

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

Departamento de Metalurgia

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DE MANGANÊS EM AÇO SAE 1541 MODIFICADO E
DA SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE VERGALHÕES

Emília Lucena de Oliveira

Trabalho de Diplomação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski

Co-Orientador: Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre
2012

Dedico este trabalho aos meus pais, Sérgio e Ediane.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar uma família maravilhosa que me apóia tanto, e também por me dar saúde e forças para buscar e atingir tantos dos meus objetivos de vida.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor e carinho incondicional, e por sempre lutarem para me dar o melhor em educação, para me passar valores e por tornarem possível a concretização desse sonho.

Ao meu namorado Nathaniel Vogel, por todo amor, carinho e incentivo a seguir e lutar pelos meus sonhos, e também por fazer parte deles.

Aos professores orientadores Carlos Fortis e Wagner Bielefeldt, pela orientação e aconselhamento.

Aos amigos que ganhei na faculdade, pelo companheirismo e por tornarem alegres até mesmo os momentos mais difíceis.

Aos colegas de estágio Anderson Kempka, Marcus Steffenon, Mateus Daroit e tantos outros por tornarem possível a execução deste trabalho, pelo coleguismo e pelo aprendizado que a mim proporcionaram.

À UFRGS como instituição, pela certeza de que sempre será uma referência em qualidade de ensino.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que a realização deste trabalho fosse possível.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Mercado Siderúrgico.....	3
2.1.1 Produção Mundial de Aço.....	3
2.1.2 Mercado Brasileiro de Aço	4
2.1.3 Empresas Produtoras de Aço	5
2.2 Produção do Vergalhão.....	7
2.2.1 Produção do Aço	8
2.2.2 Laminação	11
2.3 Características e Especificações do Vergalhão.....	14
2.4 Mecanismos para Ganho de Resistência.....	18
2.4.1 Solução Sólida.....	19
2.4.2 Encruamento	19
2.4.3 Refino de Grão	22
2.4.4 Tratamento Térmico.....	23
2.4.5 Precipitação	25
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	27
3.1 Levantamento de Propriedades Mecânicas	27
3.2 Aço SAE 1541 Modificado.....	29
3.3 Produção do Vergalhão.....	35
3.4 Análise Química.....	36
3.5 Análise Microestrutural	37

3.6	Ensaio de Tração.....	37
3.7	Ensaio de Dobramento.....	38
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	Composição Química.....	39
4.1.1	Composição de Teste 1	39
4.1.2	Composição de Teste 2	40
4.2	Caracterização Microestrutural.....	40
4.2.1	Análise Microestrutural do Teste 1	41
4.2.2	Análise Microestrutural do Teste 2.....	42
4.3	Ensaio de Tração.....	45
4.3.1	Propriedades Mecânicas do Teste 1	46
4.3.2	Propriedades Mecânicas do Teste 2.....	49
4.4	Ensaio de Dobramento.....	52
4.4.1	Ensaio de Dobramento do Teste 1	52
4.4.2	Ensaio de Dobramento do Teste 2.....	53
5.0	CONCLUSÕES	56
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Evolução do consumo aparente de produtos siderúrgicos.....	5
Figura 2.2	Participação dos setores consumidores.....	5
Figura 2.3	Produção de aços longos por grupo.....	6
Figura 2.4	Evolução do comércio exterior de produtos siderúrgicos.....	6
Figura 2.5	Rota de produção do vergalhão em indústria siderúrgica.....	7
Figura 2.6	Forno elétrico a arco em operação.....	9
Figura 2.7	Forno-panela em funcionamento.....	9
Figura 2.8	Panela realizando a passagem de aço líquido para o distribuidor, que faz o mesmo para os veios da máquina de lingotamento contínuo.....	10
Figura 2.9	Conformação realizada pelos cilindros de laminação.....	11
Figura 2.10	Forno de reaquecimento.....	12
Figura 2.11	Cilindros de laminação com canais usinados.....	13
Figura 2.12	Endireitamento por roletes.....	14
Figura 2.13	Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado.....	16
Figura 2.14	Configuração geométrica com nervuras transversais oblíquas em dois lados da barra e nervuras longitudinais.....	18
Figura 2.15	Aumento no limite de escoamento para o aço 1040, latão e cobre.....	20
Figura 2.16	Aumento no limite de resistência à tração para o aço 1040, latão e cobre.	21
Figura 2.17	Redução da ductilidade em função do trabalho a frio para o aço 1040, latão e cobre.....	21
Figura 2.18	Movimento de uma discordância.....	23

Figura 2.19	Variação da dureza do material em função da distância a partir da extremidade temperada.....	24
Figura 3.1	Limite de escoamento das bitolas de vergalhão no aço SAE 1541 modificado produzidas no ano de 2011.....	28
Figura 3.2	Limite de resistência das bitolas de vergalhão no aço SAE 1541 modificado produzidas no ano de 2011.....	28
Figura 3.3	Relação entre limite de resistência e limite de escoamento das bitolas de vergalhão no aço SAE 1541 modificado produzidas no ano de 2011.....	29
Figura 3.4	Gráfico de distribuição do elemento carbono no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011.....	30
Figura 3.5	Gráfico de distribuição do elemento manganês no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011.....	30
Figura 3.6	Gráfico de distribuição do elemento silício no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011.....	31
Figura 3.7	Gráfico de distribuição do carbono equivalente no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011.....	31
Figura 3.8	Gráfico de distribuição do elemento enxofre no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011.....	32
Figura 3.9	Gráfico de distribuição da relação Mn/Si no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011.....	32
Figura 3.10	Gráfico de distribuição da relação Mn/S no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011.....	33
Figura 4.1	Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 6,3mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X.....	41
Figura 4.2	Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 8,0mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X.....	42
Figura 4.3	Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 6,3mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X.....	43
Figura 4.4	Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 8,0 mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X.....	43
Figura 4.5	Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão 6,3 mm na composição sem modificações, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X.....	44

Figura 4.6	Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão 8,0 mm na composição sem modificações, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X.....	45
Figura 4.7	Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 6,3 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, e das amostras produzidas na composição de teste 1.....	47
Figura 4.8	Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 8,0 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, e das amostras produzidas na composição de teste 1.....	48
Figura 4.9	Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 6,3 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, do material em rolo na composição de teste 2 e do material reto na composição de teste 2.....	50
Figura 4.10	Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 8,0 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, do material em rolo na composição de teste 2 e do material reto na composição de teste 2.....	51
Figura 4.11	Amostras de vergalhão em rolo após ensaio de dobramento a 180° na bitola 6,3 mm.....	52
Figura 4.12	Amostras de vergalhão em rolo após ensaio de dobramento a 180° na bitola 8,0 mm.....	53
Figura 4.13	Resultados dos ensaios de dobramento a 180° nas amostras de vergalhão em rolo na bitola 6,3mm.....	53
Figura 4.14	Resultados dos ensaios de dobramento a 180° nas amostras de vergalhão em rolo na bitola 8,0mm.....	54
Figura 4.15	Amostras de vergalhão reto após ensaio de dobramento a 180° na bitola 6,3mm.....	54
Figura 4.16	Amostras de vergalhão reto após ensaio de dobramento a 180° na bitola 8,0mm.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Produção mundial de aço bruto em 2011.....	4
Tabela 3.1	Faixas de elementos nas composições químicas original, proposta 1 e proposta 2.....	33
Tabela 4.1	Teores objetivados e realizados de elementos químicos para o teste 1.....	39
Tabela 4.2	Teores objetivados e realizados de elementos químicos para o teste 2.....	40
Tabela 4.3	Resultados das propriedades mecânicas para o vergalhão 6,3 mm em rolo na composição com 1,1% de manganês.....	46
Tabela 4.4	Resultados das propriedades mecânicas para o vergalhão 8,0 mm em rolo na composição com 1,1% de manganês.....	48
Tabela 4.5	Resultados de propriedades mecânicas do segundo teste, para os vergalhões em rolo e reto na bitola 6,3 mm.....	49
Tabela 4.6	Resultados de propriedades mecânicas do segundo teste, para os vergalhões em rolo e reto na bitola 8,0 mm.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ASTM – American Society for Testing and Materials;

C – Carbono;

CA – Concreto Armado;

Ceq – Carbono Equivalente;

Cr – Cromo;

Fe – Ferro;

LD – Linz Donawitz;

LE – Limite de Escoamento;

LR – Limite de Resistência;

mm – Milímetros;

Mn – Manganês;

Mn/S – Manganês/Enxofre;

Mn/Si – Manganês/Silício;

Mod. – Modificado;

MPa – Megapascal;

NBR – Norma Brasileira Registrada;

S – Enxofre;

SAE – Society of Automotive Engineers;

Si – Silício;

SiO₂ – Dióxido de Silício (Sílica);

V – Vanádio;

WSA – World Steel Association;

μm² – Micrômetros Quadrados;

Ø – Diâmetro.

RESUMO

O cenário atual da indústria siderúrgica é de competitividade crescente, principalmente pela entrada de novas empresas no ramo e pelo baixo custo do aço proveniente de importações. Essa condição de mercado representa uma forte motivação para a realização de trabalhos que buscam melhorias na eficiência dos processos produtivos dentro das usinas, com a finalidade de redução de custos de produção. Com base nesse conceito, este trabalho visa estudar a viabilidade técnica de otimização do teor de manganês adicionado em um aço SAE 1541 modificado, fabricado numa usina siderúrgica da região sul do Brasil. O projeto foi desenvolvido para esse aço, pois representa um grande volume de produção para a empresa e, na composição química atual, vem conferindo a vergalhões boa margem nas propriedades mecânicas com relação aos valores estabelecidos por norma.

A liga é produzida a partir de aciaria elétrica, dando origem aos tarugos que são laminados a quente e resfriados ao ar para obtenção de barras nervuradas para concreto armado, também denominadas vergalhões. Estes, por sua vez, atendem às propriedades mecânicas estabelecidas pela norma brasileira ABNT NBR 7480, categoria CA50. A composição química proposta ao longo do trabalho deve garantir que as propriedades mecânicas descritas na norma continuem sendo atendidas. Além do acompanhamento de todas as etapas de produção do aço com a redução de manganês proposta, foram realizados: levantamento e análise de histórico de dados, ensaios de composição química, caracterização microestrutural, ensaios de tração e dobramento. Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta para avaliação de propriedades mecânicas é válida, e que pode ser aplicada em outros estudos de modificação de composição química em aços. Além disso, este estudo indica que é viável otimizar o teor de manganês e, ainda assim, garantir o atendimento às especificações da norma brasileira ABNT NBR 7480 para vergalhões a serem utilizados em estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: Aço. Manganês. Propriedades mecânicas. Vergalhões. SAE 1541.

ABSTRACT

The current scenario of the steel industry is increasingly competitive, mainly because of the entry of new firms into the sector and also because of low-cost imports. The characteristics of this market strongly motivate studies that seek to improve the efficiency of production processes at the plants in order to reduce manufacturing costs. Based on this concept, the present study aims to assess the technical feasibility of optimizing the manganese content added to modified SAE 1541 steel, manufactured at a large steel plant in southern Brazil. The project was designed for this type of steel as it represents a sizeable volume of production for the firm and also because, with the current chemical composition, the mechanical properties of rebars are way above specifications.

The alloy is manufactured in an electric arc furnace, giving rise to billets rolled into a continuous train in different passes and air cooled to produce ribbed bars for reinforced concrete, also known as rebars. These rebars comply with the mechanical properties established by ABNT NBR 7480, grade CA50. The chemical composition proposed in the paper must guarantee that the mechanical properties described in the technical standards be met. All stages of steel production with the lower manganese content proposed in the paper were monitored, and data, chemical composition, microstructure, tensile strength and bending properties were surveyed and analyzed. Results show that the proposed method for assessment of the mechanical properties is valid and that it can be applied in other studies aiming to investigate modifications to the chemical composition of steel. Also, this study shows that it is possible to optimize manganese content and meet the specifications of ABNT NBR 7480 for rebars used in reinforced concrete structures.

Keywords: Steel. Manganese. Mechanical Properties. Rebar. SAE 1541.

