7480.2007	28
Tabela 4.7	Propriedades mecânicas obtidas em cada passe do laminador a frio	30
Tabela 4.8	Faixa de composição química proposta para produção industrial.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

C – Carbono

CA – Concreto armado

Ceq - Carbono equivalente

Cpk - Índice de capacidade do processo

FEA – Forno Elétrico a Arco

FeSiMn - Ferro Silício Manganês

FP – Forno Panela

kg - Kilogramas

L_o – Comprimento inicial

L' – Comprimento final

LC – Lingotamento Contínuo

Mn - Manganês

S – Enxofre

Si - Silício

t – Toneladas

TPP – Tecnologia de Processos e Produtos

RESUMO

Este trabalho tem como objetivos principais a redução de custo em ligas e aumento de produtividade na produção do vergalhão CA60 atendendo as especificações de propriedades mecânicas contidas na norma ABNT NBR 7480 de 2007. Para atingir estes objetivos foram reduzidas as faixas de composição química de elementos C, Si e Mn na aciaria. Posteriormente o tarugo foi laminado a quente produzindo fio-máquina de bitola superior à anteriormente empregada. O fio-máquina de bitola superior foi empregado no laminador a frio elevando as propriedades mecânicas através do mecanismo de encruamento por conformação mecânica, compensando a redução de ligas praticada no aço. O emprego da nova bitola de fio-máquina oportunizou a redução de enleios no processo de laminação a frio, reduzindo drasticamente as paradas de produção geradas por essa espécie de ocorrência. Para verificação de propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração determinando limites de escoamento e resistências, relação elástica e alongamento além de ensaios de dobramento e enrolamento. Ainda foram realizados testes em produtos tais como telas e treliças simulando condições de aplicação semelhantes às do cliente.

ABSTRACT

This work has as main objectives to reduce cost alloy and increased productivity in the production of CA60 as the specifications of mechanical properties in the standard NBR 7480 2007. To achieve these objectives were reduced the chemical composition ranges of elements C, Si and Mn in the melt shop. Later billet was hot rolled producing gauge wire rod higher than previously employed. The higher gauge wire rod was used in cold rolling mill raising the mechanical properties through hardening mechanism by mechanical forming offsetting the reduction in steel alloys practiced. The use of the new gauge wire rod provided an opportunity to “enleios” reduction in cold rolling processes, drastically reducing production downtime generated by this kind of occurrence. For verification mechanical properties, tests were conducted to determine limits and stretching as well as folding and winding tests. Although tests were performed on final products, simulating similar application conditions the client.

1.0 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor altamente impactante na economia brasileira. Os investimentos públicos em infraestrutura e habitação demandaram grandes volumes de aço nos últimos anos.

O vergalhão CA60 é bastante utilizado na construção civil brasileira devido sua alta resistência, capaz de proporcionar estruturas de concreto armado mais leves, sendo indicado para a produção de treliças, telas e estribos. Para produzi-lo, obtendo as propriedades mecânicas estabelecidas na norma ABNT NBR 7480 de 2007, o fio-máquina é submetido ao processo de laminação a frio, em que é necessário ter o controle das variáveis do processo para entender possíveis alterações no mesmo. A laminação a frio é um processo de conformação mecânica que possui como objetivo desenvolver a forma desejada do material, de modo a torná-lo adequado a uma determinada aplicação.

São importantes meios de se atingir as propriedades mecânicas solicitadas na norma a adição de elementos de liga (como consequência ocorre aumento do custo), e o domínio do mecanismo de encruamento na laminação a frio.

Conforme o Instituto AÇO BRASIL, as vendas de produtos siderúrgicos ao mercado brasileiro em setembro de 2015 mostraram queda de 20,7% em relação a 2014, atingindo 1,5 milhão de toneladas. As vendas acumuladas em 2015, de 14,2 milhões de toneladas, tiveram redução de 14,3% com relação ao mesmo período do ano anterior.

Tal cenário de recessão econômica e retração na construção civil no país demandam que a produção de aço se faça de modo competitivo, sendo necessário assim que se realizem cada vez mais pesquisas a fim de desenvolver melhorias nos processos para redução de custos em insumos e matérias primas e aumento de produtividade.

O presente trabalho tem como objetivos principais a redução de custo em ligas e aumento de produtividade na produção do vergalhão CA60 atendendo as especificações de propriedades mecânicas contidas na norma ABNT NBR 7480 de 2007.

Para este fim, objetivou-se:

- Estudar as propriedades mecânicas pertinentes ao vergalhão CA60 tais como limite de escoamento, limite de resistência, relação elástica e alongamento.
- Entender o mecanismo de encruamento no processo de laminação a frio para ganho de propriedades mecânicas.

- Substituição do fio-máquina de entrada na produção do CA60 4,20 mm objetivando a redução de ocorrências de enleios, causadores de longas paradas de produção.
- Reduzir ligas tais como C, Mn e Si fim de reduzir o custo em ligas do aço.

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

O processo de fabricação do material estudado neste trabalho se inicia na produção de aço em aciaria elétrica. Na etapa de Refino Secundário é realizado o ajuste químico através da adição de ligas e à medida que há redução significativa em adição de elementos tais como Si e Mn é necessária maior atenção com os níveis de desoxidação e dessulfuração.

Os processos de conformação mecânica empregam a deformação plástica em um corpo metálico, mantendo sua massa e integridade. Na conformação a frio, o metal apresenta-se encruado ou parcialmente encruado, dependendo das forças envolvidas no processo.

2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO AÇO

A produção do aço é realizada essencialmente através de duas rotas: usinas integradas com conversores a oxigênio (LD/BOF) e usinas semi-integradas com forno elétrico a arco (FEA) (vide figura 2.1). Existem ainda processos responsáveis por um percentual mais baixo na produção mundial, como redução-fusão (RF), EOF (Energy Optimizing Furnace) e redução direta (RD).



Figura 2.1 Principais rotas de produção do aço. Fonte: site institucional da Gerdau (2015).

2.1.1 PRODUÇÃO DE AÇO EM USINAS SEMI-INTEGRADAS

O fluxo de produção nas usinas semi-integradas é menor em relação às usinas integradas, pois não são realizadas as etapas de produção de ferro-gusa. A carga no FEA se constitui de sucata de aço e outras matérias-primas como ferro-gusa sólido e ferro-esponja, dependendo da disponibilidade. A fim de evitar elementos indesejáveis, é requerido um rígido controle de carga metálica (COSTA E SILVA, 2011).

2.1.1.1 PÁTIO DE SUCATAS

É chamado pátio de sucatas o local no qual são realizados o armazenamento, o processamento e o transporte da sucata e demais insumos utilizados como matérias-primas na produção de aço via aciaria elétrica. A sucata é classificada em três categorias principais (retorno interno, industrial e obsolescência) e processada de acordo com suas características, tais como: tamanho, densidade, procedência e composição química.

Em locais como o Brasil, onde a capacidade das empresas de fornecer sucatas processadas para as usinas é baixa, o papel do pátio de sucatas é fundamental na transformação e adequação do material recebido para o uso no FEA (ROSSI, 2014).

2.1.1.2 REFINO PRIMÁRIO – FORNO ELETRICO A ARCO (FEA)

Nessa etapa ocorre a fusão e refino da carga metálica proveniente do pátio de sucatas. O FEA é constituído por uma carcaça metálica coberta por uma abobada, ainda é revestido por painéis refrigerados e tijolos refratários (vide figura 2.2).



Figura 2.2 Forno Elétrico a Arco. Fonte: GERDAU (2013)

A fusão da carga ocorre por meio da radiação do arco gerado em eletrodos de grafita. O refino, nessa fase, caracteriza-se pelo conjunto de reações com o oxigênio, ocasionando a oxidação dos elementos químicos do banho como o carbono, silício, manganês e fósforo (BRUCH, 2012).

As operações do FEA podem ser divididas em 4 etapas, conforme figura 2.3:

- (1) Carregamento de sucata e formadores de escória;
- (2) Fusão;
- (3) Refino primário;
- (4) Vazamento.

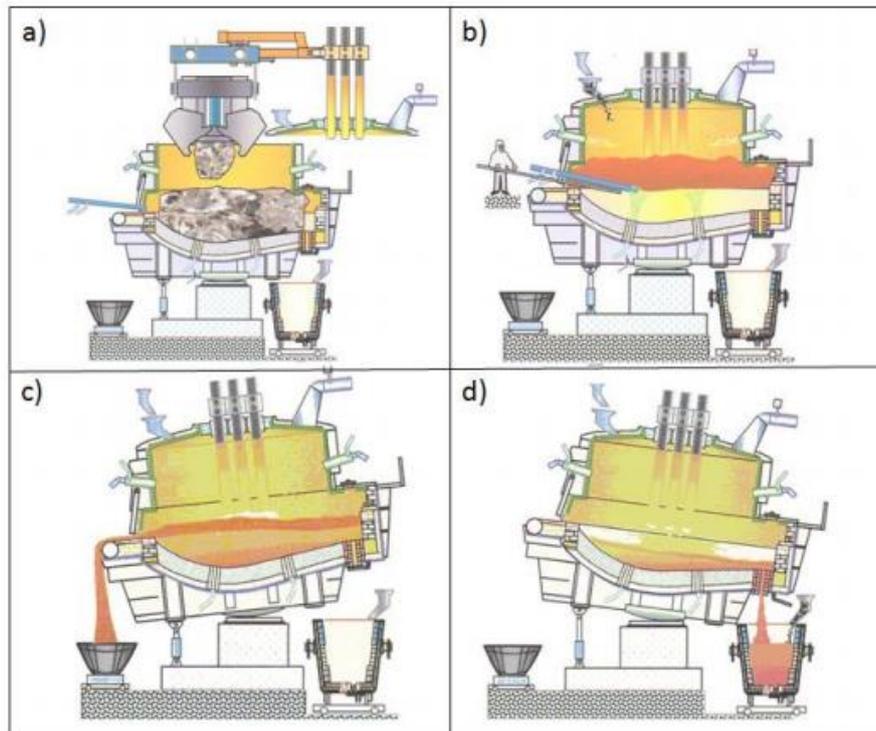


Figura 2.3 Etapas processamento FEA. Fonte: RIZZO (2006)

Durante toda a corrida, paralelamente à fusão gerada pelo arco elétrico, ocorre o aquecimento e fusão da carga através de aporte de energia química proveniente da injeção de gases, que pode ser feita por diversos dispositivos em um forno elétrico (ROSSI, 2014).

2.1.1.3 REFINO SECUNDÁRIO

Na etapa de refino secundário ocorre o ajuste de composição química e temperatura do aço líquido. Via injeção de gás inerte (nitrogênio e/ou argônio) para homogeneização do banho, ajuste térmico da corrida e adições de liga para correção da composição química.

Na produção de aços longos (aços ao carbono) as operações envolvidas no refino secundário ocorrem por aquecimento com energia elétrica no forno-panela, equipamento no qual a própria panela é utilizada como reator para o refino secundário.

Na abóbada do forno-panela há quatro furos, três deles são para os eletrodos de grafita e o último para adição de ligas e amostragem. Há um sistema elétrico cujos equipamentos mais importantes são um transformador e um sistema de transporte chamado *trolley*. O sistema de rinsagem se localiza ao fundo da panela e é realizado através de plug poroso. Tal sistema possibilita manter o aço e a escória nas temperaturas corretas em condições redutoras, fundamental para a dessulfuração e captação de inclusões.

2.1.1.3.1 DESSULFURAÇÃO DO AÇO

À exceção do enxofre e oxigênio, todos os elementos químicos no aço líquido são liberados pelo FEA com um valor um pouco abaixo da faixa de composição química. O enxofre se incorpora ao aço através das impurezas presentes na sucata de aço, no ferro-gusa e aditivos.

O oxigênio e o enxofre são elementos químicos da mesma família na Tabela Periódica, por isso apresentam grande semelhança em seu comportamento físico-químico. Competem entre si por ligantes disponíveis no aço líquido, onde o oxigênio predomina sobre o enxofre. Portanto, a remoção de enxofre do aço líquido só é viável para teores de oxigênio muito baixos. O banho desoxidado é um dos principais requisitos para a remoção de enxofre. Portanto, é necessário garantir tal condição antes do tratamento de dessulfuração do aço. (COSTA, 2012).

As inclusões de sulfetos melhoram a usinabilidade dos aços destinados à construção mecânica, porém diminui a ductilidade na conformação a quente afetando processos como o endireitamento no lingotamento contínuo, a laminação e o forjamento. Na figura 2.4 observa-se que, dependendo da relação Mn/S, há mudança forte na elongação do aço, na faixa de temperatura característica por apresentar baixa ductilidade.