1.0 INTRODUÇÃO

A utilização de barras de aço nervuradas, popularmente conhecidas como vergalhões, garante resistência mecânica a estruturas de concreto, formando a combinação que é conhecida e amplamente utilizada como concreto armado. O uso do concreto, que apresenta excelente resistência a esforços compressivos, associado ao vergalhão, que traz como características boa resistência à tração e boa ductilidade, viabilizou o desenvolvimento de inúmeras construções de grande porte e soluções de engenharia na indústria da construção civil.

A competitividade na indústria do aço, associada ao surgimento de novas empresas no ramo e ao aumento das importações, está cada vez maior. No Brasil, essa situação econômica vem sendo contornada principalmente por reduções nos custos de produção. Há, conseqüentemente, uma constante busca por adaptações nos processos produtivos, a fim de diminuir recursos utilizados, retrabalhos e perdas.

A produção de vergalhões ocorre a partir do processo de laminação a quente, sendo que as propriedades mecânicas finais podem ser garantidas por composição química, por processos de tratamento térmico ou por deformação. Quando se deseja conferir maior resistência mecânica ao produto via composição química, é usual a adição dos elementos químicos carbono e manganês no aço. O aço SAE 1541 modificado apresenta também pequenas adições de vanádio, que contribuem para o aumento de resistência dos vergalhões. No entanto, esse elemento não será o foco deste trabalho.

A adição de elementos químicos como o manganês costuma ser realizada através de ferroligas, que são acrescentadas ao aço durante a etapa de refino secundário na aciaria. Tais insumos envolvem altos custos, e são alvos constantes de projetos que objetivam reduzir gastos de produção. Neste trabalho, a proposta de otimização dos teores de manganês reflete numa diminuição do consumo de ferroliga FeSiMn. O presente estudo teve como referência desenvolvimentos feitos para outros aços na usina que foram bem sucedidos. Além disso, como se trata de um aço com alto teor de manganês, a mudança

que será proposta não deve ser tão impactante, uma vez que continuará com elevadas adições do elemento mesmo após a redução almejada.

Portanto, a necessidade de economia e de otimização dos processos siderúrgicos motivou a realização deste trabalho, cujo objetivo principal é estudar a viabilidade técnica de otimização do teor de manganês adicionado em um aço SAE 1541 modificado, fabricado numa usina siderúrgica da região sul do Brasil. Essa liga foi escolhida para estudo, pois os vergalhões fabricados a partir dela têm apresentado propriedades mecânicas que estão consideravelmente acima dos valores especificados por norma. Além disso, foi selecionada por representar um grande volume de produção para a usina.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mercado Siderúrgico

Vive-se um período de constante desenvolvimento econômico, que evidencia a necessidade extensiva de utilização do aço. Uma infinidade de estudos e novas tecnologias têm possibilitado analisar e aprimorar diferentes materiais com propriedades excelentes e diversas, no entanto a aplicação de aço mostra-se mais atrativa por apresentar características que não são obtidas através de outros materiais com custo igual ou similar.

A produção de aço pode ser considerada um indicador do grau de desenvolvimento econômico de um país. À medida que cresce a demanda nas áreas de construção civil, indústria, automotivo, entre tantas outras, é fundamental que os volumes de produção de aço acompanhem proporcionalmente essa evolução.

2.1.1 Produção Mundial de Aço

Em 2011, a produção mundial de aço bruto foi de 1,49 bilhões de toneladas, sendo que a contribuição do Brasil foi de 35,2 milhões de toneladas durante esse período (WORLD STEEL ASSOCIATION – WSA 2012). A Tabela 2.1 evidencia que, com esses números, o país segue ocupando a 9ª posição no ranking dos maiores produtores mundiais.

Tabela 2.1 Produção mundial de aço bruto em 2011

País	10⁶t
China	683,3
Japão	107,6
EUA	86,2
Índia	72,2
Rússia	68,7
Coréia do Sul	68,5
Alemanha	44,3
Ucrânia	35,3
Brasil	35,2
Turquia	34,1
Outros	254,7
Total Mundial	1.490,1

Fonte: Tabela elaborada pelo autor, com base nas informações publicadas pela World Steel Association (2012).

2.1.2 Mercado Brasileiro de Aço

A evolução do consumo aparente de produtos siderúrgicos é visível desde 2009, ano em que o mercado mundial vivenciou os efeitos de uma forte crise econômica. Essa dificuldade foi responsável por uma queda drástica nas vendas de produtos siderúrgicos, conforme mostra a Figura 2.1.

Felizmente, pode-se observar que os números de 2010 e de 2011 conseguiram superar o consumo aparente de 2009. De acordo com o Instituto Aço Brasil, o consumo de aço apresenta potencial de crescimento muito elevado, em função do baixo consumo per capita e da grande necessidade de investimentos em infraestrutura no país.

Unid.: 1000t			
PRODUTOS	2009	2010	2011
Total Produtos Planos	10.732	15.282	13.851
Total Produtos Longos	7.844	10.822	11.181
Total Produtos Siderúrgicos	18.576	26.104	25.032
Consumo per-capita (kg produtos/hab.)	98,5	136,9	130,1

Figura 2.1 Evolução do consumo aparente de produtos siderúrgicos
Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2012)

A distribuição e o consumo de aço ocorrem entre diversos setores do mercado, destacando-se os volumes destinados à construção civil, ao automotivo e a máquinas e equipamentos, conforme a Figura 2.2, que ilustra a participação dos setores consumidores durante o ano de 2010.

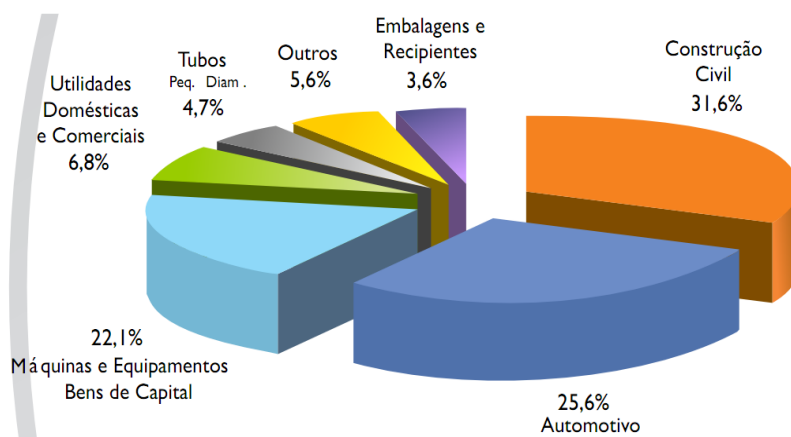


Figura 2.2 Participação dos setores consumidores
Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2012).

2.1.3 Empresas Produtoras de Aço

De acordo com dados de 2010, o parque produtor de aço no Brasil foi responsável por um faturamento líquido de R\$63,8 bilhões, sendo composto por 28 usinas siderúrgicas – 13 integradas e 15 semi-integradas. Essas usinas estão distribuídas em 10 estados brasileiros e contam com a administração de 10 grupos empresariais. A produção de aços

longos se divide entre 6 desses grupos empresariais, conforme mostra a Figura 2.3, referente ao ano de 2010.

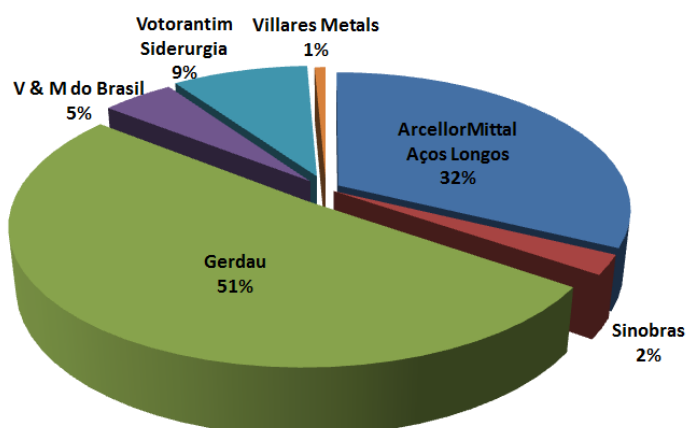


Figura 2.3 Produção de aços longos por grupo
 Fonte: Figura elaborada pelo autor com base nos dados publicados pelo Instituto Aço Brasil (2011).

O volume de importações é muito expressivo na indústria siderúrgica, tendo crescido de forma significativa no ano de 2010. A Figura 2.4 evidencia esse crescimento, que deixou os valores relacionados a exportações e importações muito próximos. Em 2011, observa-se um crescimento considerável nas exportações, em especial de produtos semi-acabados.

Unid.: 1000t

	2009	2010	2011
EXPORTAÇÕES			
Produtos Semi-acabados	4.666	5.257	7.170
Produtos Laminados	3.967	3.731	3.677
Total	8.633	8.988	10.847
(10 ⁶ US\$ FOB)	4.720	5.794	8.401
IMPORTAÇÕES			
Total	2.332	5.898	3.783
(10 ⁶ US\$ FOB)	2.815	5.457	4.541

Figura 2.4 Evolução do comércio exterior de produtos siderúrgicos
 Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2012).

2.2 Produção do Vergalhão

A combinação de concreto e aço possibilitou uma nova etapa para o desenvolvimento da construção civil. O concreto possui grande resistência a esforços compressivos, sendo interessante na construção de grandes estruturas, no entanto não resiste bem a cargas cisalhantes ou trativas. O aço, por outro lado, é considerado um material versátil pela possibilidade de utilização de formas variadas, agregando as características de alta resistência à tração, boa ductilidade e tenacidade. A versatilidade de conformação e montagem, o baixo custo e a similaridade dos coeficientes de expansão térmica destes dois materiais garantiram o desenvolvimento das aplicações de ambos ao longo da história.

A estrutura que soma o uso de concreto e de aço, sendo este na forma de barras nervuradas para melhorar a sua aderência ao concreto, é conhecida por concreto armado. Esta combinação é um método de construção rápido e de custo eficaz, sendo que o aço na forma de barras nervuradas confere estabilidade para a estrutura.

Barras de aço para aplicação em concreto armado são comercialmente conhecidas por vergalhões, sendo importantes produtos na construção civil. Sua obtenção ocorre a partir de processos de conformação, sendo usual o emprego de laminação a quente. Há também produção de fios para concreto armado, utilizando-se laminação a frio em máquinas similares as de trefilação.

A produção de vergalhões em escala industrial é realizada em plantas siderúrgicas, tendo início no processo de aciaria para obtenção do aço solidificado que, no caso da obtenção de barras, será laminado após uma etapa de reaquecimento. A Figura 2.5 mostra um desenho esquemático com as etapas do processo de produção desses vergalhões em indústrias siderúrgicas, sendo essa a sequência utilizada para realização dos testes envolvidos neste trabalho.

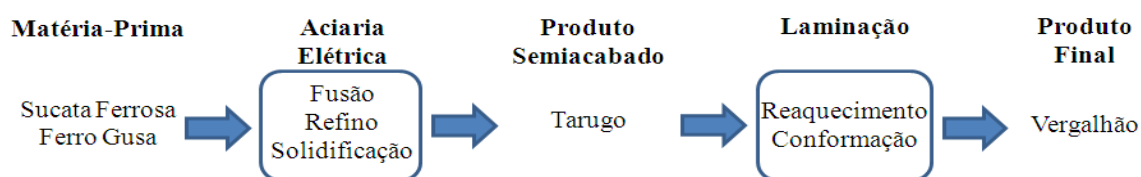


Figura 2.5 Rota de produção do vergalhão em indústria siderúrgica

2.2.1 Produção do Aço

A aciaria é uma etapa fundamental para a fabricação de vergalhões, uma vez que envolve a produção do aço. Nesse setor, ocorrem as operações necessárias para fusão da matéria-prima, refino e solidificação do aço. O material solidificado segue na forma de tarugos para o processo de laminação.

Em uma moderna usina siderúrgica integrada, o processo que vai das matérias-primas ao produto final é constituído pelas seguintes etapas principais: redução do ferro a partir de seu minério para obtenção do ferro-gusa; a conversão desse produto intermediário em aço; o lingotamento do aço líquido para sua solidificação em forma conveniente para as etapas seguintes; e, por fim, a conformação do metal para obtenção do produto de interesse (MOURÃO et al. 2007).

Normalmente, as plantas siderúrgicas que utilizam como matéria-prima o minério de ferro realizam a operação de redução a partir de altos-fornos, mas há também outros processos para isso. O ferro-gusa segue em estado líquido para o refino em conversor LD, no qual a composição química sofre os ajustes necessários. O lingotamento finaliza a etapa de produção do aço.