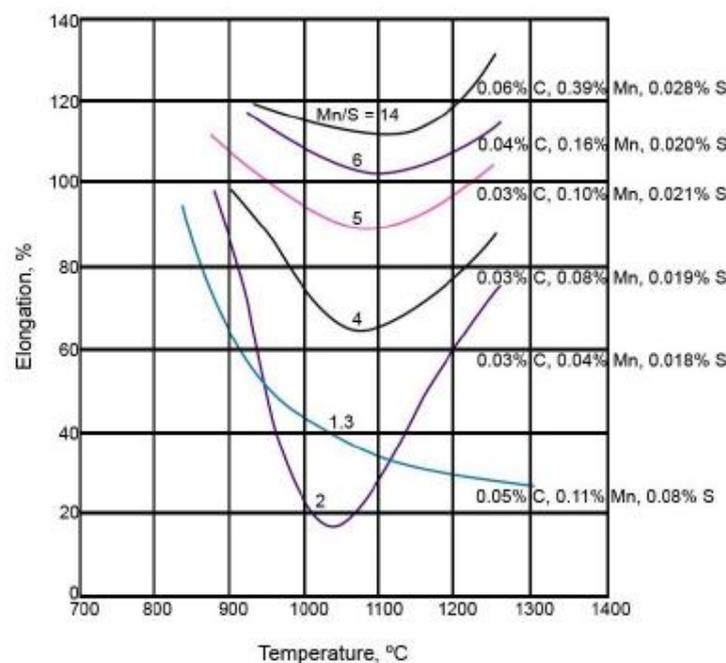


Figura 2.4 Relação elongação do aço e temperatura do processo. Fonte RIZZO (2005)

A adição de Mn ao aço procura evitar a formação de FeS, que possui o comportamento de formar-se nos contornos de grão da austenita provocando a fragilização

a quente do aço. Assim, existe uma relação %Mn/%S mínima para garantir a formação de MnS. A morfologia e a distribuição de MnS também são importantes, e dependem do teor de S no aço, das condições de resfriamento e do grau de desoxidação.

São fatores favoráveis à dessulfuração:

- (1) Atividade do O baixa;
- (2) Atividade do O²⁻ alta;
- (3) Atividade do S²⁻ baixa;
- (4) Coeficiente de atividade do S alto;
- (5) Alto valor da constante de equilíbrio K.

2.1.1.4 LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O lingotamento contínuo é o processo pelo qual se obtém produtos semi-acabados, através do vazamento contínuo de aço por um molde vazado, onde através da extração de calor por refrigeração deste, ocorre o fenômeno de solidificação (KLIEMANN, 2012).

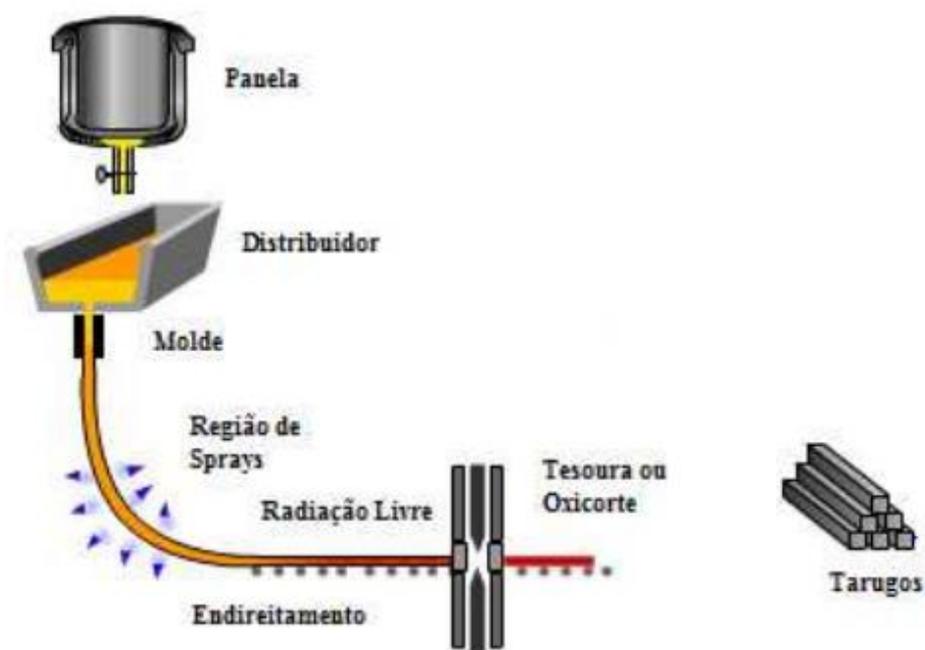


Figura 2.5 Processo lingotamento contínuo. Fonte: KLIEMANN (2012)

A panela de aço líquido pode vaziar de duas maneiras: via jato aberto ou utilizando um tubo guia que fica acoplado ao fundo da panela, sendo de material refratário e contando com proteção gasosa. Em sequência, há a condução do aço líquido ao distribuidor, que

encaminha o mesmo para a solidificação. Para evitar segregação na solidificação pode ser realizada agitação eletromagnética (vide figura 2.5).

A solidificação no lingotamento contínuo ocorre em três etapas, conforme figura 2.6:

- (1) Resfriamento primário: ocorre no molde formando a primeira casca solidificada.
- (2) Resfriamento secundário: ocorre na região de sprays através de jatos de água ou ar/água na superfície do tarugo.
- (3) Radiação livre: ocorre o resfriamento ao ar antes do corte do tarugo.

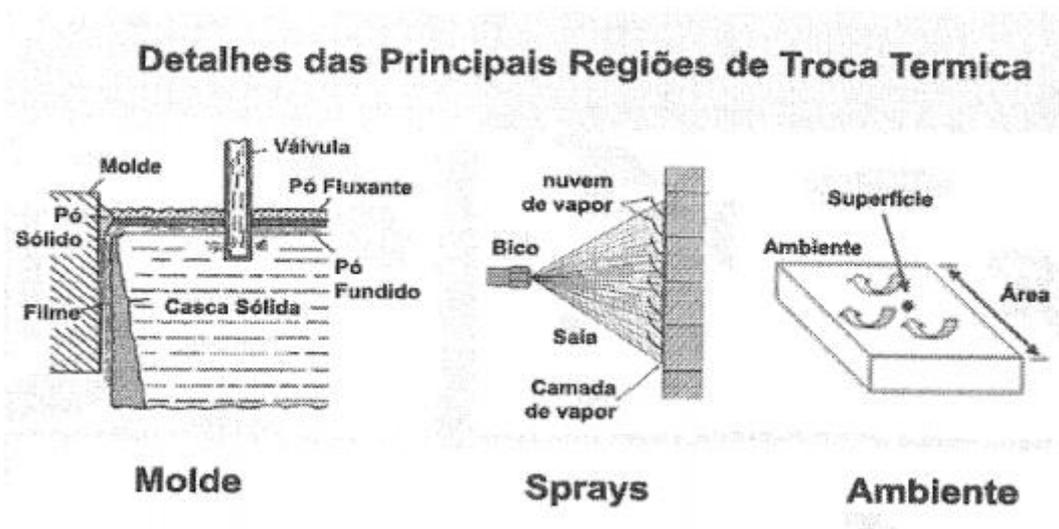


Figura 2.6 Principais regiões de troca térmica no lingotamento contínuo. Fonte: KLIEMANN (2012).

As variações de temperatura em diferentes locais do material em processo de solidificação podem ocasionar diferentes tipos de defeitos. Também são variáveis importantes a velocidade de lingotamento e a taxa de extração de calor.

2.2 ARAME NERVURADO PARA CONCRETO ARMADO – VERGALHÃO

O uso do concreto armado é um método de construção rápido, de baixo custo e eficaz, e neste tipo de estrutura, a inclusão de barras nervuradas fornece a resistência e estabilidade para o concreto (MILBOURN 2010). É conhecida como concreto armado à estrutura que soma ao concreto barras nervuradas de aço – conhecidas comercialmente como vergalhões.

O concreto é altamente resistente a forças de compressão, todavia não resiste a cargas cisalhantes ou trativas. Dessa forma, combina-se o concreto com o aço que possui alta resistência a tração, além de boa ductilidade e tenacidade. A similaridade dos coeficientes de expansão térmica desses dois materiais, a versatilidade de conformação, montagem e

baixo custo na construção garantiram o desenvolvimento das aplicações destes dois materiais ao longo da história (NUNES 2009).

A produção de vergalhão é realizada na indústria siderúrgica através do processo de laminação. Pode ser realizado a frio, abaixo da temperatura de austenitização e utilizando fio-máquina originário da laminação a quente como sua matéria-prima. Ou a quente, acima da temperatura de austenitização e utilizando o tarugo originário da aciaria como sua matéria-prima.

2.3 PROCESSOS DE LAMINAÇÃO

A laminação é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo a produção de chapas, barras e perfis existindo como característica uma alta velocidade de operação produzindo grandes volumes com boas tolerâncias dimensionais dos produtos e melhoria de suas propriedades como ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial (SHAEFFER, 2004).

O processo de obtenção de produtos laminados é dividido nas etapas:

- (1) Preparação do material inicial para a laminação;
- (2) Aquecimento do material inicial;
- (3) Laminação a quente;
- (4) Acabamento e/ou tratamento térmico (caso de ser produto final);
- (5) Decapagem;
- (6) Laminação a frio (caso seja necessário);
- (7) Tratamento térmico;
- (8) Acabamento e revestimento.

Os produtos laminados são classificados em acabados ou semiacabados sendo considerada sua aplicabilidade direta. São semi-acabados, ou intermediários, os produtos em que praticamente não existe aplicação direta para os mesmos, exceto para posterior processamento por laminação, extrusão e trefilação, que os transformarão em produtos finais, ou seja, acabados. O vergalhão CA60, estudado neste trabalho, é produzido a partir de tarugo laminado a quente para produção do produto intermediário fio-máquina e posterior laminação a frio para produção do produto final.

O produto final desejado deve ser homogêneo em sua microestrutura. Para atingir tais especificações de homogeneidade e tolerância é necessário um importante controle de todo o processo de fabricação, onde devem ser observadas as deformações que devem ser as

menores possíveis e também a variação da composição química da matéria-prima. Porém, para se conseguir estas condições impostas, alguns limites devem ser respeitados, como o atendimento das limitações do equipamento disponível, manutenção e controle de qualidade durante todas as etapas do processo e atendimento a segurança pessoal.

2.3.1 LAMINAÇÃO A QUENTE

O processo consiste na conformação mecânica do tarugo através da passagem em sequência entre dois cilindros que giram em sentido opostos com canais usinados, sendo a distância entre os cilindros menores que a seção transversal da peça em processo. O material é submetido a tensões compressivas resultante da prensagem entre os dois cilindros e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito com a superfície dos canais usinados nos cilindros (NUNES, 2009).

A laminação de tarugos pode seguir três vias distintas: em laminadores de perfis (leves, médios ou pesados) obtendo-se perfis estruturais e trilhos; em laminadores de barras ou de fios, resultando diversos tipos de barras e aos fios- máquina; e em laminadores de tubos sem costura. A maior parte da laminação de tarugos até o produto final é feita a quente.



Figura 2.7 Fio-máquina. Fonte: Gerdau Riograndense.

O fio-máquina (figura 2.7) produzido por laminação a quente é usado no Brasil e em outros países como matéria-prima para arames e vergalhões para construção civil. Em sua fabricação podem ser utilizados aços de baixo a alto carbono e aços ligados (HISSANAGA, 2013). O diâmetro do material varia de 5,5 a 32,00 mm sendo esférico ou sextavado.

No processo de produção o tarugo é aquecido no forno de reaquecimento que proporciona o fluxo adequado de calor. A função dos fornos de reaquecimento é alcançar uma temperatura na qual os tarugos estejam suficientemente plásticos para permitir a redução da seção desejada sem haver fusão da superfície externa que pode causar trincas e tensões internas, devido a diferenças muito grandes de temperatura entre o núcleo e a superfície do material.

Grandes reduções ocorrem durante o desbaste e no trem médio para regulagem de diferentes bitolas. No bloco acabador, a velocidade de laminação aumenta para aproximadamente 95m/s. Após estas etapas do processo, o material é resfriado e segue para o formador de espiras. O mesmo é composto por um tubo que gira em velocidade ajustada para cada bitola a ser produzida, formando uma espira de fio. Em seguida as espiras vão para a mesa transportadora no Stelmor (processo de resfriamento) e seguem para o coletor, onde são transformados em bobinas que em seguida são compactadas.

2.3.2 LAMINAÇÃO A FRIO

Na laminação a frio, o material é processado através de cassetes laminadores, que são compostos por dois trios de discos de metal duro que estão dispostos a 120° entre si, conforme figura 2.8. Tal processo vem sendo utilizado em larga escala para produção de vergalhão.

Três discos na entrada do cassete fazem a primeira redução e na sequência mais três na saída fazem a segunda redução na seção do fio.

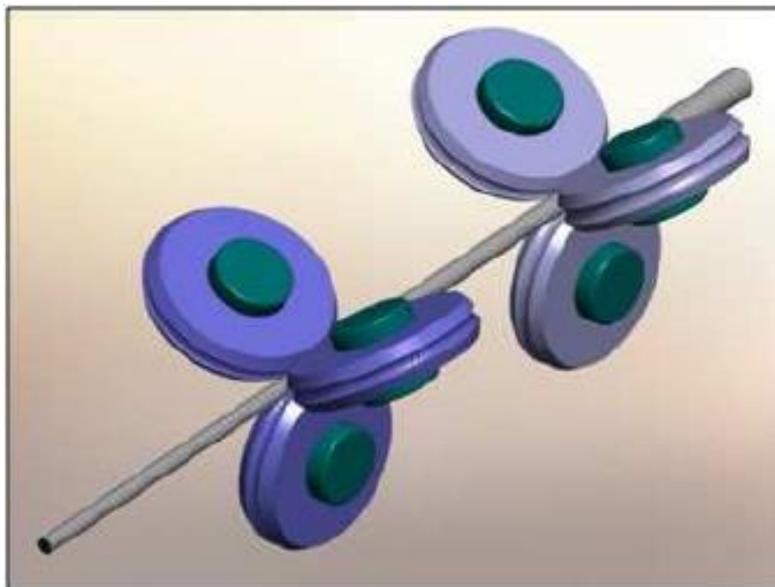


Figura 2.8 Esquema de funcionamento da redução da área do fio-máquina pelos discos de metal duro dispostos a 120° um do outro. Fonte: ROCHA (2012)

O vergalhão CA60 é produzido com aço de baixo teor de carbono, apresenta ótima soldabilidade, além de maior aderência do aço ao concreto, melhor ancoragem nas estruturas e melhor combate à fissuração do concreto. É produzido nervurado, nas versões reto, em rolo e em bobina (figura 2.10) e em conformidade com o CA 60 da norma brasileira ABNT NBR 7480, certificado pela ABNT/Inmetro.