No caso de siderúrgicas semi-integradas, a rota mais tradicional de produção do aço tem início na fusão da carga metálica – combinação de sucata e ferro-gusa – e correção da composição de alguns elementos químicos em forno elétrico a arco. Na sequência, acontece a operação de vazamento do forno para uma panela, que é levada ao forno-panela para refino e ajuste de composição química final. Após essa etapa, o aço está pronto para o processo de lingotamento contínuo (NUNES 2009).

A Figura 2.6 apresenta um forno elétrico a arco em operação, quando carregado com sucata metálica e ferro gusa sólidos. Este forno elétrico é utilizado na etapa de fusão da carga metálica.



Figura 2.6 Forno elétrico a arco em operação
Fonte: Cortesia de usina siderúrgica.

A Figura 2.7 mostra um forno panela em funcionamento durante a produção de aço. Além de ser uma etapa importante de ajuste e obtenção da composição química final, é responsável por acertar a temperatura para a etapa de lingotamento do aço.



Figura 2.7 Forno-panela em funcionamento
Fonte: Cortesia de usina siderúrgica.

A etapa de lingotamento contínuo conta com um equipamento que é constituído, resumidamente, por uma base para receber uma panela, um distribuidor e veios de lingotamento. Quando a panela é colocada na base, sua válvula inferior é aberta e o aço líquido é vazado diretamente no distribuidor. O distribuidor possui válvulas em sua parte inferior de acordo com o número de veios da máquina de lingotamento, e essas válvulas fazem a distribuição do aço líquido para cada veio, com a vazão sendo controlada individualmente por veio. Os veios são constituídos de moldes de cobre refrigerados com água, nos quais a solidificação do aço ocorre. Um sistema secundário de refrigeração garante a solidificação final e um equipamento de corte permite obter os tarugos no comprimento desejado (NUNES 2009).

A Figura 2.8 mostra um distribuidor repassando o aço líquido para a máquina de lingotamento contínuo. A panela situa-se acima do distribuidor apoiada na base, realizando a alimentação do aço para ele.



Figura 2.8 Panela realizando a passagem de aço líquido para o distribuidor, que faz o mesmo para os veios da máquina de lingotamento contínuo
Fonte: Cortesia de usina siderúrgica.

2.2.2 Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo a redução de secção de placas, blocos ou tarugos, com consequente aumento de comprimento e com a melhoria de propriedades dos materiais, tais como ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial (SCHAEFFER 2009).

Na laminação de produtos longos a partir de tarugos, acontece a passagem do material em sequência entre dois cilindros com canais usinados, sendo a área entre os cilindros menor que a secção transversal da peça em processo. O material é submetido a tensões compressivas, resultantes 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 Figura 2.9 trata-se de um desenho esquemático que ilustra a conformação mecânica imposta ao material a partir dos cilindros de laminação. O desenho indica a redução de secção do material ao passar pelos cilindros.

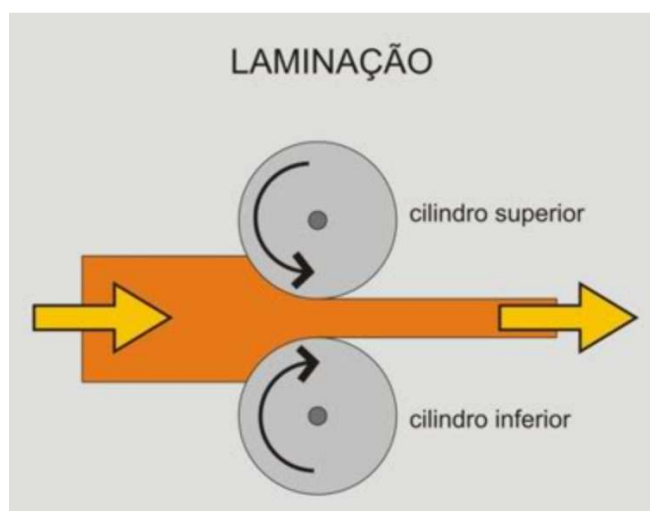


Figura 2.9 Conformação realizada pelos cilindros de laminação
Fonte: Universidade Federal de Juiz de Fora (2012).

O processo de laminação se inicia no reaquecimento dos tarugos lingotados, pois é fundamental garantir uma temperatura específica e homogênea ao longo de toda a peça

para cada tipo de aço. Pode-se ver na Figura 2.10 um modelo de forno de reaquecimento para tarugos, que usa gás natural como combustível para essa operação.



Figura 2.10 Forno de reaquecimento
Fonte: Cortesia de usina siderúrgica.

O processo de conformação de longos é realizado a quente. Ao final, o produto passa por um processo de resfriamento que pode ou não ser controlado, de acordo com as características especificadas, tais como propriedades mecânicas, tamanho de grão e ductilidade (NUNES 2009).

Quando o objetivo é a produção de vergalhões, o último passe de laminação conta com canais usinados com ranhuras para conferir nervuras ao material. Essas marcações nos vergalhões melhoram a aderência do produto ao concreto. A Figura 2.11 mostra dois cilindros de laminação com canais usinados, que são utilizados no processo de obtenção de vergalhões retos.



Figura 2.11 Cilindros de laminação com canais usinados
Fonte: Cortesia de usina siderúrgica.

O vergalhão pode ser produzido em barras retas ou em rolos. O processo de produção do vergalhão em barras retas conta com uma tesoura no final do trem de laminação que as corta em comprimento múltiplo especificado, seguindo para o leito de resfriamento e posterior corte a frio no comprimento especificado.

Na produção dos vergalhões em rolos, conta-se com um formador de espiras após o último passe de laminação, onde o produto adquire sua forma final. O formador de espiras impõe uma curvatura à barra de vergalhão em alta velocidade, formando espiras que são coletadas por um coletor de espiras, criando assim um rolo do material laminado a quente.

Para utilização em estruturas de concreto armado, o vergalhão em rolo é endireitado em equipamentos que podem usar mecanismos variados. Atualmente, é mais comum o endireitamento por roletes, processo que torna o vergalhão reto através de uma série de deformações, conforme mostra a Figura 2.12. Nesse mecanismo, o rolo é desbobinado na direção tangencial e a barra é tracionada passando por um conjunto de roletes, que realiza pequenos dobramentos em dois sentidos diferentes.



Figura 2.12 Endireitamento por roletes
Fonte: Cortesia de usina siderúrgica.

Após o endireitamento, o vergalhão pode ser aplicado como barra reta ou pode passar por processo de corte e dobra. Este processo permite produzir várias formas diferentes automaticamente, com alta produtividade, podendo ser combinado com máquinas automáticas de montagem de colunas, estacas, postes, vigas, entre outros. As máquinas mais atuais de montagem automática usam o processo de soldagem para unir as diversas peças que compõem a armadura (NUNES 2009).

2.3 Características e Especificações do Vergalhão

Os vergalhões produzidos ou comercializados no Brasil devem atender compulsoriamente a todas as características especificadas pela norma brasileira Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7480 (2007). Esta norma regula todas as características geométricas, massa linear, comprimento, propriedades mecânicas e de soldabilidade que os vergalhões devem possuir para serem utilizados na construção civil. Como se trata de um elemento estrutural amplamente utilizado, a obrigatoriedade no atendimento às normas é uma garantia para o consumidor que não possui total conhecimento diferenciar um produto de baixa qualidade e um que atenda as suas

necessidades no momento da compra. Esta avaliação somente é possível em laboratórios especializados e normalmente via ensaios destrutivos (NUNES 2009).

A norma brasileira ABNT NBR 7480 considera que os vergalhões podem ser produzidos na forma de barras ou fios de aço. Segundo a especificação, classificam-se como barras os produtos de diâmetro nominal 6,3 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica. Já os fios de aço apresentam diâmetro nominal de 10,0 mm ou inferior, obtidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

Outra classificação que a norma realiza é relacionada ao valor mínimo da resistência de escoamento, dividindo-se os vergalhões nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60. A sigla CA refere-se à aplicação em concreto armado. As características básicas que cada categoria deve seguir são:

1. CA-25: Barras de aço lisas com limite de escoamento mínimo de 250 MPa;
2. CA-50: Barras de aço nervuradas com limite de escoamento mínimo de 500 MPa;
3. CA-60: Fios de aço lisos ou nervurados com limite de escoamento mínimo de 600 MPa.

Além de especificar o limite de escoamento, que indica a tensão mínima para haver deformação plástica no material, a norma ABNT NBR 7480 estabelece valores para outras propriedades mecânicas. Nessa norma, também são contemplados: limite de resistência, que determina a tensão mínima para que ocorra fratura no material; a relação limite de resistência/limite de escoamento, que quantifica a capacidade do material sofrer deformação plástica antes de sofrer fratura; e requisitos de propriedades mecânicas de dobramento. A Figura 2.13 indica as especificações de propriedades mecânicas da norma.

Categoria	Valores mínimos de tração			Ensaio de Dobramento a 180°	
	Limite de Escoamento (Le) MPa	Limite de Resistência (Lr) MPa	Alongamento (%)	Diâmetro do Pino (mm)	
				$\varnothing < 20$	$\varnothing \geq 20$
CA-25	250	1,20 x Le	18	2x \varnothing	4x \varnothing
CA-50	500	1,08 x Le	8	3x \varnothing	6x \varnothing
CA-60	600	1,05 x Le	5	5x \varnothing	-

Figura 2.13 Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado

Fonte: ABNT (2007).

Atualmente, os métodos utilizados para a produção de vergalhões podem ser classificados em três classes distintas. Essas formas de produção são responsáveis por garantir o atendimento das propriedades mecânicas estabelecidas por normas.

A primeira forma consiste em resfriamento ao ar dos vergalhões após o processo de laminação a quente. Nesse caso, modificações na composição química do aço, tais como teores mais elevados de carbono e manganês, podem aumentar o limite de escoamento. Quando garantia de soldabilidade for um requisito, os níveis de carbono e manganês devem ser mantidos baixos, necessariamente resultando em redução da resistência. Como alternativa, pequenas adições de fortes formadores de carbonetos como o nióbio e/ou o vanádio podem aumentar a resistência sem afetar a soldabilidade (NIKOLAOU 2004).

A segunda categoria consiste em submeter os vergalhões a processos de endurecimento termomecânicos, que apresentam nomes comerciais como Tempcore, Thermex, entre outros. O método inclui temperar a camada superficial do material a fim de lhe conferir resistência e, sob efeito do calor proveniente do centro do próprio vergalhão, promover leve revenimento dessa superfície (NIKOLAOU 2004). A martensita formada na camada superficial que sofre o tratamento térmico de têmpera é capaz de aumentar a resistência mecânica do material, sendo que o centro mantém a ductilidade necessária para permitir processos de conformação e de dobramento posteriores dos vergalhões.

Barras que tenham sua resistência mecânica elevada por encruamento resultante de conformação a frio se enquadram na terceira categoria de produção. Para essas barras, a

deformação resulta em aumento no limite de escoamento, no entanto, também ocorre redução significativa da ductilidade do material (NIKOLAOU 2004).

No Brasil e em outros países, a alternativa de se trabalhar o aço a frio para atender limites de escoamento mais altos só pode ser adotada na produção de vergalhões da categoria CA-60. Para os vergalhões CA-50, não é permitido o uso de processos que envolvam conformação a frio – é permitido apenas endireitamento do material produzido em rolos, devendo o produto atender às especificações de norma logo após o processo de laminação a quente. Desta forma, os processos que utilizem o trabalho a frio apresentam vantagem de empregar aços de baixo a médio carbono, evitando empregos de ligas como manganês, vanádio, cromo e nióbio, atendendo às características de soldabilidade e atingindo o limite de escoamento requerido de 600 MPa (60 kgf/mm²) (NUNES 2009).

A norma vigente no Brasil não permite emprego de materiais trabalhados a frio em barras nervuradas, pois muitas vezes a relação entre o limite máximo de resistência e o limite de escoamento fica comprometida (NUNES 2009). Sendo assim, os outros dois métodos para atingimento de propriedades mecânicas são utilizados para os vergalhões da categoria CA-50. Para utilização do método que envolve tratamento térmico, podem-se empregar composições químicas mais baratas, no entanto o custo de aquisição de equipamentos para o tratamento e a disponibilidade de espaço físico são fatores fundamentais para considerar aplicação desse processo. Além desse método, há a possibilidade de adição de quantidades elevadas de carbono e manganês ou de elementos formadores de carbonetos no aço, elevando a resistência mecânica por mecanismos de endurecimento por solução sólida, precipitação e refino de grão.

No caso deste trabalho, os vergalhões estudados pertencem à categoria CA-50, sendo produzidos em rolos e resfriados ao ar após a laminação a quente. Para garantia de resistência mecânica, o aço SAE 1541 mod. conta com níveis elevados de carbono e manganês, sendo teores permitidos porque os vergalhões não precisam atender requisito de soldabilidade. Além disso, apresentam pequenas adições de vanádio que contribuem, principalmente através de mecanismos de endurecimento por precipitação, no ganho de propriedades mecânicas do produto.

Em adição aos requisitos estabelecidos para propriedades mecânicas, a norma define características geométricas diferentes para cada categoria, conforme segue abaixo:

1. Barras de Aço Lisas (CA-25): Devem apresentar superfície obrigatoriamente lisa, desprovida de quaisquer tipos de nervuras ou entalhes;

2. Barras de Aço Nervuradas (CA-50): São obrigatoriamente providas de nervuras transversais oblíquas, conforme ilustra a Figura 2.14. As barras devem possuir pelo menos duas nervuras longitudinais, contínuas e diametralmente opostas, que impeçam o giro da barra dentro do concreto, exceto no caso em que as nervuras transversais oblíquas estejam dispostas de forma a se oporem a este giro;

3. Fios de Aço (CA-60): Podem ser lisos, entalhados ou nervurados. Os fios de diâmetro nominal de 10,0 mm devem ter obrigatoriamente entalhes ou nervuras.

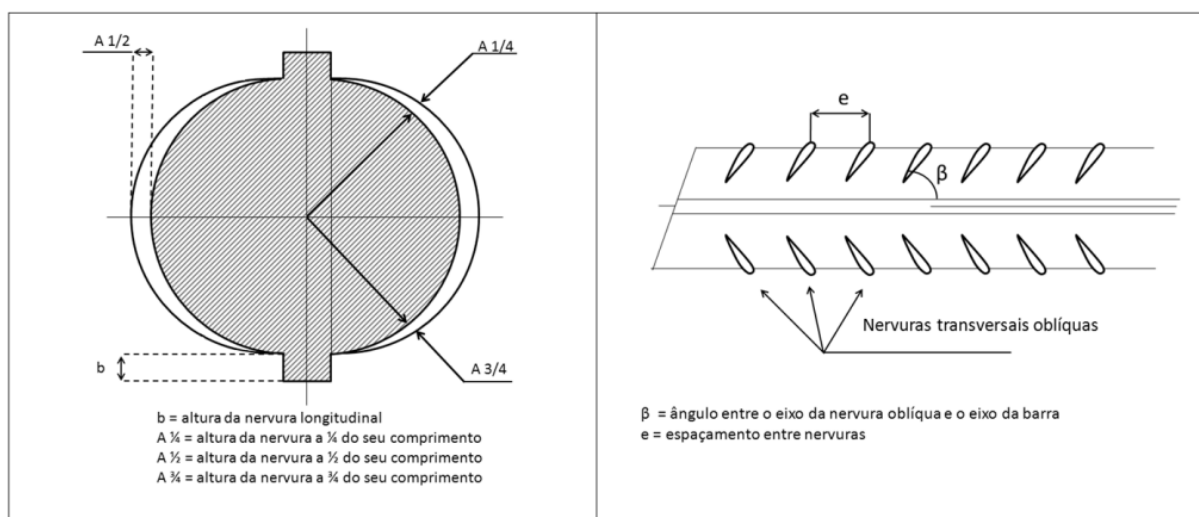


Figura 2.14 Configuração geométrica com nervuras transversais oblíquas em dois lados da barra e nervuras longitudinais

Fonte: ABNT (2007).

2.4 Mecanismos para Ganho de Resistência

Tendo em vista as aplicações a que são destinados os vergalhões e as exigências relacionadas às suas propriedades mecânicas, há diferentes processos utilizados que viabilizam ganhos significativos de resistência mecânica nos aços. Atualmente, os mecanismos mais explorados pela viabilidade econômica e pelo ganho de propriedades são: solução sólida, encruamento, refino de grão, tratamento térmico e precipitação.

2.4.1 Solução Sólida

O mecanismo consiste na interação do campo de deformação da rede cristalina causada por átomos de soluto com as discordâncias. Os átomos de elementos de liga podem ocupar posições substitucionais ou intersticiais. Nas duas situações, a deformação causada na rede dificulta a movimentação de discordâncias naquela região, que fica evidenciado no aumento da resistência e da dureza de ligas com solução sólida quando comparadas com metal puro.

No caso de produtos de aço laminados a quente, em temperaturas acima da austenitização, elementos de liga como Mn e Cr estabilizam a fase austenita, causando retardamento da formação de ferrita no resfriamento. Com isso, é favorecida a formação de perlita, também contribuindo para aumento da resistência do produto final. Esse efeito de endurecimento por favorecimento da perlita é diferente do endurecimento por solução sólida, mas também pode acontecer na presença de elementos de liga (NUNES 2009).

O mecanismo de endurecimento por solução sólida geralmente é utilizado na produção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480, principalmente em linhas de produção que não possuam equipamento para realizar tratamento térmico. Altos teores de carbono, manganês e alguns outros elementos de liga são adicionados para garantir o atendimento às especificações de propriedades mecânicas.

2.4.2 Encruamento

O encruamento é um fenômeno segundo o qual um material se torna mais duro e mais resistente quando deformado plasticamente. Este fenômeno também é conhecido como endurecimento por trabalho a frio, pois a temperatura em que ocorre é bem menor que a temperatura de fusão do material. No caso da maioria dos aços, o mecanismo acontece à temperatura ambiente (NUNES 2009).

Esse mecanismo de endurecimento pode ser explicado com base nas interações entre campos de deformação de discordâncias. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou com o encruamento, devido à multiplicação das discordâncias ou à formação de novas discordâncias. Por consequência, a distância média de separação entre as discordâncias diminui, elas são posicionadas mais próximas umas

das outras. Na média, as interações de deformação discordância-discordância são repulsivas. O resultado global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras. À medida que a densidade de discordâncias aumenta, essa resistência ao movimento se torna mais pronunciada. Dessa forma, a tensão imposta, necessária para deformar um metal, aumenta com o trabalho a frio (CALLISTER 2002).

As Figuras 2.15, 2.16 e 2.17 indicam, para três ligas metálicas distintas, aumento no limite de escoamento, aumento no limite de resistência à tração e redução na ductilidade em função do percentual de trabalho a frio sofrido pelo material.

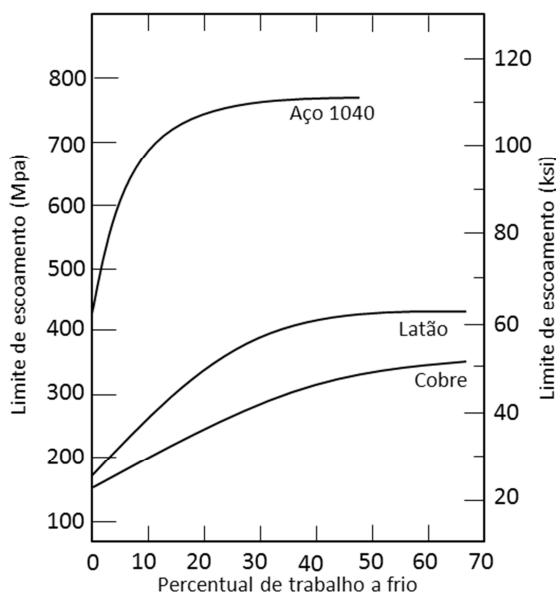


Figura 2.15 Aumento no limite de escoamento para o aço 1040, latão e cobre
Fonte: CALLISTER (2002).

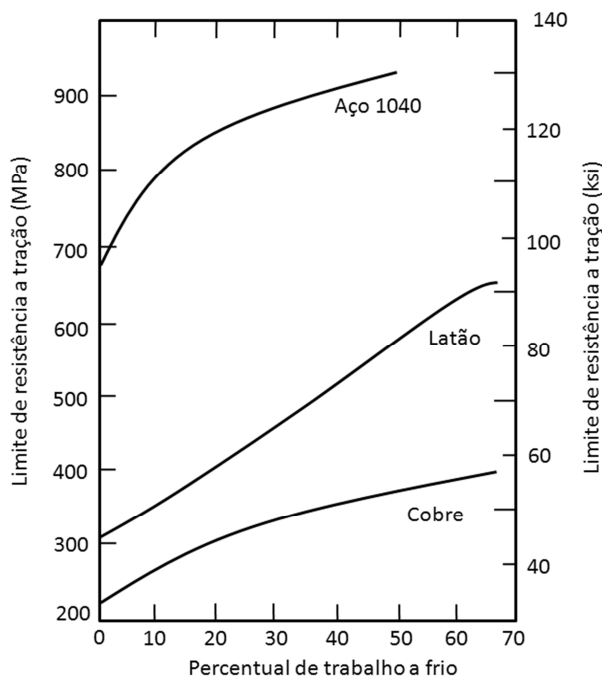


Figura 2.16 Aumento no limite de resistência à tração para o aço 1040, latão e cobre
Fonte: CALLISTER (2002).

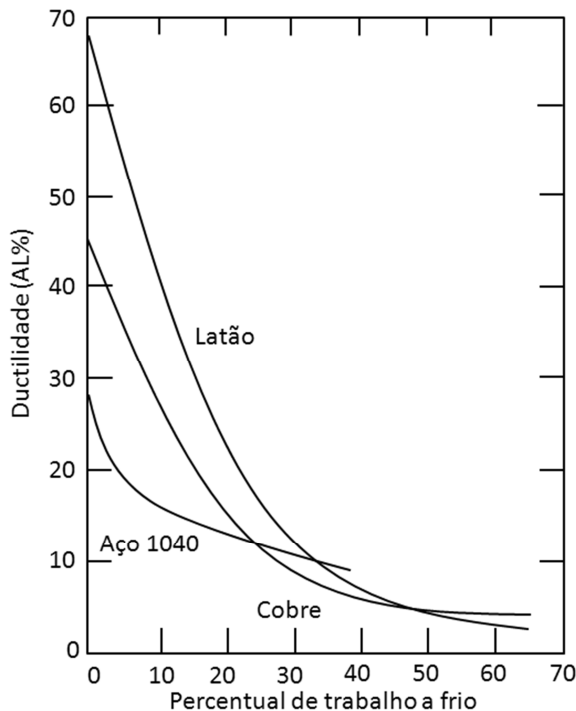


Figura 2.17 Redução da ductilidade em função do trabalho a frio para o aço 1040, latão e cobre
Fonte: CALLISTER (2002).

2.4.3 Refino de Grão

O tamanho dos grãos (ou diâmetro médio do grão) em um metal policristalino influencia as suas propriedades mecânicas. Grãos adjacentes possuem normalmente orientações cristalográficas diferentes e um contorno de grão comum. Durante a deformação plástica, o escorregamento ou movimento de discordâncias deve ter lugar através deste contorno comum e ele atua como barreira ao movimento das discordâncias por duas razões (CALLISTER 2002):

1. Uma vez que os dois grãos possuem orientações diferentes, uma discordância que atravessa para um grão vizinho terá que alterar sua direção de movimento. Isso se torna mais difícil à medida que a diferença de orientação cristalográfica aumenta.

2. A desordenação atômica no interior de uma região de contorno de grão irá resultar em uma descontinuidade de planos de escorregamento de um grão para dentro de outro.

Um material com granulação mais fina é mais duro e mais resistente do que um material com granulação grosseira, uma vez que o primeiro possui uma maior área total de contornos de grãos para dificultar o movimento de discordâncias. Também se deve mencionar que a redução no tamanho de grão aumenta não somente a resistência, mas também a tenacidade de muitas ligas (CALLISTER 2002).

A Figura 2.18 ilustra como acontece o movimento das discordâncias em relação aos planos de escorregamento, e como um contorno de grão dificulta e age como barreira à continuação do seu movimento.