Figura 2.9 Vergalhão CA60. Fonte: Gerdau Riograndense (2015)

O processo de fabricação do vergalhão CA60 utilizado em concreto armado com tensão de escoamento de 600 MPa, inicia-se com a soldagem do fio-máquina e decapagem mecânica onde a carepa de laminação é retirada através da passagem do fio máquina por

rolos em diferentes ângulos. Então, é aplicada uma camada de lubrificante, em seguida é realizada a redução do diâmetro do fio-máquina no laminador a frio. Nesta etapa o material se chama fio de aço, até o mesmo ser bobinado em bobinas (espulas) de vários diâmetros (ROCHA,2012).

Na laminação a frio, os mecanismos de encruamento e recristalização proporcionam alterações microestruturais responsáveis por mudanças consideráveis nas propriedades mecânicas. O encruamento de um metal aumenta os seus limites de escoamento e resistência e diminui o alongamento, enquanto que a recristalização restaura essas propriedades. Conforme Schaeffer (1995), o escoamento do material é resultado da pressão transmitida da matriz para a peça conformada.

2.4 ENCRUAMENTO

O encruamento de um metal é definido como o endurecimento por deformação plástica a frio, sendo assim um importante mecanismo utilizado para endurecer ligas metálicas. Sua taxa pode ser verificada pela inclinação da curva de escoamento (HISSANAGA 2013).

A tensão necessária para provocar a deformação é relativamente baixa em processo de deformação plástica. No decorrer do processo, multiplicam-se as discordâncias aumentando sua densidade no cristal e se acentua o efeito de interação entre elas. Assim, se dificulta a movimentação das discordâncias, exigindo, portanto, níveis de tensão mais elevados, para provocar a deformação. Esse fenômeno, caracterizado pelo aumento da intensidade da tensão para provocar a deformação plástica. Nos metais, o encruamento ocorre na região da deformação plástica pelo movimento das discordâncias que interagem entre si, com outras imperfeições do metal, ou indiretamente com o campo de tensões internas que são obstáculos.

Vários processos podem contribuir para o encruamento do material, tais como o refino de grão, as falhas de empilhamento, as transformações de fase e a multiplicação de discordâncias. Um alto coeficiente de encruamento implica em várias discordâncias deslizando nos sistemas que se interceptam mutuamente. Isso pode ocorrer por meio das interações dos seus campos de tensão e formação das discordâncias bloqueadas e também por meio da formação de degraus de discordâncias. A laminação a frio provoca o encruamento dos grãos e como consequência aumenta o limite de resistência. Ela prejudica as propriedades relacionadas com a ductilidade e tenacidade e assim esse efeito é mais acentuada quanto mais intensa a deformação produzida de acordo com a figura 2.10.

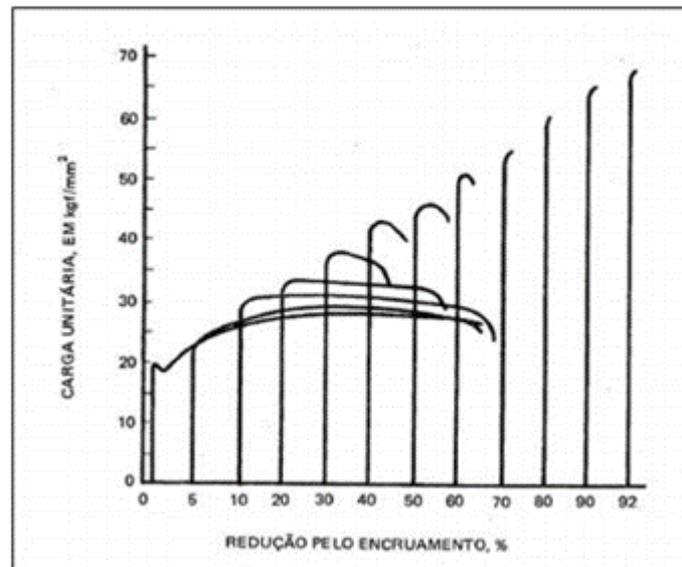


Figura 2.10 Relação deformação mecânica e efeito encruamento no material. Fonte: CHIAVERINI (2005).

2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A resistência do aço aumenta em função do aumento da deformação a frio do material, conforme figura 2.11. Isto pode ser verificado na redução da área, e também é possível observar que quanto maior a quantidade de carbono no aço, maior a resistência.

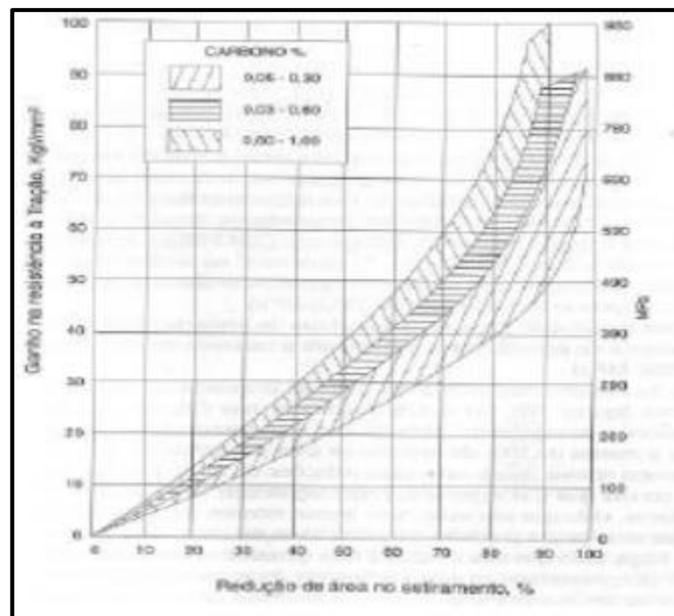


Figura 2.11 Efeito da redução em área no aumento da resistência a tração. CHIAVERINI (2005)

Na laminação a frio aumentam propriedades mecânicas do vergalhão, tais como resistência a tração e tensão de escoamento, conforme aumenta o encruamento causado pela

redução de área nos sucessivos passes. Todavia, o alongamento e a estrição diminuem (vide figura 2.12).

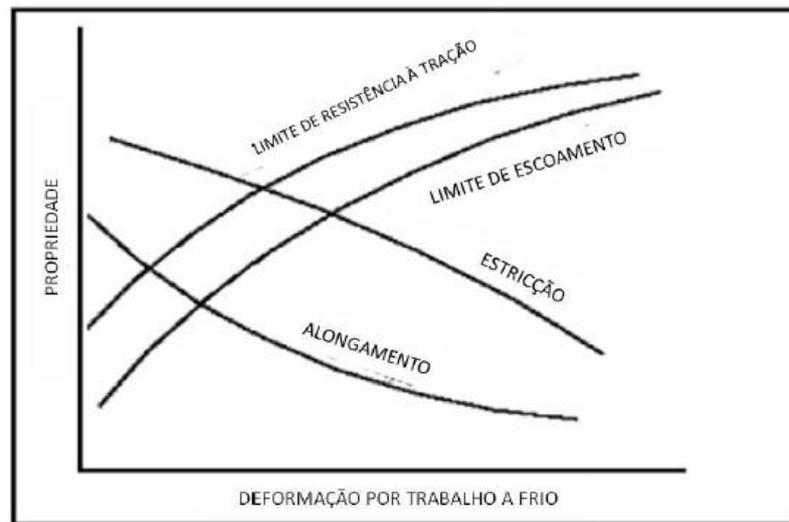


Figura 2.12 Variação das propriedades mecânicas no trabalho a frio. Fonte: Dieter (1981).

As três propriedades mecânicas analisadas em um CA60 conforme a norma NBR 7480 de 2007 são:

- (1) Limite de escoamento: máxima resistência que o material pode sofrer em serviço. O vergalhão em uma estrutura de concreto deve possuir adequada resistência ao escoamento para que suporte as cargas às quais será submetida.
- (2) Alongamento: medida da capacidade de suportar deformação antes da ruptura. Essa propriedade está diretamente relacionada a ductilidade do material e em geral, há uma relação inversa entre resistência e ductilidade. O alongamento é o aumento do comprimento verificado na tração até a ruptura do corpo de prova (CHIAVERINI, 2005).
- (3) Relação elástica: relação entre o limite de resistência e o limite de escoamento do vergalhão. Mede a capacidade do material em suportar cargas antes de sofrer deformações plásticas. Um elevado valor desta propriedade evidencia uma maior capacidade de absorção de energia antes da falha.

2.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração proporciona ao engenheiro de projeto conhecer as condições de resistência do material sem que sofra a deformação permanente e superada a fase elástica, conhecer até que carga o material pode suportar.

Ensaio mecânico sinaliza características tais como as propriedades mecânicas do material podendo ser usados na comparação de propriedades entre diversos materiais, na constatação da influência das condições de fabricação, de tratamentos e da utilização dos materiais. É utilizada uma amostra de material cujas propriedades se quer medir, de forma e dimensões especificadas. A essa amostra representativa dá-se o nome de “corpo de prova”. (CHIAVERINI)

Para caracterização de CA60 usa-se o teste de tração onde se observa o aumento na resistência mecânica e a redução da ductilidade do material conforme o aumento do valor de deformação prévia.

Para avaliar o alongamento, após o ensaio de tração, colocam-se as duas metades do corpo de prova juntos. L_0 é o comprimento original, estabelecido de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892 como 10 diâmetros nominais, não sendo permitido o uso de corpo-de-prova usinado, e L' o final. Dessa forma o alongamento é dado pela expressão:

Equação 4.1 Expressão para cálculo do alongamento.

$$E = \left(\frac{L' - L_0}{L_0} \right) \cdot 100 \text{ (em porcentagem)}$$

A excentricidade do corpo ao ser preso à máquina de ensaio pode causar distribuição não uniforme de tensões ao longo do corpo de prova e a velocidade de aplicação da carga com velocidades crescentes tende a aumentar a resistência e diminuir a ductilidade afetam o resultado do ensaio.

2.7 NORMA ABNT NBR 7480.2007

As barras e fios de aço destinados a armaduras para estruturas de concreto armado, com ou sem revestimento superficial, produzidos no Brasil precisam atender os requisitos estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 7480.2007. Para os efeitos dessa Norma, classificam-se como barras os produtos de diâmetro nominal 6,30 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica.

Classificam-se como fios aqueles de diâmetro nominal 10,00 mm ou inferior, obtidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

De acordo com o valor característico da resistência de escoamento, as barras de aço são classificadas nas categorias CA-25 e CA-50, e os fios de aço na categoria CA-60 (vide figura 2.13).

Tabela B.3 — Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado

Categoria	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento a 180 °		Aderência	
	Resistência característica de escoamento ^a f_{yk} MPa ^e	Limite de resistência ^b f_{st} MPa ^f	Alongamento após ruptura em 10 Φ ^c A %	Alongamento total na força máxima ^d A_{gt} %	Diâmetro do pino mm.		Coeficiente de conformação superficial mínimo η	
					$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	$\Phi > 10$ mm	$\Phi \geq 10$ mm
CA-25	250	1,20 f_y	18	-	2 ϕ	4 ϕ	1,0	1,0
CA-50	500	1,08 f_y	8	5	3 ϕ	6 ϕ	1,0	1,5
CA-60	600	1,05 f_y ^c	5	-	5 ϕ	-	1,0	1,5

^a Valor característico do limite superior de escoamento f_{yk} da ABNT NBR 6118 obtido a partir do LE ou δ_b da ABNT NBR ISO 6892.

^b O mesmo que resistência convencional à ruptura ou resistência convencional à tração (LR ou δ_t da ABNT NBR ISO 6892).

^c Φ é o diâmetro nominal, conforme 3.4.

^d O alongamento deve ser atendido através do critério de alongamento após ruptura (A) ou alongamento total na força máxima (A_{gt}).

^e Para efeitos práticos de aplicação desta Norma, pode-se admitir 1 MPa = 0,1 kgf/mm².

^f f_{st} mínimo de 660 MPa.

Figura 2.13 Norma ABNT NBR 7480. 2007. Fonte ABNT (2007).

3.0 MATERIAIS E METODOS

A motivação do presente trabalho é obter as propriedades mecânicas do vergalhão CA60 conforme a norma NBR ABNT 7480 de 2007 utilizando um material com redução de elemento de liga e com diâmetro de fio-máquina maior do que o habitual para realizar a laminação a frio. Utilizar este material trará benefícios tais como, redução de custo e aumento de produtividade devido à redução de enleios.

O aço empregado é produzido em aciaria elétrica e utiliza sucata metálica como matéria-prima. O ajuste de composição química e adição de ligas ocorreram em refino através de forno-panela e a solidificação realizada em lingotamento contínuo produzindo tarugos com seção 120x120mm.

Os tarugos foram encaminhados para a laminação de fio-máquina e reaquescidos em um forno que utiliza gás natural como combustível até a temperatura de aproximadamente 1150° C. Em sequência, o tarugo foi para o trem de laminação com 22 passes. Após o resfriamento do fio-máquina ao ar o mesmo é empregado no laminador a frio em 3 passes atingindo velocidades de até 18 m/s para produção do CA60 em bobinas que serão destinadas a clientes externos ou aplicadas em telas e treliças.