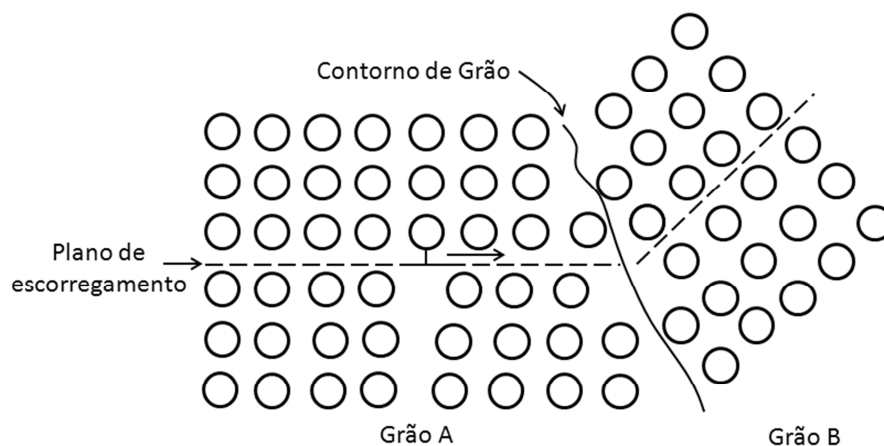


Figura 2.18 Movimento de uma discordância
 Fonte: CALLISTER (2002).

O mecanismo de endurecimento por refino de grão é utilizado na produção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480, em linhas de produção que não possuam equipamento para realizar tratamento térmico. Além de altos teores de carbono e de manganês, elementos refinadores de grão são adicionados nos aços para que os vergalhões atendam às propriedades mecânicas especificadas.

2.4.4 Tratamento Térmico

O processo de resfriamento de uma barra de aço-carbono levada acima da temperatura de austenitização, com o objetivo de formar a fase de martensita no produto final é conhecido como têmpera (NUNES 2009).

Os procedimentos convencionais de tratamento térmico, para a produção de aços martensíticos, envolvem normalmente o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra austenitizada em algum tipo de meio de resfriamento, tal como água, óleo ou ar. As propriedades ótimas de um aço que foi submetido a um processo de têmpera e depois de revenimento podem ser obtidas somente se, durante o tratamento térmico por têmpera, a amostra tiver sido convertida para conter elevado teor de martensita.

Durante o tratamento de têmpera, é impossível resfriar o material a uma taxa uniforme ao longo de toda sua extensão. A superfície irá sempre resfriar mais rapidamente

do que as regiões do interior. Portanto, a austenita irá se transformar ao longo de uma faixa de temperaturas, produzindo uma possível variação nas microestruturas e propriedades em função da posição no interior de uma amostra (CALLISTER 2002).

A Figura 2.19 indica a variação de dureza de um material após sofrer tratamento térmico de têmpera em função da distância a partir da extremidade temperada. Nota-se que a extremidade do material temperado passa por um resfriamento mais rápido, exibindo maior dureza, sendo uma posição em que facilmente se encontra microestrutura totalmente martensítica. À medida que se afasta da extremidade, a taxa de resfriamento reduz e resulta em diminuição da dureza. Reduções na taxa de resfriamento significam mais tempo para a difusão de átomos de carbono e formação de outras microestruturas, podendo haver misturas, ao longo da espessura da peça, de martensita, bainita, perlita e ferrita.

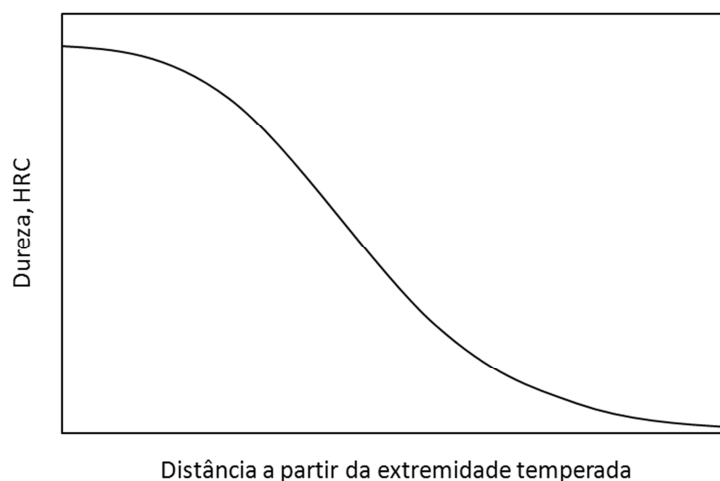


Figura 2.19 Variação da dureza do material em função da distância a partir da extremidade temperada

Fonte: CALLISTER (2002).

Este processo para endurecimento é muito utilizado na obtenção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480. Empregam-se equipamentos que são instalados após o último passe de laminação e que realizam o resfriamento com água.

Barras de aço com microestrutura formada por martensita têm propriedades mecânicas superiores a microestruturas formadas por ferrita-perlita. Por outro lado, a ductilidade da martensita é inferior comparada à ferrita-perlita. Dessa forma, na fabricação

de vergalhões para construção civil a têmpera não é total e o processo é ajustado para haver apenas uma têmpera superficial (NUNES 2009). Assim, a martensita da superfície traz aumento de resistência mecânica do vergalhão, enquanto o núcleo contendo perlita e ferrita garante a sua ductilidade.

2.4.5 Precipitação

A resistência e a dureza de algumas ligas metálicas podem ser melhoradas pela formação de partículas extremamente pequenas e uniformemente dispersas de uma segunda fase no interior da matriz da fase original. Isso deve ser obtido via tratamentos térmicos específicos. Esse processo é conhecido por endurecimento por precipitação, pois as pequenas partículas da nova fase são conhecidas por “precipitados” (CALLISTER 2002).

As partículas de segunda fase atuam como barreiras ao movimento de discordâncias, aumentando a resistência mecânica do material. Quanto maior for a dispersão de partículas e mais finas elas estiverem, maior será esse efeito.

No caso de aços carbono, elementos formadores de fases ligadas ao carbono, nitrogênio e oxigênio são normalmente empregados. Os elementos utilizados para essa formação de fases podem ser boro, vanádio, titânio ou nióbio que, durante um resfriamento da liga inicialmente levada à temperatura de austenitização, formam os precipitados (NUNES 2009).

Esse mecanismo de endurecimento é de comum utilização na obtenção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480, em linhas de produção que não contam com equipamentos para realização de tratamento térmico. Normalmente, empregam-se os aços microligados, que recebem este nome por conterem teores muito baixos – geralmente abaixo de 0,1% em massa – de elementos químicos como vanádio, nióbio e titânio. Os elementos são adicionados com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do vergalhão pela precipitação das partículas de segunda fase.

O vanádio é o elemento mais comumente usado na produção de vergalhões, pois oferece a melhor combinação de alta resistência mecânica, boa ductilidade, fácil dobramento, entre outras características. Aços microligados ao vanádio não requerem

sofisticados sistemas de resfriamento, sendo possível obter microestruturas e propriedades mecânicas desejadas diretamente durante resfriamento ao ar após a laminação.

Outra vantagem da presença de vanádio é sua afinidade natural com o nitrogênio. Quando há nitrogênio disponível, ocorre precipitação de nitretos de vanádio e conseqüente redução de nitrogênio livre em solução sólida, que poderia contribuir fortemente para fragilização do aço.

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todas as etapas envolvidas no procedimento experimental foram realizadas em uma usina siderúrgica com aciaria elétrica.

A proposta de alteração na composição química do aço SAE 1541 mod. foi realizada após levantamento de dados de propriedades mecânicas dos vergalhões obtidos a partir deste aço no ano de 2011.

O material testado foi laminado e deu origem a vergalhões em rolo da categoria CA-50, nas bitolas 6,3 e 8,0 mm. Parte do material foi endireitada por roletes, formando feixes de vergalhão reto nas duas bitolas.

As amostras coletadas foram analisadas em laboratório, passando por análises de composição química e microestrutural, além de ensaios de tração e dobramento.

A seguir, toda a metodologia empregada neste trabalho será descrita em detalhes.

3.1 Levantamento de Propriedades Mecânicas

Atualmente, são produzidos vergalhões em rolo nas bitolas 6,3 e 8,0 mm a partir do aço SAE 1541 modificado no setor de laminação da usina.

Inicialmente, foi realizado um levantamento das propriedades mecânicas destas bitolas, com a finalidade de identificar as melhores oportunidades e dar foco ao trabalho. Verificaram-se as médias e desvios padrão para limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e relação LR/LE dos lotes produzidos ao longo do ano de 2011, conforme mostrado nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3. Os valores indicados como limites mínimos nos gráficos são aqueles estabelecidos pela norma ABNT NBR 7480. Em função do efeito positivo da redução de ligas sobre o alongamento, este não foi discutido nesta avaliação.

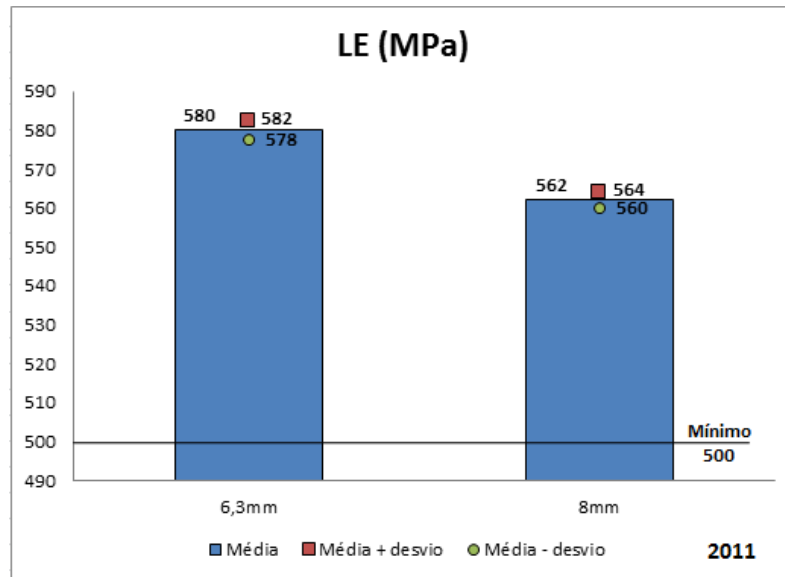


Figura 3.1 Limite de escoamento das bitolas de vergalhão no aço SAE 1541 modificado produzidas no ano de 2011

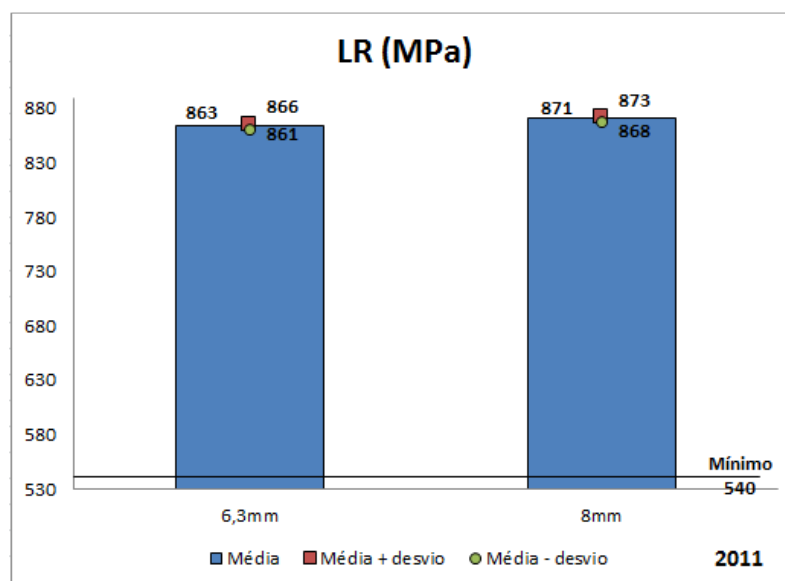


Figura 3.2 Limite de resistência das bitolas de vergalhão no aço SAE 1541 modificado produzidas no ano de 2011

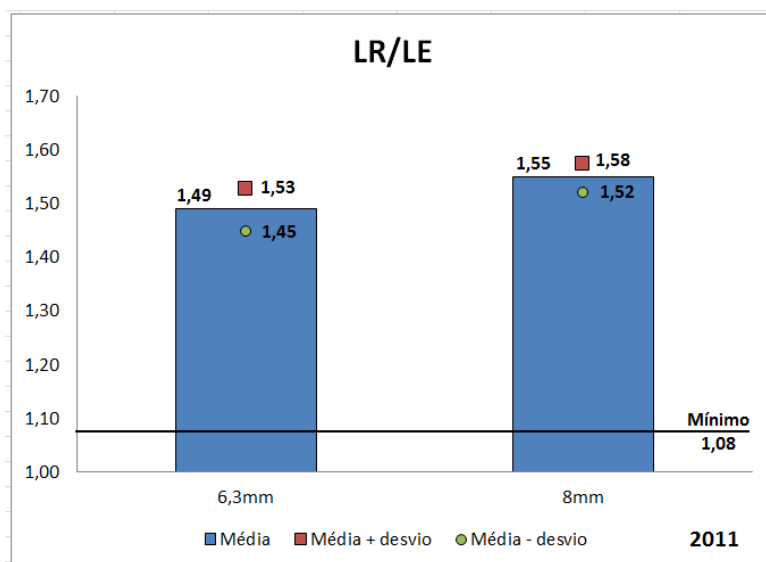


Figura 3.3 Relação entre limite de resistência e limite de escoamento das bitolas de vergalhão no aço SAE 1541 modificado produzidas no ano de 2011

Observou-se, durante a análise dos dados, que o LE é a propriedade mecânica que mais se aproxima do limite mínimo especificado na norma ABNT NBR 7480, tornando-a referência na execução do trabalho. Ambas as bitolas de vergalhão foram consideradas para testes, uma vez que há interesse em garantir que o aço com mudanças de composição apresente sucesso nos resultados para todos os produtos aos quais é destinado.

3.2 Aço SAE 1541 Modificado

O material empregado nos testes é um aço SAE 1541 modificado, que é um aço carbono com alto teor de manganês e microligado ao vanádio. As principais especificações da sua composição química original podem ser visualizadas na Tabela 3.1.

Com a finalidade de orientar a definição da composição química a ser proposta, foi analisado o histórico de composições químicas referentes aos lotes desse aço produzidos durante 2011. A equação 1 é uma simplificação utilizada como padrão interno da usina para cálculo do Carbono Equivalente no aço. As Figuras 3.4 a 3.10 ilustram a distribuição dos principais elementos químicos, além de relações importantes entre alguns elementos químicos nos lotes avaliados.

$$Ceq = C + \frac{(Mn+Si)}{8} \quad (1)$$

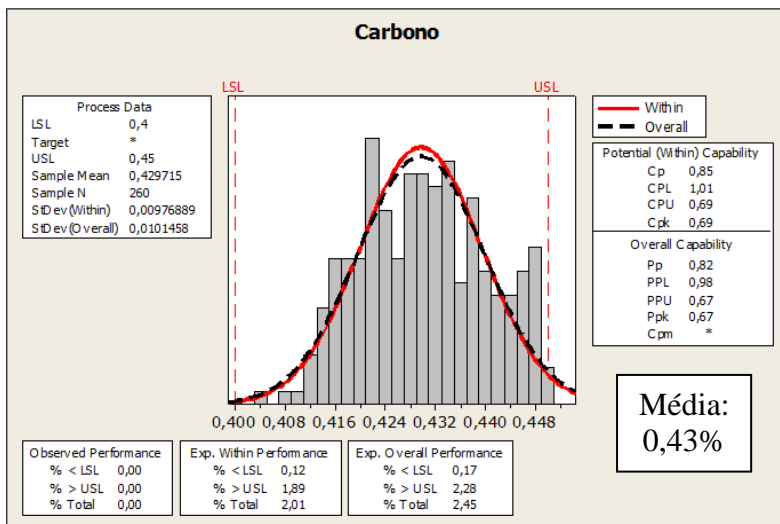


Figura 3.4 Gráfico de distribuição do elemento carbono no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011

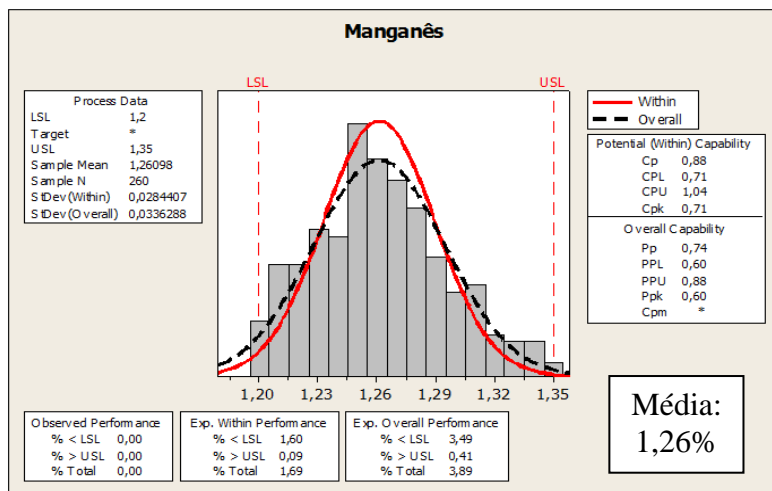


Figura 3.5 Gráfico de distribuição do elemento manganês no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011

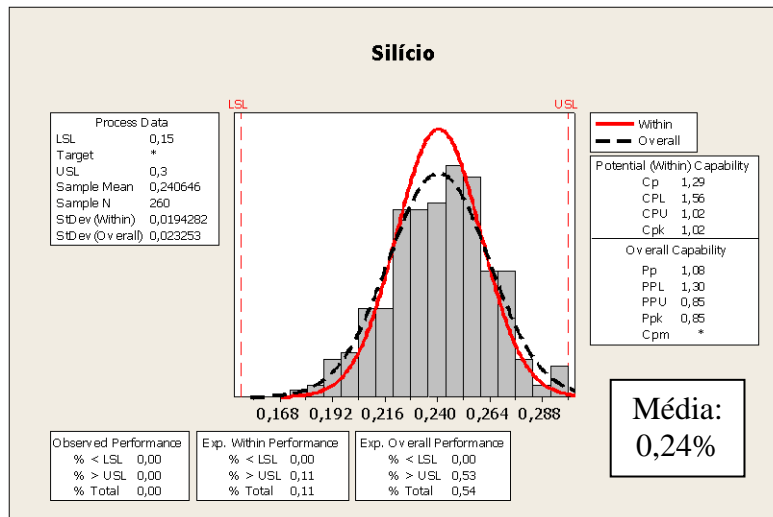


Figura 3.6 Gráfico de distribuição do elemento silício no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011

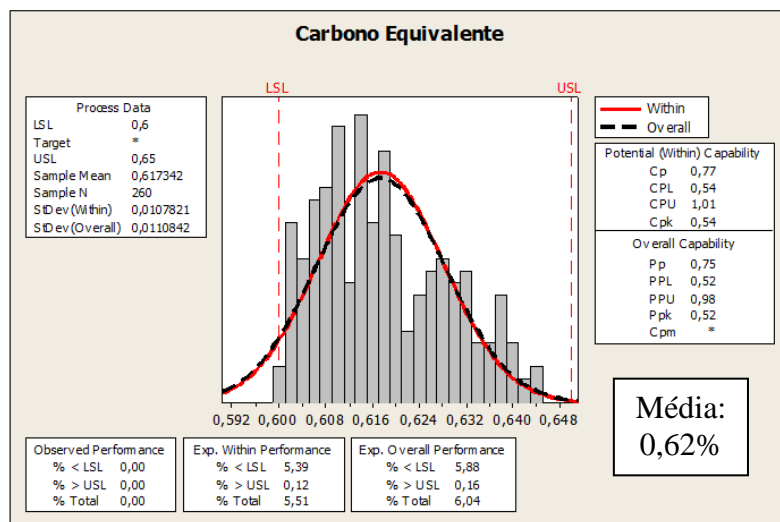


Figura 3.7 Gráfico de distribuição do carbono equivalente no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011

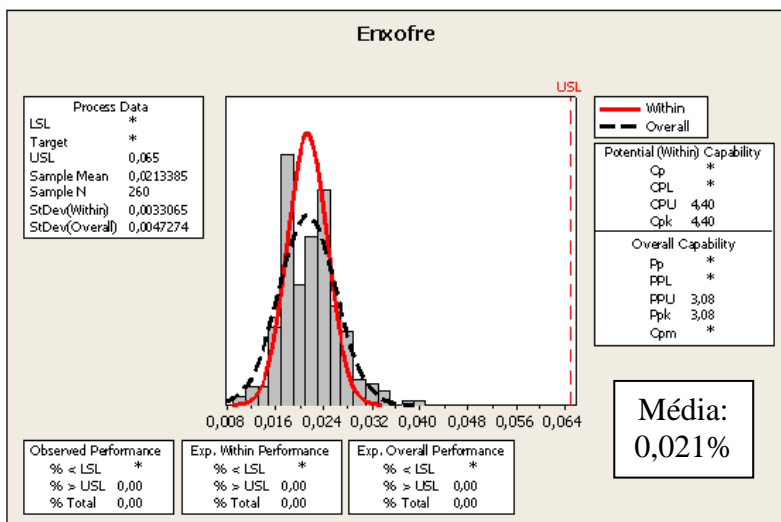


Figura 3.8 Gráfico de distribuição do elemento enxofre no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011

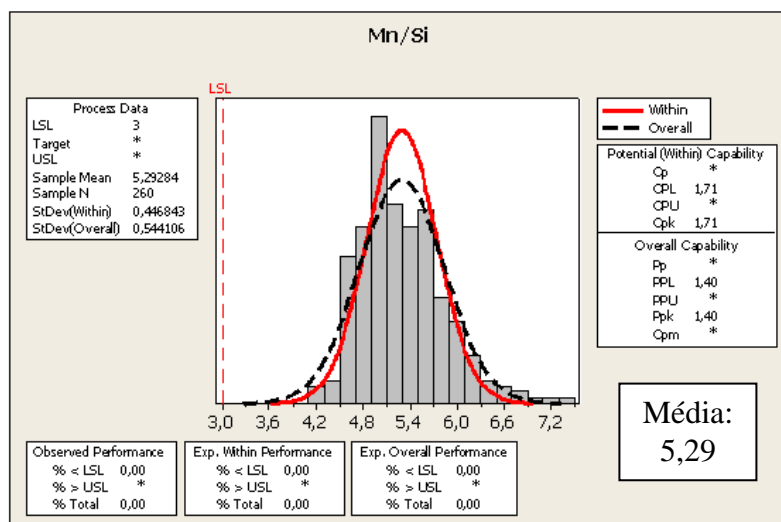


Figura 3.9 Gráfico de distribuição da relação Mn/Si no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011

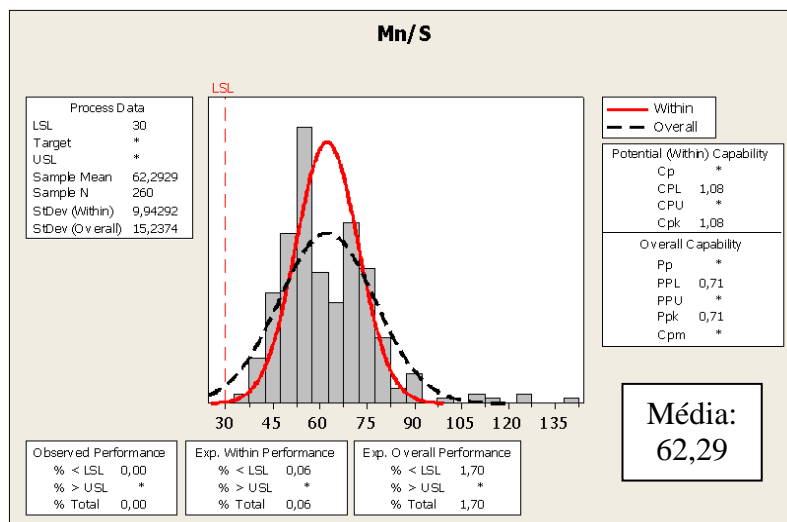


Figura 3.10 Gráfico de distribuição da relação Mn/S no aço SAE 1541 modificado durante o ano de 2011

A redução de manganês foi realizada em dois níveis. Inicialmente, foi considerada para testes a faixa de 1,1 a 1,3%. De acordo com os resultados dessa redução, pretende-se verificar a possibilidade de utilizar manganês entre 1,0 e 1,2%, que é considerada a faixa almejada.