3.1. MATERIAIS

O material inicialmente estudado é o vergalhão CA-60 diâmetro 4,20 mm proveniente do fio-máquina diâmetro 6,30 mm. A tabela 3.1 apresenta a composição química desse aço.

Tabela 3.1 Composição química inicial do material estudado.

Elemento químico	C	Mn	Si
%	0,13	0,60	0,10
	0,17	0,90	0,25

Os testes foram realizados buscando a composição química proposta, conforme tabela 3.2, utilizando fio-máquina de diâmetro 7,00 mm.

Tabela 3.2 Composição química proposta.

Elemento químico	C	Mn	Si
%	0,11	0,40	0,07
	0,15	0,70	0,20

Demais teores dos elementos encontrados no aço não serão mencionados no trabalho por motivos de sigilo da empresa.

3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As amostras para análise de composição química foram retiradas durante a produção da corrida na aciaria. Os resultados de composição química foram obtidos por meio da análise realizada por espectroscopia de emissão óptica.

Foram realizadas 10 corridas de teste em escala industrial, nesse trabalho serão abordadas 4 delas. As corridas 1 e 2 foram produzidas objetivando a composição mínima da faixa proposta e as corridas 3 e 4 foram produzidas objetivando a faixa máxima proposta, vide tabela 3.3.

Tabela 3.3 Composição química das corridas teste.

	C	Mn	Si
CORRIDA 1	0,11	0,49	0,078
CORRIDA 2	0,10	0,39	0,08
CORRIDA 3	0,18	0,61	0,17
CORRIDA 4	0,15	0,65	0,14

As análises de composição química dos testes foram realizadas através de um Espectrometro de Emissao Optica modelo ARL 3460-AES. As análises foram realizadas no laboratório no setor de Tecnologia de Processos e Produtos (TPP) da usina Gerdau Riograndense.

3.2.1 CORRIDAS 1 e 2

As corridas 1 e 2 foram realizadas objetivando a composição química mínima proposta, as análises contidas na tabela 3.3 se referem à amostra retirada no 7º tarugo no lingotamento contínuo. As análises foram realizadas em tais amostras a fim de minimizar possíveis erros devido misturas de corridas ou homogeneização ineficiente.

Nas corridas realizadas objetivando a composição química mínima, a atenção voltou-se ao atendimento das propriedades mecânicas no vergalhão, principalmente os limites de escoamento e ruptura e alongamento devido à redução significativa dos teores de carbono e manganês no aço. O teor de Si também se tornou um ponto de atenção devido à função desoxidante do Si no aço. Assim, foi realizada análise de blow-holes.

3.2.2 CORRIDAS 3 e 4

As corridas 3 e 4 foram realizadas objetivando composição química máxima proposta, as análises assim como nas corridas 1 e 2 se referem à amostra retirada no 7º tarugo no lingotamento contínuo.

As corridas realizadas objetivando a composição máxima se tornam relevantes devido à troca de bitola de fio-máquina do 6,30 mm para o 7,00 mm, ocasionando aumento significativo de propriedades mecânicas devido à mudança na taxa de conformação mecânica ocasionadora de encruamento.

Apesar de a norma não especificar limites máximos de propriedades mecânicas, limites de escoamento e ruptura excessivamente elevados em vergalhões não são interessantes para algumas aplicações do cliente final e causam quebras prematuras em dobra. Assim, nessas corridas tornaram-se ponto de atenção os ensaios de dobramento e enrolamento no produto final.

3.3 ENSAIO EM TARUGO

Para análise de blow holes, foi praticado um corte transversal de aproximadamente 2 cm de espessura na amostra de tarugo. A superfície foi dividida em 4 partes, conforme figura 3.1, a fim de mapear e realizar a contagem de blow holes através do Estereoscópio Zeiss com aumento de 8 vezes.

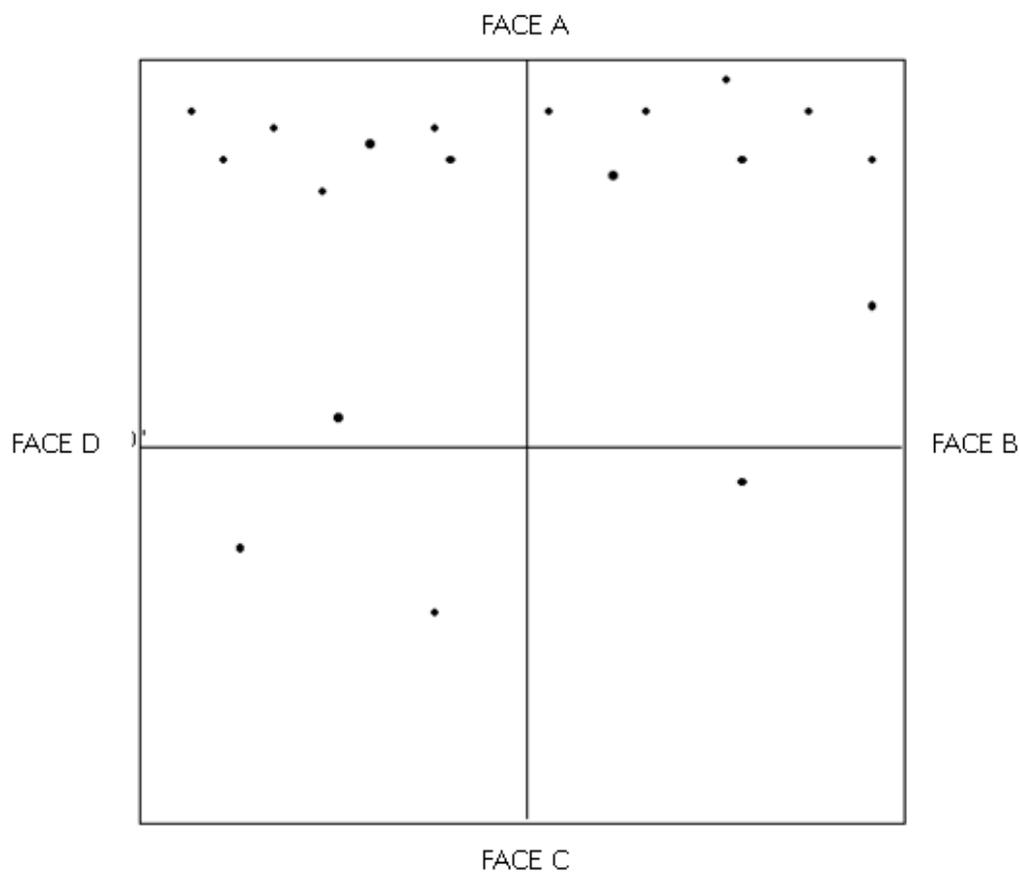


Figura 3.1 Divisão das seções do tarugo para análise.

3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS CA60

Os ensaios para determinação de propriedades mecânicas do CA60 também foram realizados no laboratório de ensaios físicos na própria área industrial na qual o material foi produzido seguindo, assim, o mesmo padrão de liberação de materiais praticado na produção.

Os testes utilizaram máquina de tração e as amostras foram retiradas das espiras de vergalhão durante o processo (para caracterização de propriedades mecânicas passe a passe) e após a finalização do processo. Ao todo foram 4 amostras para caracterização passe a passe e 28 amostras do produto final.

As amostras foram endireitadas e cortadas em um comprimento de 300 mm e marcadas a cada 42 mm para determinação de alongamento após a ruptura. A temperatura e umidade relativa do ar do laboratório de ensaios são monitorados e mantidos dentro de limites especificados para que não ocorra comprometimento dos resultados.

Foram medidas massa linear da amostra, realizados ensaio de tração para determinação de limites de escoamento e ruptura, alongamento e relação elástica e ensaios de dobramento e enrolamento.

Os ensaios de dobramento foram realizados aplicando dobramento em 180° no material com suas extremidades livres utilizando pino de diâmetro igual a duas vezes o diâmetro nominal do vergalhão. Os ensaios de enrolamento foram realizados aplicando o enrolamento do material em seu próprio eixo por no mínimo 4 voltas, tal ensaio não se faz presente como uma exigência da norma ABNT NBR 7480, porém é realizado para garantia de qualidade em aplicações semelhantes à do cliente final.

Ambas amostras, vide figura 3.2 , são observadas sem auxílio de lentes ou lupa e não devem apresentar rupturas, trincas ou defeitos superficiais.



Figura 3.2 Amostras de ensaio de enrolamento (a) e dobramento (b).

3.5 ENSAIOS NO PRODUTO FINAL

O CA60 produzido em teste foi submetido à produção de telas e treliças e as mesmas foram testadas em suas propriedades mecânicas e qualidade de solda. Na produção de treliças, são pontos de atenção à aplicação do material na senóide, vide figura 3.4, devido à possibilidade de quebra prematura ao sofrer dobramento e na solda. Assim foram realizados ensaios de compressão da treliça, vide figura 3.5, como parte dos testes.

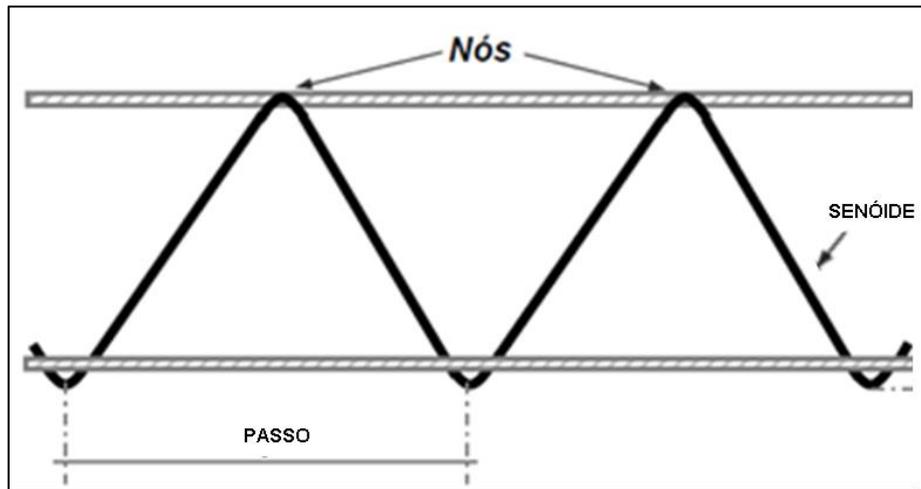


Figura 3.3 Vista transversal treliça.

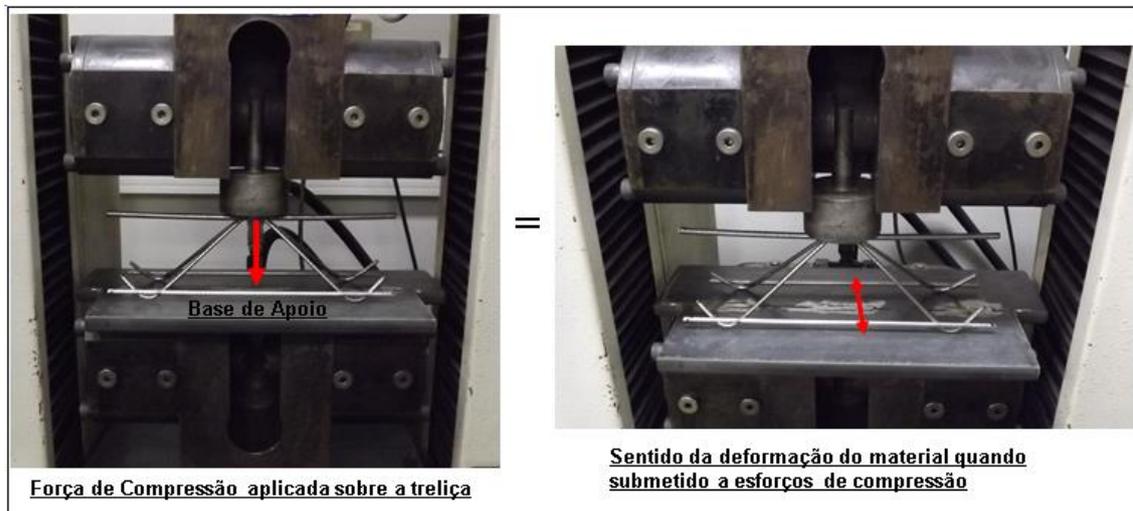


Figura 3.4 Ensaio de compressão treliça.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CORRIDAS TESTE

Neste trabalho serão apresentados os resultados de 7 amostras por teste, vide tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. A composição das corridas teste está na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Composição química corridas teste.

	C	Mn	Si
PROPOSTA	0,11	0,40	0,07
	0,15	0,70	0,20
CORRIDA 1	0,11	0,49	0,07
CORRIDA 2	0,10	0,39	0,08
CORRIDA 3	0,18	0,61	0,17
CORRIDA 4	0,15	0,65	0,14

Tabela 4.2 Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 1.

Amostra	Massa linear (g/mm)	Limite Escoamento (Mpa)	Limite Resistência (Mpa)	Relação Elástica (Lr/Le)	Alongamento (%)
1.1	0,107	730,64	795,86	1,09	6,14
1.2	0,107	737,19	789,38	1,07	6,48
1.3	0,107	735,86	785,24	1,07	7,48
1.4	0,106	731,02	780,62	1,07	7,15
1.5	0,106	731,52	779,01	1,07	6,67
1.6	0,106	712,54	754,81	1,06	6,56
1.7	0,106	729,24	763,20	1,05	8,57
Média	0,106	729,72	778,30	1,07	7,00
Desvio	0,001	8,110	14,519	0,012	0,818

Tabela 4.3 Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 2.

Amostra	Massa linear (g/mm)	Limite Escoamento (Mpa)	Limite Resistência (Mpa)	Relação Elástica (Lr/Le)	Alongamento (%)
2.1	0,107	696,07	734,41	1,06	5,05
2.2	0,107	713,58	749,62	1,05	5,08
2.3	0,106	741,83	789,12	1,06	6,64
2.4	0,106	723,42	771,18	1,07	6,50
2.5	0,106	715,80	762,80	1,07	6,10
2.6	0,106	726,65	766,47	1,05	6,17
2.7	0,107	744,49	796,44	1,07	7,19
Média	0,106	723,12	767,15	1,06	6,10
Desvio	0,001	16,811	21,430	0,009	0,794

Tabela 4.4 Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 3.

Amostra	Massa linear (g/mm)	Limite Escoamento (Mpa)	Limite Resistência (Mpa)	Relação Elástica (Lr/Le)	Alongamento (%)
3.1	0,111	787,29	862,61	1,1	6,19
3.2	0,11	823,76	890,62	1,08	5,71
3.3	0,111	806,48	874,56	1,08	7,62
3.4	0,112	796,91	864,43	1,08	6,67
3.5	0,111	798,16	865,53	1,08	6,19
3.6	0,114	800,43	877,46	1,1	5,48
3.7	0,116	792,06	869,93	1,1	5,71
Média	0,112	800,73	872,16	1,09	6,22
Desvio	0,002	11,836	9,785	0,011	0,734

Tabela 4.5 Propriedades mecânicas CA60 produzido com a corrida 4.

Amostra	Massa linear (g/mm)	Limite Escoamento (Mpa)	Limite Resistência (Mpa)	Relação Elástica (Lr/Le)	Alongamento (%)
4.1	0,109	732,52	810,86	1,11	8,93
4.2	0,109	740,49	819,92	1,11	8,69
4.3	0,109	745,34	815,87	1,09	6,29
4.4	0,103	750,63	819,03	1,09	8,71
4.5	0,102	751,20	828,93	1,10	7,55
4.6	0,103	753,62	826,63	1,10	9,60
4.7	0,108	728,71	796,83	1,09	8,86
Média	0,106	743,19	816,87	1,10	8,38
Desvio	0,003	9,666	10,750	0,009	1,102

Conforme padrão estabelecido pela norma ABNT NBR 7480.2007, vide tabela 4.6, observa-se que todos os ensaios estão dentro do limite especificado.

Tabela 4.6 Propriedades mecânicas CA60 segundo norma ABNT NBR 7480.2007

Massa linear (g/mm)	Limite Escoamento (Mpa)	Limite Resistência (Mpa)	Relação Elástica (Lr/Le)	Alongamento (%)
0,109 (+-6%)	mín. 600	mín. 630	mín. 1,05	mín. 5

Comparando as corridas 1 e 2, observa-se que a massa linear é semelhante obtendo inclusive a mesma média entre as 7 amostras de cada corrida. A massa linear se encontra no mínimo estabelecido o que é causado propositalmente através do ajuste dos cassetes laminadores, pois se costuma trabalhar no limite mínimo da massa linear para redução de custo no produto final. Na corrida 1 observa-se maiores limites de escoamento e resistência, bem como maior relação elástica e alongamento. Tais resultados também são esperados, pois a corrida 1 possui teores de C e Mn superiores à corrida 2. O desvio padrão entre as análises da corrida 1 é superior à corrida 2.

Comparando as corridas 3 e 4, a primeira apresenta limites de escoamento e resistência, relação elástica bastante superior e alongamento inferior. Tal resultado se dá pelo alto teor de ligas na corrida que foi objetivada dessa forma propriamente para testar o limite superior em ligas em conjunto à alta taxa de conformação mecânica.

Ao observar as corridas 1, 2 e 4 percebe-se que as três apresentam limite de escoamento semelhante, porém a corrida 4 apresenta maior limite de resistência e alongamento evidenciando maior influência do teor de liga nessas propriedades. Comparando essas três corridas com a corrida 3, atenta-se que a última apresentou limites de escoamento e resistência bastante superiores e alongamento inferior. Tal resultado evidencia a influência do teor de carbono nas propriedades mecânicas.

4.1.2 ENSAIOS DE DOBRAMENTO E ENROLAMENTO

As corridas 1, 2 e 4, vide figura 4.1, apresentaram ensaios de dobramento e enrolamento satisfatórios conforme critérios já expostos nesse trabalho em todas as amostras. Amostras da corrida 3, apresentaram ensaio de dobramento satisfatório, porém

no ensaio de enrolamento apresentaram fissura já na primeira volta sobre o próprio eixo conforme destaque na figura 4.2, não atendendo então esta propriedade física.



Figura 4.1 Detalhamento do ensaio de dobramento realizado no material.

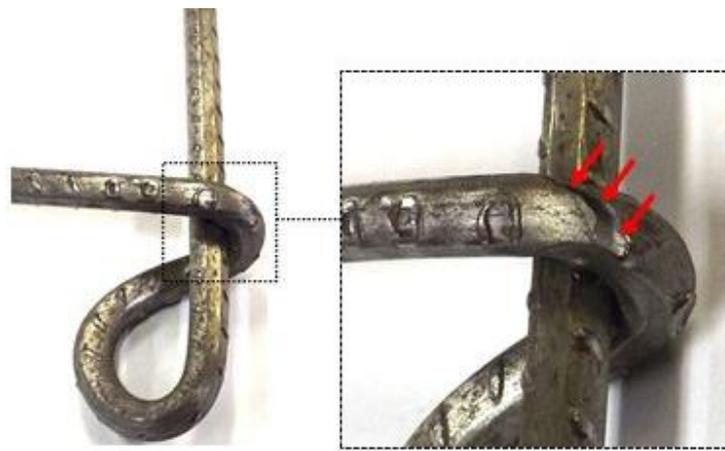


Figura 4.2 Detalhamento dos ensaios de enrolamento realizado no material.

4.1.3 ANÁLISE METALOGRAFICA

Na figura 4.3 observa-se a caracterização em microscópio óptico do CA60 4,20mm em três pontos do perfil longitudinal (superfície, meio raio e núcleo). Observa-se que nas três análises os grãos de ferrita e perlita se apresentam com encruamento decorrente do processo de laminação a frio.

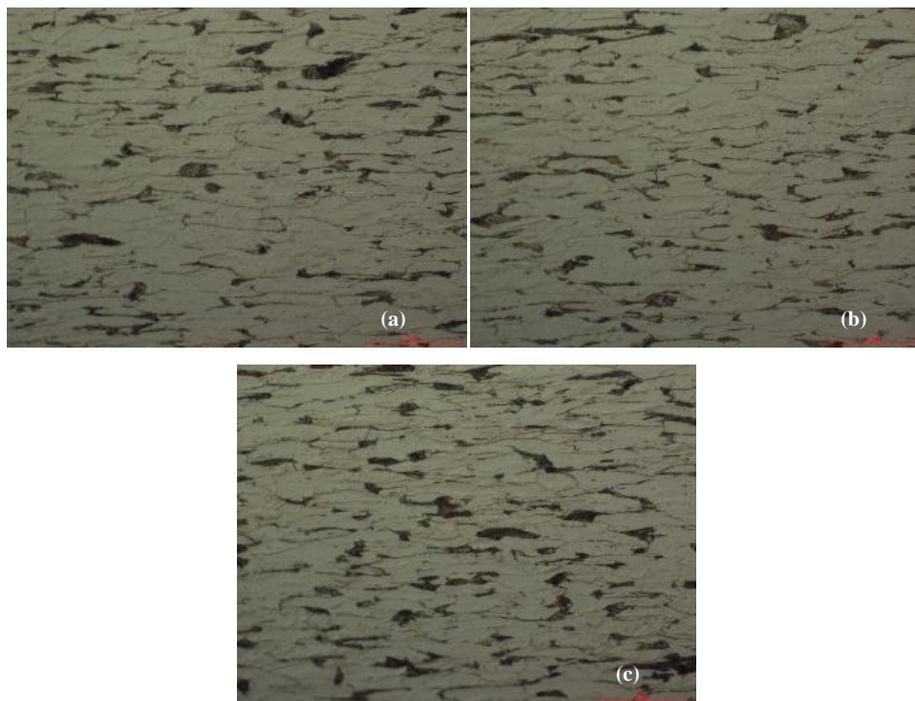


Figura 4.3 Análise metalográfica CA60 4,20 mm na superfície (a), meio raio (b) e núcleo (c).

4.1.4 AMOSTRAGEM PASSE A PASSE

Na tabela 4.7 estão as propriedades mecânicas para cada passe, de um total de 3 passes do laminador a frio, do material.

Tabela 4.7 Propriedades mecânicas obtidas em cada passe do laminador a frio.

	Bitola (mm)	Redução (%)	Limite Escoamento (Mpa)	Limite Resistência (Mpa)	Relação Elástica (Lr/Le)	Alongamento (%)
Fio máquina	7,12	0,00	321,50	447,00	1,39	29,72
1º passe	5,84	17,14	607,00	710,80	1,17	5,89
2º passe	4,77	17,24	755,20	816,40	1,08	5,13
3º passe (CA60)	4,21	12,50	765,50	858,00	1,12	5,10

É notório o ganho em limites de escoamento e resistência e perda em alongamento após o 1º passe no laminador a frio. Ao usar o fio-máquina bitola média 6,30 mm, o material era submetido a redução de 7,94% no primeiro passe. Ao mudar para bitola 7,00 mm a redução passa a ser 17,14%. O primeiro passe imprerivelmente será no qual ocorrerá o maior ganho de propriedades mecânicas, pois o material ainda não sofreu encruamento.

O 3º passe pratica a menor redução e o material já está altamente encruado e assim há menor ganho de propriedades mecânicas e menor perda de alongamento, o que é favorável pois permite que o produto final esteja dentro do limite mínimo especificado pela norma.

4.1.5 ANÁLISE TARUGO

Foi realizada análise em tarugo da corrida 1, vide figura 4.4, por ser a corrida com menores teores de Mn e Si, que são elementos desoxidantes do aço. Foram contabilizados 44 blow-holes, valor aceitável em nível de qualidade interna do aço.

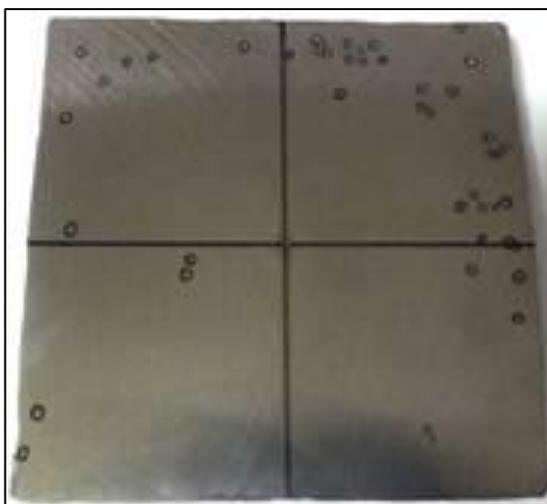


Figura 4.4 Análise de blow-holes seção transversal tarugo.

4.2 PRODUÇÃO EM ESCALA INDUSTRIAL

No mês de outubro foi dado início a produção com a nova composição química e nova bitola de fio-máquina em escala industrial. Baseado nos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas estabeleceu-se a composição química do aço a ser produzido conforme a tabela 4.8.

Tabela 4.8 Faixa de composição química definida para produção industrial.

Elemento químico	C	Mn	Si
%	0,11	0,40	0,07
	0,15	0,70	0,20

O padrão de operação prevê que seja realizado ensaio de propriedades mecânicas uma amostra para cada lote produzido – lote é o nome dado à seriação da corrida após sair da aciaria. Para fins de melhor acompanhamento no desenvolvimento do trabalho foram realizados no mínimo 5 testes para cada lote, assim foram aquilatadas 245 amostras no período de 40 dias de produção.

4.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para efeito de comparação de resultados foram levantados dados de 250 corridas anteriores na faixa de composição na qual era produzido inicialmente o CA60. As figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam as análises de capacidade de processo nas composições de Carbono, Manganês e Silício na composição química produzida inicialmente e na composição química proposta.

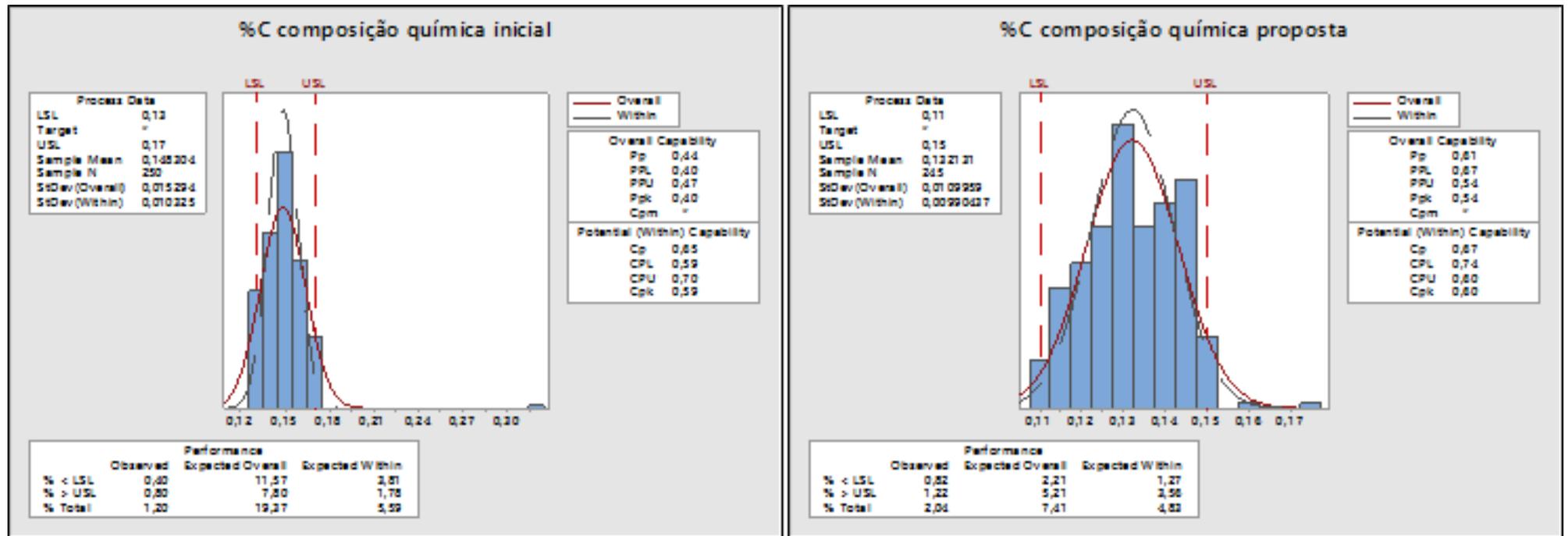


Figura 4.5 Capacidade %C antes e depois da alteração do aço.