As composições químicas estudadas neste trabalho foram denominadas proposta 1 e proposta 2, conforme mostra a Tabela 3.1, sendo testadas nessa ordem e representadas por faixas para cada elemento químico. Nessa tabela, também se encontra a composição original do aço SAE 1541 modificado, para fins comparativos.

Tabela 3.1 Faixas de elementos nas composições químicas original, proposta 1 e proposta 2

	Composição Química							
	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	V (%)	Mn/S	Mn/Si	Ceq (%)
Original	0,40	1,20	0,15	-	0,022	> 30	> 3	0,60
	0,45	1,35	0,30	0,065	0,035	> 30	> 3	0,65
Proposta 1	0,40	1,10	0,15	-	0,022	> 30	> 3	0,56
	0,45	1,30	0,30	0,065	0,035	> 30	> 3	0,65
Proposta 2	0,40	1,00	0,15	-	0,022	> 30	> 3	0,54
	0,45	1,20	0,30	0,065	0,035	> 30	> 3	0,64

Com o objetivo de considerar a condição mais crítica possível em termos de composição química, buscou-se produzir os lotes para testes com os elementos chave – responsáveis pelo ganho de resistência mecânica – nos limites inferiores das faixas propostas. A ideia, portanto, foi buscar durante a produção das corridas nas composições de teste 1 e 2 que carbono, manganês, silício e vanádio estivessem próximos dos seus respectivos percentuais mínimos. Assim, havendo atendimento às especificações de propriedades mecânicas utilizando essas composições, todas as demais variações de composição dentro das faixas atenderão aos valores estabelecidos pela norma. Inclusive, para composições com elementos acima dos teores mínimos, a tendência é de que os vergalhões apresentem valores maiores para as propriedades mecânicas.

Nas propostas de composição química, além de redução nos limites de manganês, houve um alargamento da faixa deste elemento, para facilitar as atividades operacionais envolvidas na adição de ligas. Faixas mais amplas viabilizam acertos mais diretos de teores dos elementos, sem que haja inúmeras correções, assim trazendo ganhos na eficiência dessa etapa do processo produtivo.

A relação Mn/S apresenta um limite mínimo a ser respeitado para garantir que haja formação de sulfetos de manganês. Segundo Penna (2005), uma baixa relação de Mn/S leva à formação de um líquido interdendrítico de sulfeto de ferro de baixo ponto de fusão durante a solidificação. Esta fase irá levar à formação de trincas internas no tarugo durante o lingotamento contínuo e trincas intergranulares durante a laminação a quente.

No limite atual de Mn/S, não há problemas associados a trincas. Conforme ilustrado anteriormente na Figura 3.8, os níveis de enxofre reais dos lotes desse aço costumam ser bem inferiores ao máximo permitido na composição química original, sendo viável manter o limite de Mn/S mesmo assumindo alguma das reduções de manganês propostas.

No caso de Mn/Si, é fundamental atender o valor estabelecido para que haja formação de inclusões líquidas durante o lingotamento. Valores baixos de Mn/Si favorecem formação de inclusões sólidas de sílica (SiO_2), que podem causar obstrução na válvula gaveta da panela e na válvula do distribuidor, além de descentralização do jato de aço do distribuidor para o molde.

Como atualmente a relação de Mn/Si não apresenta problemas associados a inclusões, as composições químicas de teste mantêm a mesma tolerância. A faixa de silício pôde ser mantida, uma vez que o atendimento da relação Mn/Si segue sendo possível com as reduções propostas de manganês.

A faixa de carbono equivalente da composição original foi estabelecida com um valor mínimo, para atingimento de propriedades mecânicas, e um valor máximo, para evitar fragilização do produto. São valores que servem como referência, e que devem ser avaliados em conjunto com as tolerâncias de carbono, manganês e silício durante a produção do aço, para que todos os limites sejam devidamente respeitados.

É possível observar que, nas duas composições testadas, os limites máximos de carbono equivalente respeitam o limite superior da composição original. Já para os limites mínimos, houve um deslocamento para valores menores. Observou-se nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 que existe margem nas propriedades mecânicas frente às composições químicas, o que torna possível seguir atendendo às determinações da norma ABNT NBR 7480 mesmo com essas reduções nos limites inferiores de C_{eq} .

Não há interesse em alterar os teores de carbono, por questões de garantia de propriedades mecânicas e tenacidade adequada no material. Outro elemento que não sofreu modificações foi o vanádio, pois não era o foco do estudo.

3.3 Produção do Vergalhão

Os lotes do aço nas composições empregadas neste trabalho tiveram origem em uma aciaria com forno elétrico a arco, que utiliza sucata metálica como principal matéria-prima. Os ajustes necessários para atingir as composições químicas de teste ocorreram em um forno-panela. Na sequência, o aço líquido passou para a etapa de lingotamento contínuo, onde foram produzidos tarugos de seção quadrada com 120 mm de lado. O aço solidificado na forma de tarugos foi matéria-prima para o processo de laminação dos vergalhões.

Na laminação, os tarugos passaram por um forno de reaquecimento, no qual atingiram temperaturas próximas a 1100°C. Depois disso, cada tarugo passou por um trem de laminação que conta com 22 passes, sendo que os últimos 8 passes aconteceram em um

bloco acabador. O trem de laminação apresenta uma sequência de gaiolas horizontais e verticais que, a partir dos cilindros com canais usinados, conformam os tarugos até chegarem no formato e no dimensional necessários para vergalhão.

Ao passar pelo último passe de laminação, presente no bloco acabador, o vergalhão adquiriu sua forma final. Em seguida, o material passou por uma zona de resfriamento, na qual água sob pressão reduziu a temperatura do laminado para um valor em torno de 950°C. Esse resfriamento acontece para que o vergalhão fique em temperatura adequada para haver uma boa formação de espiras, que é a etapa seguinte.

O formador de espiras é constituído por um tubo em curva, que é capaz de fazer o vergalhão adquirir forma de espiras. O produto, já em rolo, caiu em uma esteira, sobre a qual continuou resfriando ao ar sem qualquer processo de resfriamento forçado ou controlado. Na sequência, o material passou por um coletor de espiras e depois foi prensado, amarrado, pesado e identificado.

Por fim, na segunda composição de teste, o produto passou pelo processo de endireitamento por roletes e foi cortado em barras de comprimento especificado, que são agrupadas em feixes. Além do vergalhão em rolo, o vergalhão reto também foi considerado nos testes com o objetivo de verificar os efeitos desse endireitamento nas propriedades mecânicas do material.

3.4 Análise Química

As amostras para análise de composição química foram retiradas em diferentes momentos da fabricação do aço na aciaria: no forno elétrico, durante a etapa de fusão da matéria-prima; no forno-panela, antes e depois da adição de ligas metálicas; e no distribuidor, que é considerada para aprovação final do aço antes da solidificação e formação dos tarugos.

Os resultados de composições químicas expostos neste trabalho foram obtidos a partir de amostras retiradas dos vergalhões em rolo. Os ensaios foram realizados via espectrometria de emissão óptica.

3.5 Análise Microestrutural

As amostras de vergalhão foram coletadas, cortadas em pequenos pedaços e embutidas para análise microestrutural das seções transversais. Após embutimento, as amostras foram lixadas e polidas em feltro com pasta de diamante.

O ataque das superfícies com reagente Nital 2% foi utilizado para revelação das microestruturas. A captura das imagens foi realizada com auxílio de um microscópio óptico OLYMPUS BX60M acoplado a uma câmera digital e um sistema de aquisição de imagens por computador.

A análise permitiu a visualização das microestruturas e a determinação de tamanho de grão nos vergalhões com as composições químicas de teste. Através da técnica de cálculo de área, o software analisador de imagens LEICA QWIN permitiu obtenção dos valores de tamanho de grão nas amostras.

Todos os procedimentos de análise para a determinação de tamanho de grão seguiram a norma ASTM E112 (1995).

3.6 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração procederam de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892 (2002). A máquina INSTRON 5569, que é utilizada na rotina operacional, foi escolhida para realização dos ensaios com o intuito de que não houvesse alterações nas medições com relação à metodologia e aos procedimentos normalmente utilizados na liberação de vergalhões CA-50 nas bitolas 6,3 e 8,0 mm.

As amostras para este ensaio foram retiradas das espiras de vergalhão em rolo, e também do material endireitado. No caso dos produtos em rolo, foi necessário realizar um leve endireitamento manual das amostras para viabilizar o ensaio. Esse endireitamento foi de tal forma que a menor deformação plástica possível acontecesse, assim evitando alterações nos resultados de propriedades mecânicas por conta de encruamento das amostras.

Todas as amostras foram cortadas em comprimento de 400 mm e marcadas em espaçamentos de 10 vezes o diâmetro nominal do vergalhão, para determinação de

alongamento após a ruptura. O laboratório de ensaios tem controle e monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar, a fim de não comprometer os resultados.

Estes ensaios permitiram obter valores de limite de escoamento, limite de resistência, relação limite de resistência/limite de escoamento e alongamento após ruptura. Os resultados foram comparados aos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 7480.

3.7 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento foram realizados nas amostras de vergalhão em um equipamento de dobramento manual, sendo as dobras realizadas a 180° no material com suas extremidades livres, ao redor de um pino. A norma ABNT NBR 7480 determina que é suficiente realizar o dobramento com pino que apresente três vezes o diâmetro nominal do vergalhão. Com a finalidade de garantir atendimento à norma, as especificações internas da usina determinam que os ensaios sejam feitos utilizando um pino que apresenta diâmetro igual a duas vezes o diâmetro nominal do vergalhão.

A região externa da dobra, que sofreu deformação trativa, foi observada a olho nu, não podendo o material apresentar qualquer tipo de fissura ou quebra. As etapas envolvidas nos ensaios de dobramento seguiram os critérios definidos na norma ABNT NBR 6153 (1988).

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados de todos os ensaios realizados nos vergalhões produzidos a partir das duas variações de composição química estudadas para o aço SAE 1541 modificado.

4.1 Composição Química

Para este estudo, as corridas foram produzidas na aciaria objetivando os elementos carbono, manganês, silício e vanádio no mínimo das faixas propostas anteriormente. Em função de variações e limitações operacionais, conseguiu-se obter composições que apresentam algumas diferenças em relação ao desejado, mas que não representaram um aspecto negativo para os testes, conforme será detalhado na sequência.

4.1.1 Composição de Teste 1

A composição química desejada no primeiro teste é apresentada na Tabela 4.1. Os teores buscados para os elementos estão indicados na composição denominada “Objetivada Teste 1”, e os teores atingidos são descritos na composição “Realizada Teste 1”.

Tabela 4.1 Teores objetivados e realizados de elementos químicos para o teste 1

	Composição Química							
	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	V (%)	Mn/S	Mn/Si	Ceq (%)
Objetivada Teste 1	0,40	1,10	0,15	máx. 0,065	0,022	> 30	> 3	0,560
Realizada Teste 1	0,40	1,10	0,22	0,016	0,025	68,7	5,0	0,565

Pode-se observar que o silício ficou um pouco acima dos valores objetivados. No entanto, o impacto do teor desse elemento sobre o carbono equivalente foi muito baixo,

mantendo-o similar ao mínimo objetivado. O percentual de vanádio também é considerado reduzido e próximo do mínimo. É uma composição válida, pois num geral os elementos ficaram muito próximos dos valores desejados para o primeiro teste.

4.1.2 Composição de Teste 2

As composições “Objetivada Teste 2” e “Realizada Teste 2” podem ser visualizadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Teores objetivados e realizados de elementos químicos para o teste 2

	Composição Química							
	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	V (%)	Mn/S	Mn/Si	Ceq (%)
Objetivada Teste 2	0,40	1,00	0,15	máx. 0,065	0,022	> 30	> 3	0,540
Realizada Teste 2	0,39	0,97	0,22	0,020	0,024	49,2	4,3	0,538

Na produção do lote nessa composição, foi possível atingir os níveis reduzidos dos elementos químicos principais, sendo que o carbono e o manganês ficaram levemente abaixo dos teores almejados. Pode-se notar que isso não impactou significativamente no carbono equivalente, que ficou muito próximo ao desejado para as análises. A composição obtida para o segundo teste também é considerada adequada.