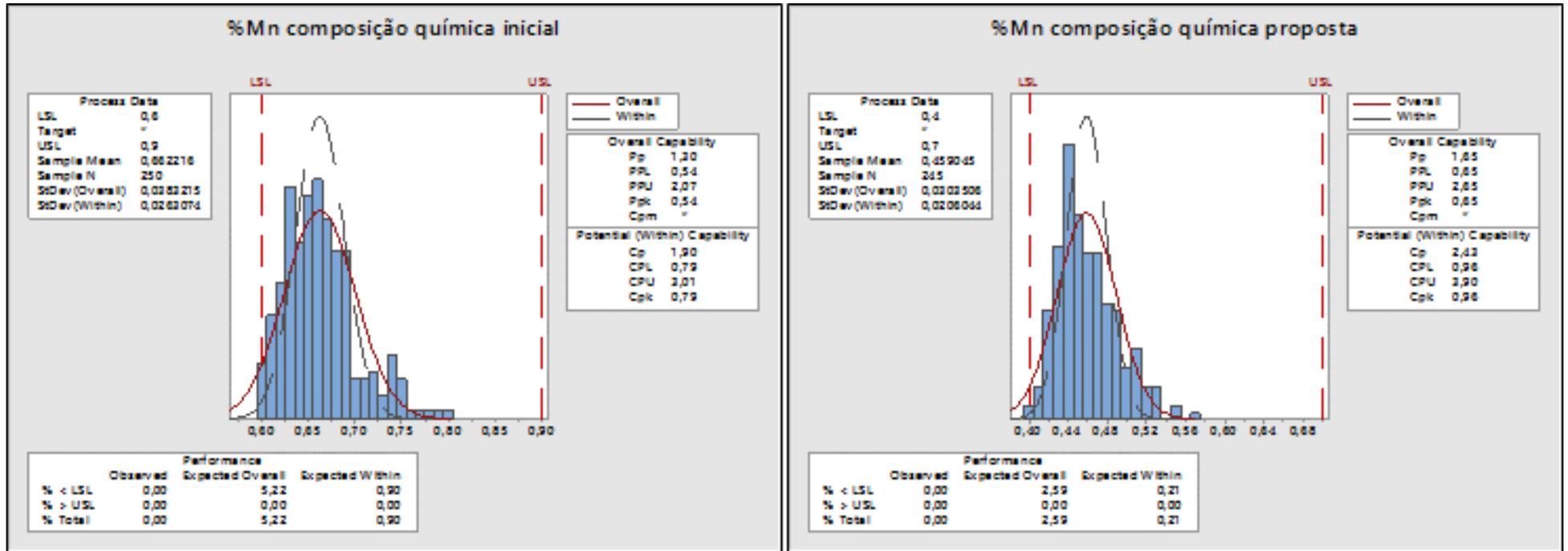


Figura 4.6 Capacidade %Mn antes e depois da alteração do aço.

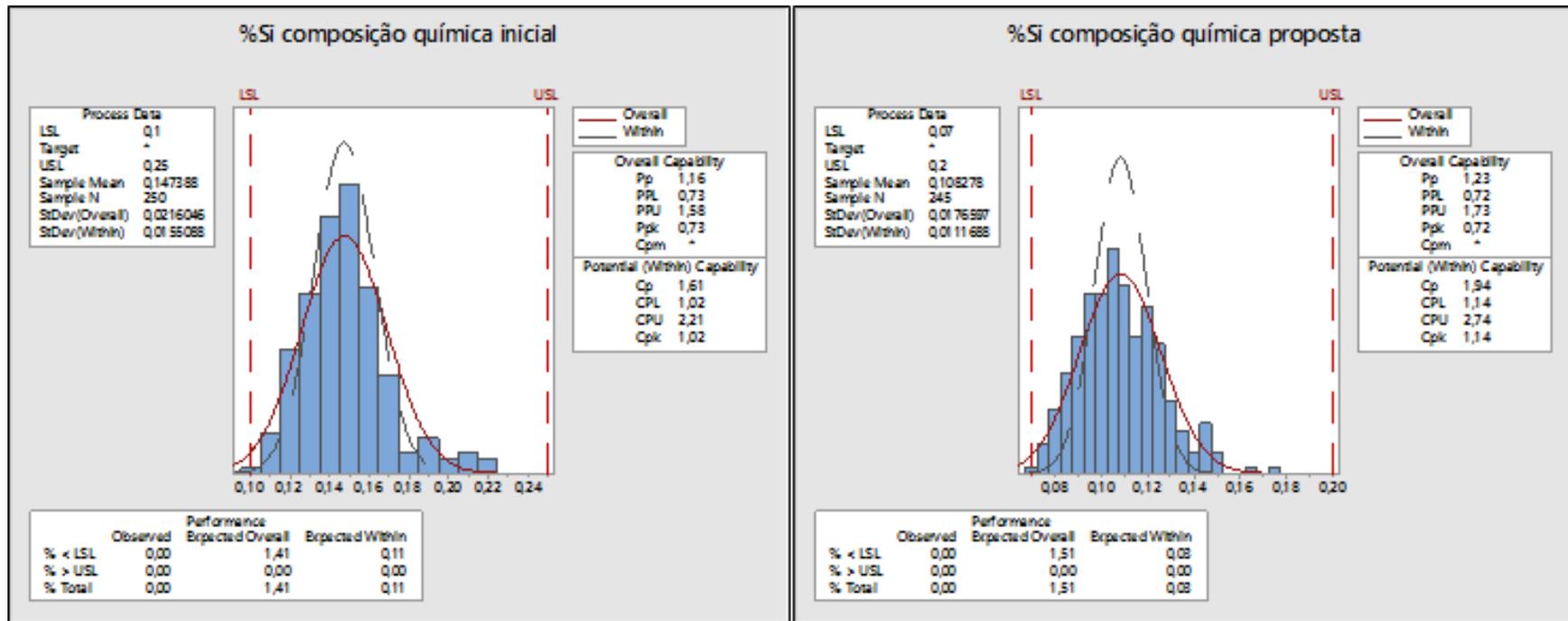


Figura 4.7 Capacidade %Si antes e depois da alteração do aço

Observa-se que após a alteração de composição química há aumento de Cpk na composição do Manganês de 0,79 para 0,96 e na composição de Silício com mudança de Cpk de 1,02 para 1,14. Tais resultados são satisfatórios, porque demonstram melhora na capacidade de processo e menor probabilidade de produção de aço fora da faixa de composição química especificada para Mn e Si. O Carbono se manteve com o mesmo Cpk o que também é um resultado satisfatório pois houve a necessidade de redução dos limites da faixa, anteriormente em 5 pontos (0,13 – 0,18) para 4 pontos (0,11 – 0,15).

4.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8 estão as análises de capacidade referentes aos Limites de escoamento e Resistência e alongamento do CA60 produzido a partir da nova composição química e os mesmos dados referente às composições anteriores à mudança.

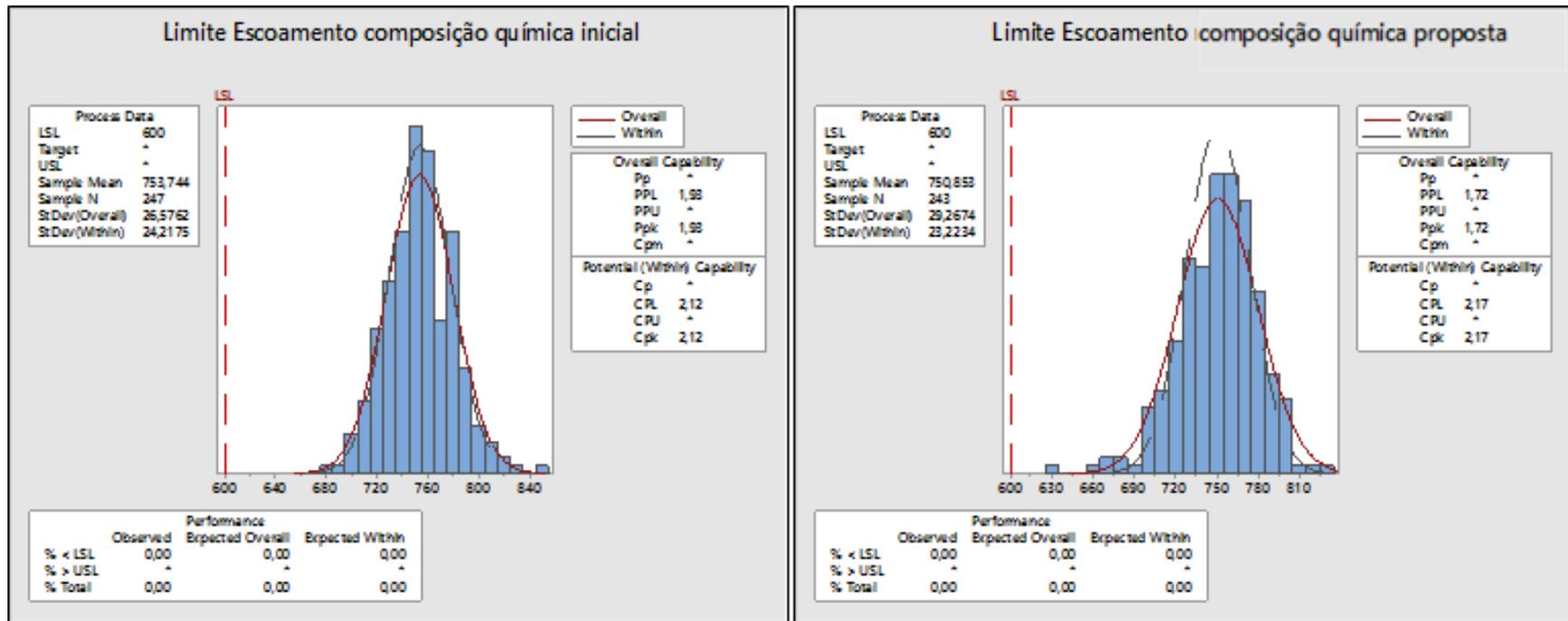


Figura 4.8 Capacidade Limite de Escoamento antes e depois da alteração do aço.

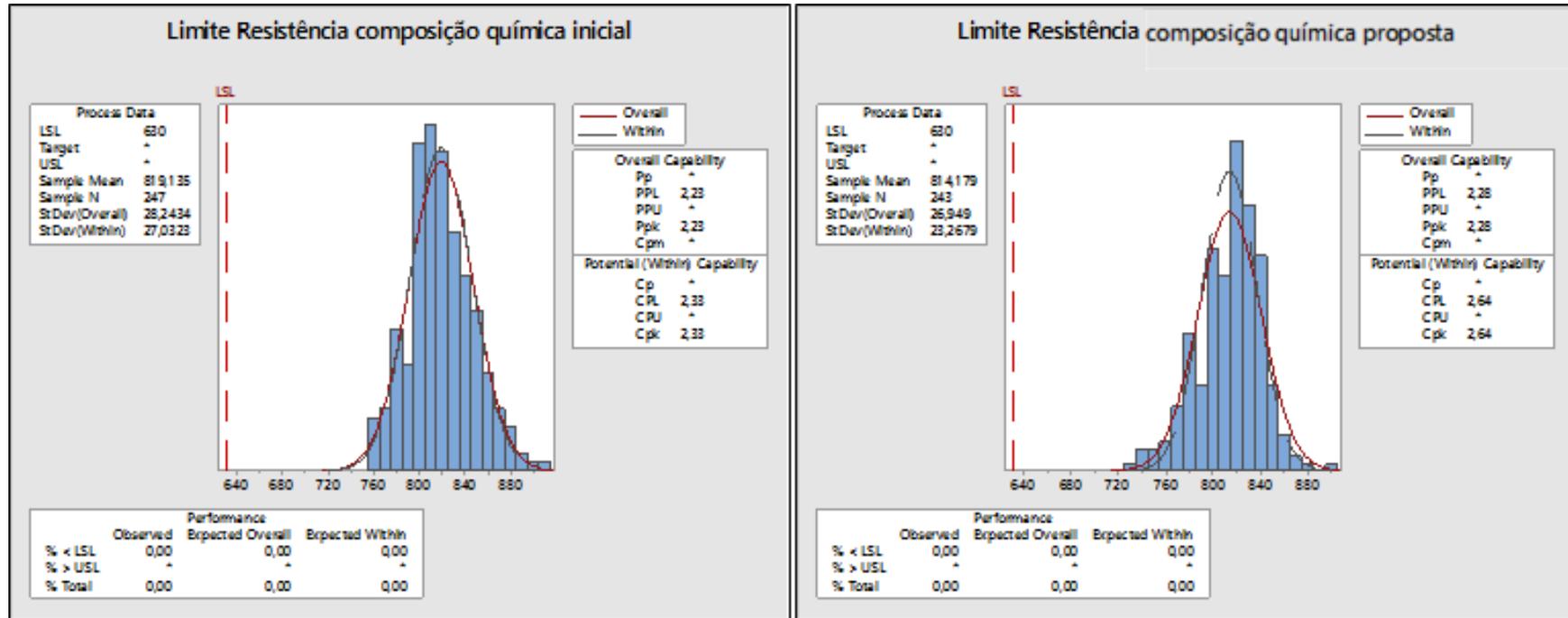


Figura 4.9 Capacidade Limite de Resistência antes e depois da alteração do aço.

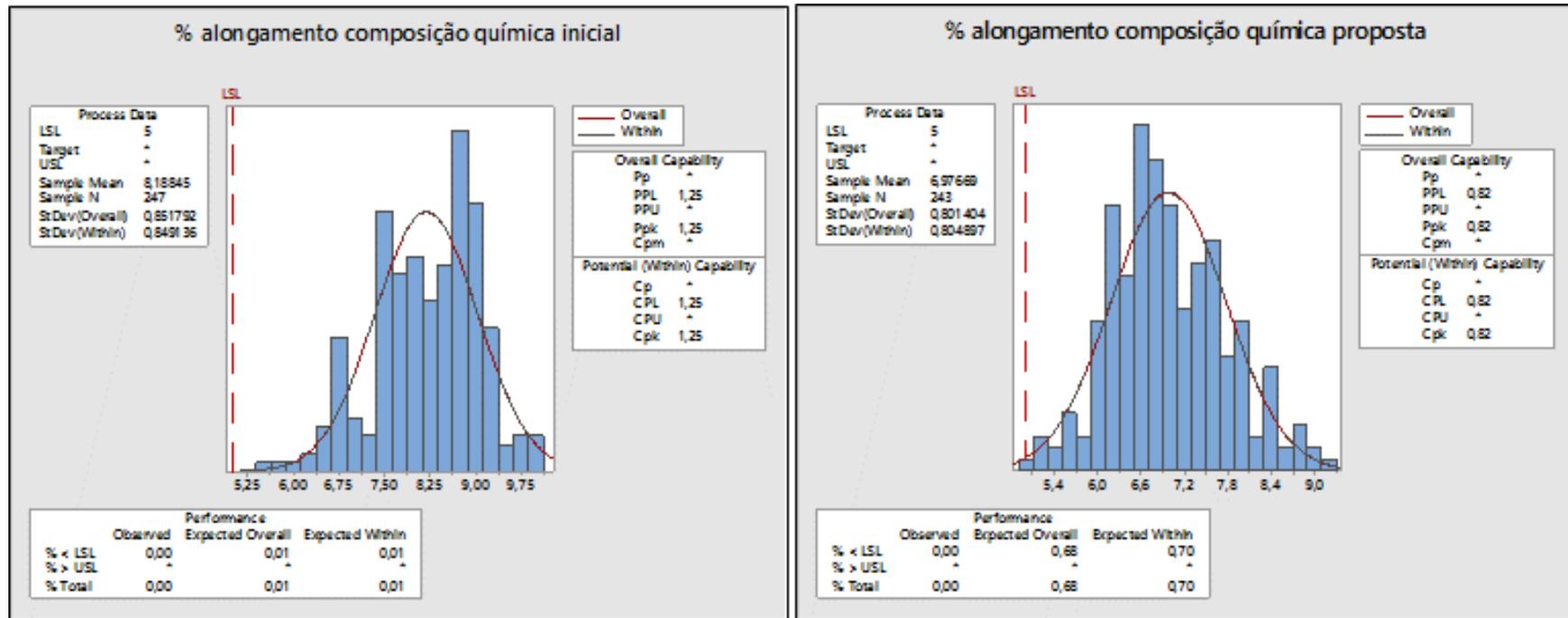


Figura 4.10 Capacidade Alongamento antes e depois da alteração do aço.

Observa-se que não há mudanças significativas no Limites de escoamento e Resistência, demonstrando o efeito compensatório do aumento da taxa de conformação com o aumento da bitola de fio-máquina em relação à redução de ligas. Assim, se torna viável a redução de custos em ligas na aciaria mantendo as propriedades mecânicas do produto final. Ainda que as propriedades estejam bastante elevadas em relação ao mínimo exigido pela norma, é adequado para fins comerciais manter o material tão quanto for possível com as características mecânicas as quais o cliente está habituado.

O alongamento sofreu queda vultuosa com a média passando de 8,18 % para 6,97%, o Cpk também sofreu queda significativa de 1,25 para 0,82 demonstrando perda de capacidade no processo. Tal resultado era esperado pois conforme a literatura, o alongamento está diretamente relacionado ao percentual de manganês na composição do aço ao mesmo tempo em que está inversamente relacionado ao aumento do trabalho a frio.

4.2.3 PARADAS DE PRODUÇÃO

A troca da bitola do fio-máquina de entrada de 6,30mm para 7,00 mm oportuniza a queda de paradas de produção por enleio no laminador a frio. O enleio, vide figura 4.9, e caracteriza pelo “embolamento” dos rolos de fio-máquina na central de solda do laminador a frio. Tal ocorrência tem sua redução diretamente relacionada ao aumento da bitola do fio-máquina. As ocorrências de enleio além de causarem paradas de produção extensas, também são um grande risco à segurança do operador.



Figura 4.11 Enleio central de solda laminador a frio.

A figura 4.12 apresenta a média de enleios por tonelada de aço produzido de janeiro a setembro deste ano – referenciando período com produção empregando composição

química e fio máquina antigo – e outubro comparando o mês em que foi feita produção fazendo uso de nova composição química e fio-máquina. Observa-se queda de 68% em relação ao mês anterior.

A figura 4.13 apresenta o total de minutos em que a máquina ficou parada devido a ocorrência de enleios. Estão contabilizados apenas o tempo em que a mesma estaria em plena produção, desconsiderando qualquer outro motivo para interrupções. Observa-se queda de 61% em relação ao mês anterior, o que significa mais de 2 turnos de produção por mês.

A figura 4.14 apresenta a média de ocorrências de enleio por dia. Observa-se uma queda de em média 8 ocorrências por dia em relação ao mês anterior. Tal redução é muito importante, pois reduz a exposição dos operadores da central de solda a ocorrência de enleio que se caracteriza como um risco de segurança.

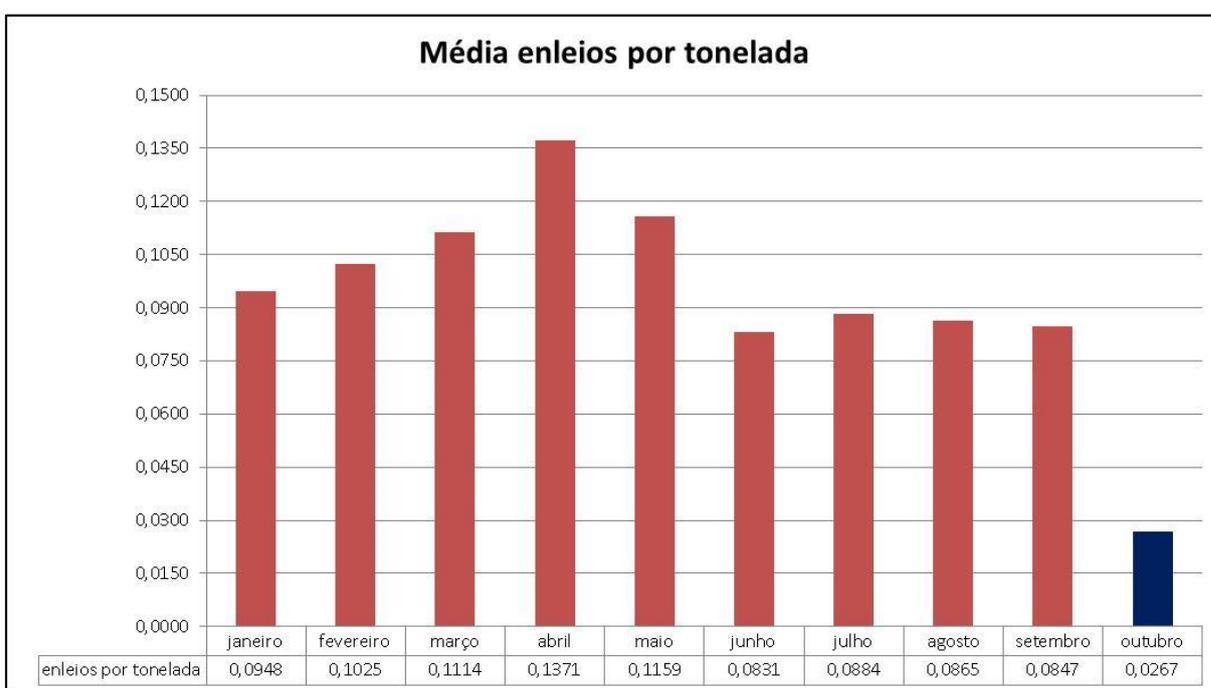


Figura 4.12 Gráfico média mensal de enleios por tonelada.

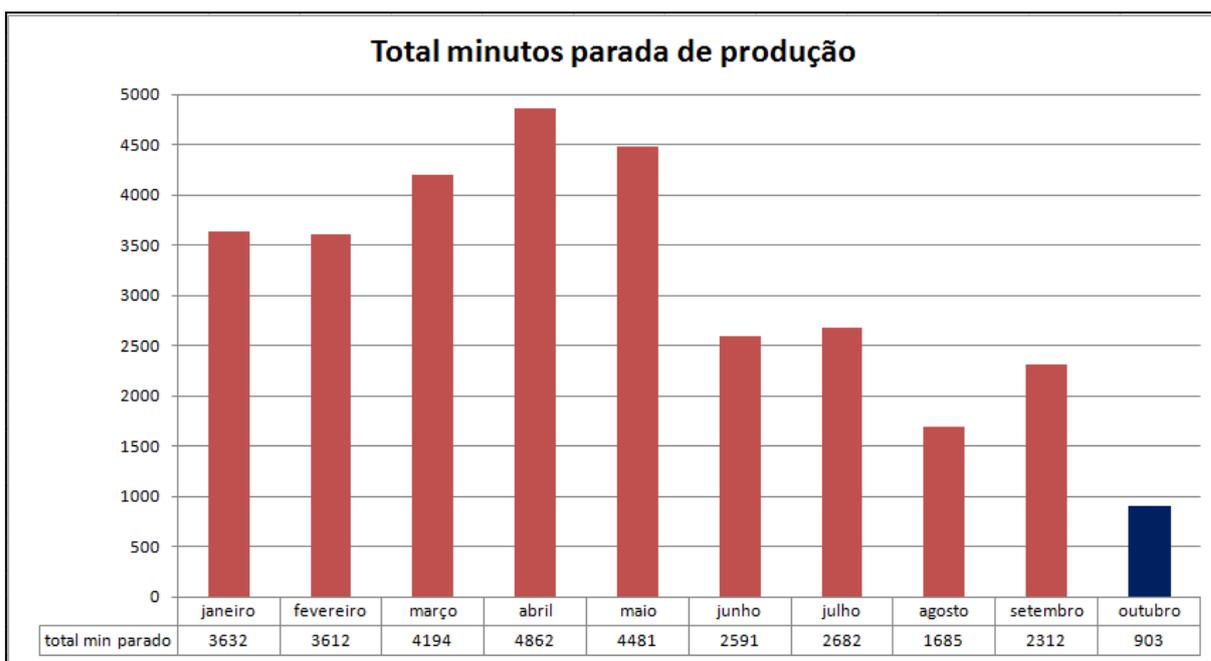


Figura 4.13 Gráfico total minutos parada de produção por enleio por mês.

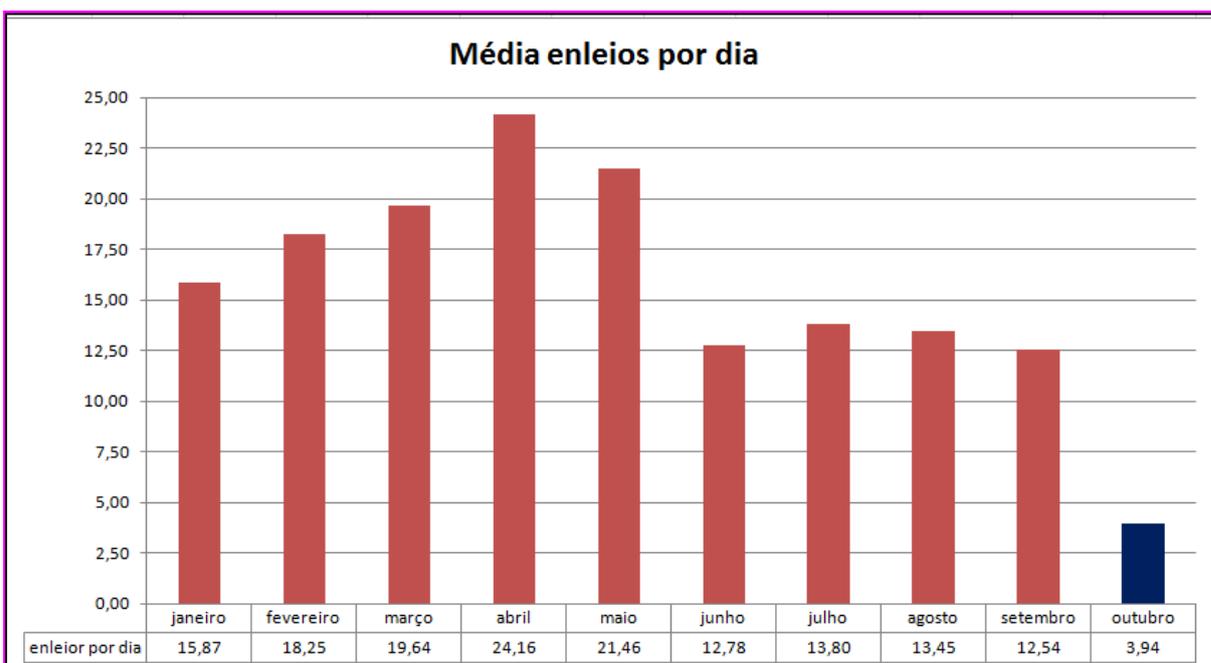


Figura 4.14 Gráfico media enleios diários por mês.

4.2.4 CONSUMO FeSiMn

O consumo médio da Liga FeSiMn foi reduzido 36%, vide figura 4.13, em relação ao mês de setembro, tal redução é financeiramente impactante no custo final de produção do aço pois a tonelada da liga ultrapassa R\$ 3.000,00 atualmente. A figura 4.13 apresenta o consumo médio de FeSiMn no aço utilizado para produção do CA60 em kg de liga por tonelada de aço produzido.

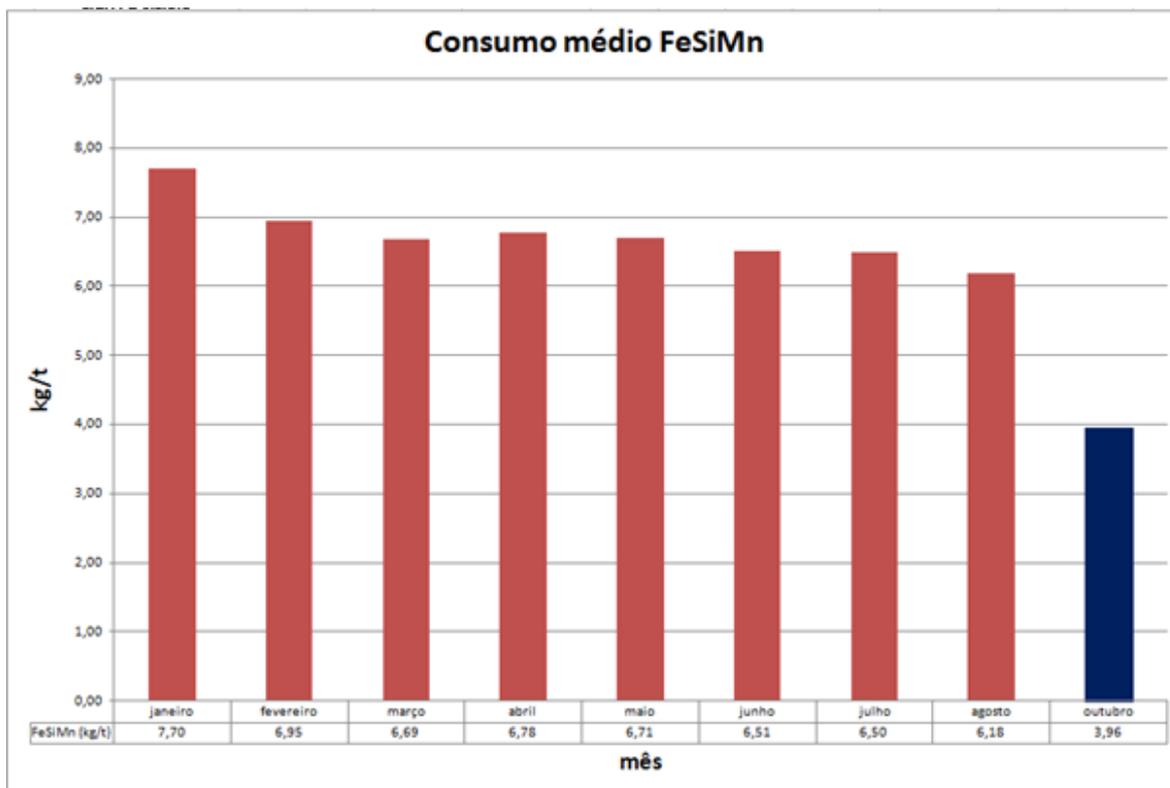


Figura 4.15 Consumo liga FeSiMn mensal (kg/t).

4.2.5 CARBONO EQUIVALENTE

O CA60 por sua aplicação necessita de características de soldabilidade e, para este fim, era estabelecido na composição química anterior do aço limite superior de Carbono Equivalente (Ceq) em 0,28. A equação 4.1 explicita a expressão usada para calcular o mesmo. Conforme a literatura o carbono equivalente é mais preciso se calculado considerando a composição de residuais presente no aço, o cálculo simplificado expressado na equação 4.1 é usado na indústria para efeito de simplificação e agilidade nos processos.

Equação 4.1 Expressão para cálculo Carbono Equivalente.

$$Ceq = C + \frac{Mn + Si}{6}$$

A figura 4.14 apresenta as análises de capacidade do Carbono Equivalente nas composições químicas anterior e após a mudança, foi usado 0,28 como limite superior em ambas análises estatísticas. Observa-se que na composição química inicial, o Ceq não excedia o limite proposto na maior parte das análises. Após a mudança o Ceq atinge Cpk expressivamente satisfatório significando um material com característica superior de soldabilidade.

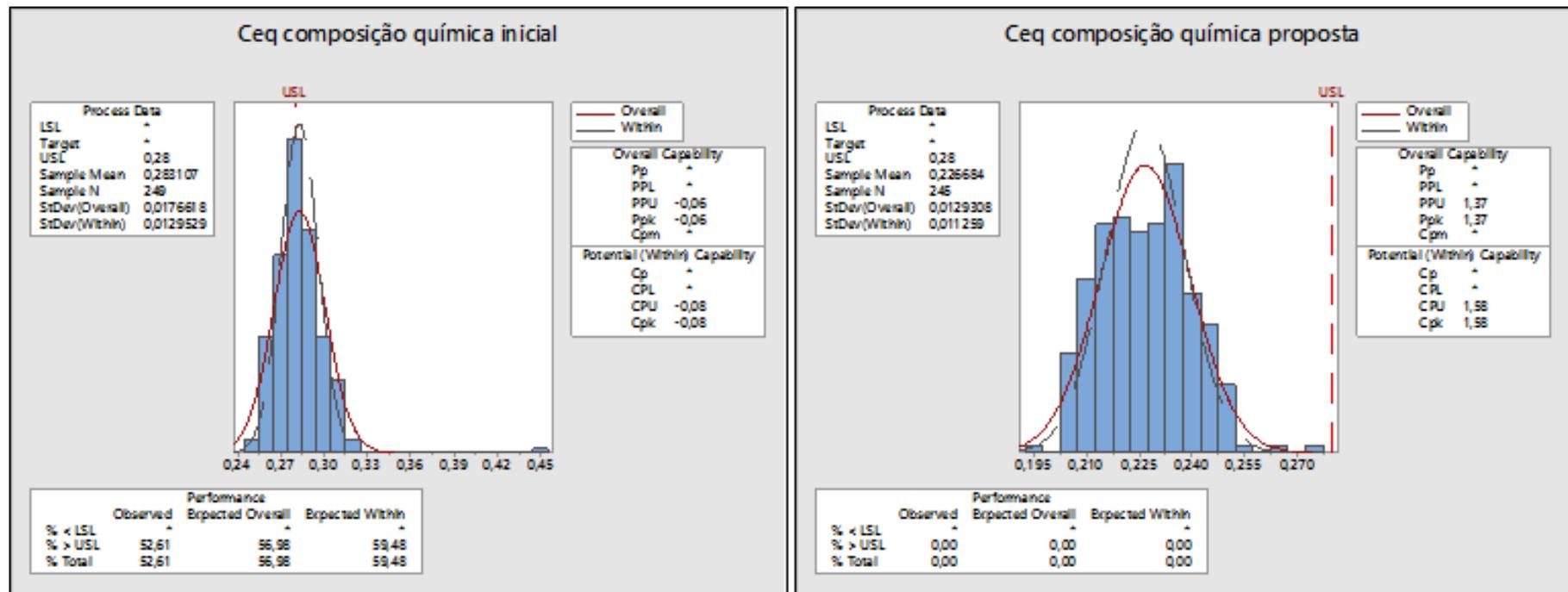


Figura 4.16 Capacidade carbono equivalente antes e depois da mudança de composição química do aço.

5.0 CONCLUSÕES

- Todos os ensaios atenderam o padrão estabelecido pela norma ABNT NBR 7480.2007.
- A corrida 3 apresentou limites de escoamento e resistência bastante superiores e alongamento inferior as demais corridas. Tal resultado evidencia a influência da composição química nas propriedades mecânicas.
- As corridas 1, 2 apresentaram ensaios de dobramento e enrolamento satisfatórios em todas as amostras.
- Amostras da corrida 3 apresentaram fissura já na primeira volta sobre o próprio eixo no ensaio de enrolamento.
- Através de análise metalográfica, observa-se que os grãos de ferrita e perlita se apresentam com encruamento decorrente do processo de laminação a frio.
- É notório o ganho em limites de escoamento e resistência e perda em alongamento após o 1º passe no laminador a frio.
- Através de análise em tarugo da corrida 1 foram contabilizados 44 blow-holes, valor aceitável em nível de qualidade interna do aço.
- Evidencia-se menor probabilidade de produção de aço fora da faixa de composição química especificada para Mn e Si.
- O alongamento sofreu queda significativa, conforme previsto.
- Observa-se queda de 61% do total de minutos de parada de produção por ocorrência de enleios e queda de 68% de ocorrências de enleio por tonelada de aço. Ambas reduções ocorreram devido a possibilidade de troca de bitola de fio-máquina.
- Houve melhora na soldabilidade do produto final devido a redução do carbono equivalente.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da redução de ligas no CA-60 de bitolas maiores que 5,00 mm.
- Estudo do processo de dessulfuração para aço com teor muito reduzido de ligas.
- Estudo das relações Mn/Si e Mn/S no processo na aciaria para aços com teor muito reduzido de ligas.

7.0 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E 23**: Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Philadelphia, PA, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6330: **Fio-máquina de aço carbono, de uso geral, destinado à trefilação e laminação à frio**, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6354: **Fio-máquina de aço destinado à trefilação e laminação a frio**, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6892: **Materiais metálicos. Ensaio de tração à temperatura ambiente**, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado**, 2007.

BRESCIANI, E. F., SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica de metais**. Ed. UNICAMP, 6ª ed (1ª ed digital) 2011.

BRIANT C.L., BANERJI S.K. **Embrittlement of Engineering Alloys: Intergranular Fracture in Ferrous Alloys in Non-aggressive Environments**. Treatise on Materials Science and Technology, Ed. C.L. Briant and S.K. Banerji, Academic Press, New York, NY, p. 21-58, 1983.

BRIANT C.L., BANERJI S.K. **Intergranular Failure in Steel: The Role of Grain Boundary Composition**. International Metals Reviews, Review 232, No. 4, 1978.

CGEE. Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão – Brasília: **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, 2010.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação**. São Paulo. Artliber Editora, 2005.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica- Estrutura e propriedades das ligas metálica**, 2ª ed. v.1. Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1986.

COTTRELL, A. H. **Dislocations and plastic flow in crystals**. Oxford University Press, p, 1953.

DAROIT, Mateus. **Estudo de aço microligado ao vanádio para a produção de barra nervurada para concreto armado com característica de soldabilidade segundo ABNT NBR 8965:1985**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed., Editora Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro: 653p. 1981.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em:<<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/instituto/index.asp>> Acesso em 15 nov. 2015.

HISSANAGA B M M S, **Variáveis do processo termomecânico que influenciam na relação elástica do vergalhão CA-60**. Dissertação de Mestrado – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

HYDE R.S. **Quench Embrittlement and Intergranular Oxidation Embrittlement: Effects on Bending Fatigue Initiation of Gas-Carburized Steel**. Tese. Colorado School of Mines, Agosto 1994.

KRAUSS G. **Heat Treated Martensitic Steels: Microstructural Systems for Advanced Manufacture**. ISIJ International, Vol. 35, No. 4, 1995.

LESLIE W.C. **The Physical Metallurgy of Steels**, Techbooks India, 1991.

RIPOLL, RODRIGUEZ, M., SABINE, M., RIEDELA, W., RIEDELA, H., Reduction of Tensile Residual Stresses during the Drawing Process of Tungsten Wires. **Materials Science and Engineering**, A 527, 3064–3072, 2010.

RIZZO, E. M. S. **Processos de Laminação de produtos Longos de Aço**. Associação Brasileira de Metais, 2010.350p.

ROCHA, Fábio Augusto Costa. **Desenvolvimento de um sistema de ventilação forçada para secar o fio-máquina na laminação a frio de vergalhões**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 77 p.

SCHAEFFER, L. **Conformação dos Metais: Metalurgia e Mecânica**. Ed. Rigel, Porto Alegre, Brasil, 108 p,1995.

YANG, C., GLODOWSKI, R. J. **Research, Production and Application of V-N Microalloyed High Strength Reinforcing Bar for Building in China**, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing, 2004.

YANG, C. **Development of high strength Construction Rebars**, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, 2010.