4.2 Caracterização Microestrutural

As microestruturas analisadas são de secções transversais das amostras de vergalhão em rolo nas composições químicas obtidas nos testes 1 e 2. Para cada composição, foram estudadas as microestruturas de vergalhão nas bitolas 6,3 e 8,0 mm. Todas as amostras foram coletadas das espiras ao final de cada rolo de vergalhão. Todas as imagens apresentam uma ampliação de 200X em microscópio óptico.

4.2.1 Análise Microestrutural do Teste 1

As microestruturas foram analisadas para 4 amostras por bitola de vergalhão em rolo. As micrografias resultantes para uma amostra de cada bitola na composição alcançada no teste 1, cujo teor de manganês ficou próximo a 1,1%, podem ser visualizadas nas Figuras 4.1 e 4.2. Para o vergalhão de 6,3 mm, os tamanhos de grão estão na ordem de 619 a 1100 μm^2 ou ASTM 7 a 8. Já no vergalhão 8,0 mm, os tamanhos de grão apresentaram-se na ordem de 1102 a 1321 μm^2 ou ASTM 6 a 7, com algumas zonas apresentando grãos com tamanho ASTM 4 a 5. Observa-se uma tendência dos grãos serem maiores na bitola mais grossa, o que pode ser resultado de taxas de resfriamento mais baixas em função da maior massa a ser resfriada.

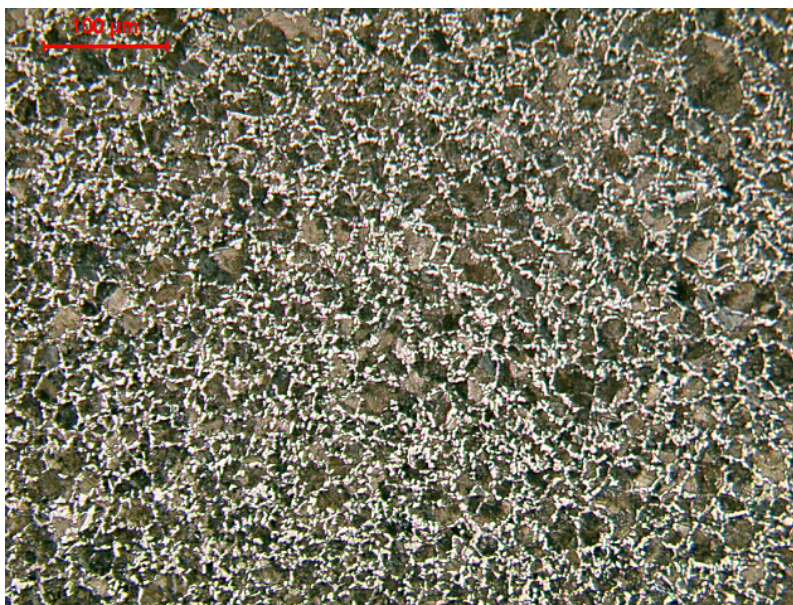


Figura 4.1 Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 6,3mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

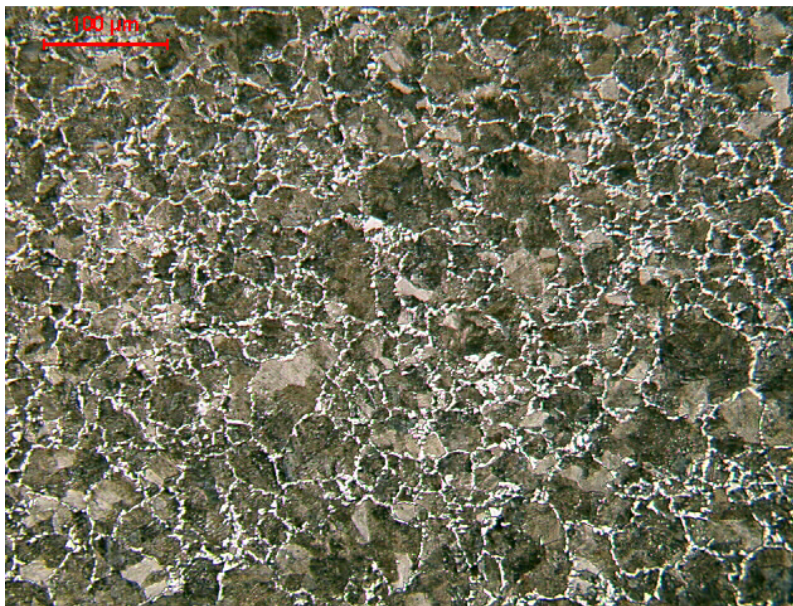


Figura 4.2 Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 8,0mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

4.2.2 Análise Microestrutural do Teste 2

As microestruturas foram analisadas para 4 amostras de cada variedade de vergalhão estudada. As micrografias de uma amostra de cada bitola de vergalhão na composição obtida no teste 2, com 1,0% de manganês, são ilustradas nas Figuras 4.3 e 4.4. O vergalhão 6,3 mm apresentou grãos com tamanho de 554 a 877 μm^2 ou ASTM 7 a 8. No vergalhão 8,0 mm, os tamanhos de grão ficaram entre 799 e 1230 μm^2 ou ASTM 6 a 7. Nessa composição, verificou-se a mesma tendência dos grãos atingirem tamanhos maiores na bitola de 8,0 mm.

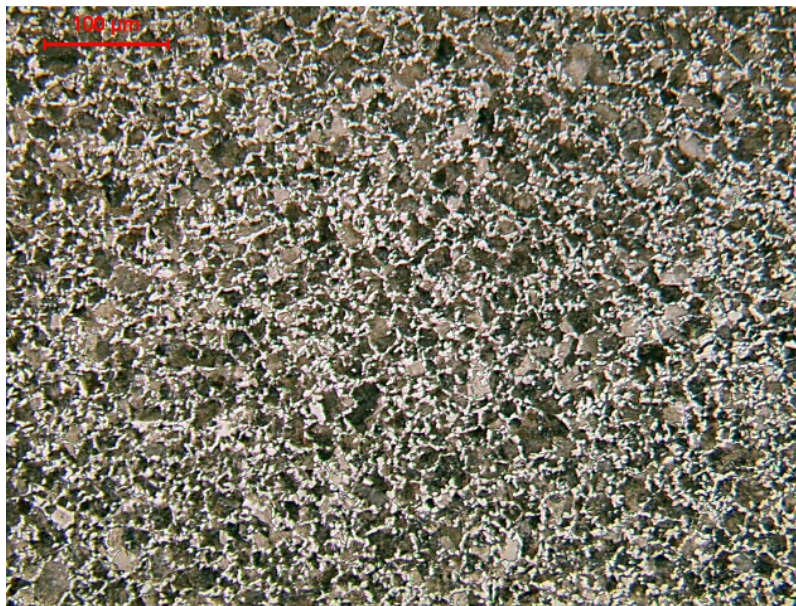


Figura 4.3 Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 6,3mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

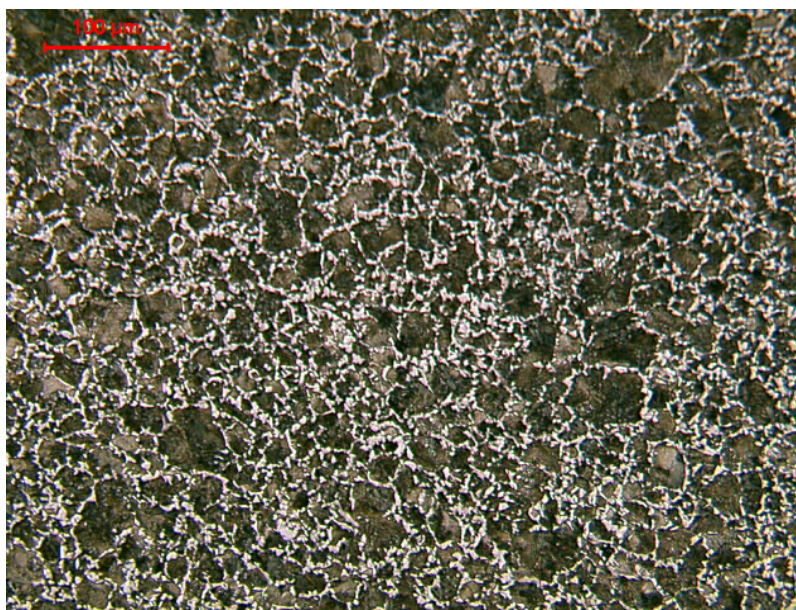


Figura 4.4 Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão na bitola 8,0 mm, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

Em ambas as composições estudadas, encontram-se microestruturas formadas por grãos de perlita em rede de ferrita, que apresentam uma distribuição de forma homogênea ao longo das secções das amostras. Essa homogeneidade microestrutural traz como benefício uma homogeneidade das propriedades mecânicas do produto final.

De maneira geral, não se observam diferenças nas microestruturas que sejam ocasionadas pelas variações de composição química propostas. Os tamanhos de grão estão bem próximos da condição normalmente encontrada na composição química original, também não havendo alterações nesse aspecto por conta das reduções de manganês. As Figuras 4.5 e 4.6 representam bem os tamanhos de grão usuais para as bitolas 6,3 e 8,0 mm, respectivamente. No caso da bitola de 6,3 mm, 4 amostras analisadas apresentaram grãos entre 875 e $1074\mu\text{m}^2$ ou ASTM 7. Para 4 amostras de vergalhão 8,0 mm, também na composição original, os grãos ficaram entre 1236 e $1690\mu\text{m}^2$ ou ASTM 6 a 7.

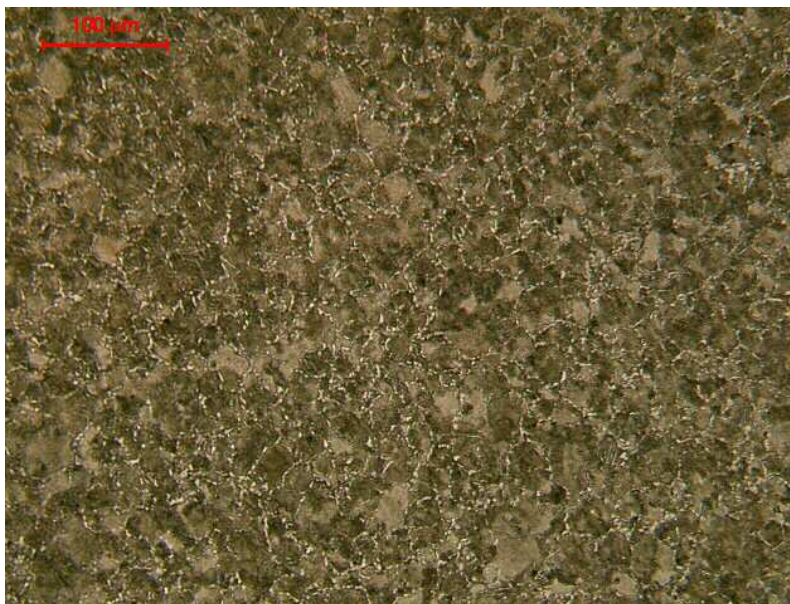


Figura 4.5 Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão 6,3 mm na composição sem modificações, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X



Figura 4.6 Microestrutura da secção transversal de uma amostra de vergalhão 8,0 mm na composição sem modificações, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

A baixa ampliação máxima do microscópio óptico impede a visualização dos precipitados de vanádio que se formam. A alta solubilidade do vanádio na austenita faz com que carbonetos e nitretos de vanádio se formem apenas no resfriamento do vergalhão, quando a austenita se transforma em ferrita. Esses precipitados barram a movimentação de discordâncias e assim levam a um aumento de resistência mecânica, pelo fenômeno de endurecimento por precipitação.

4.3 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados para as duas composições testadas para o aço SAE 1541 modificado. Dentro de cada composição, são apresentados os resultados de limite de escoamento, limite de resistência à tração, relação LR/LE e alongamento obtidos para amostras do vergalhão em rolo nas bitolas 6,3 e 8,0 mm.

No caso da composição de teste 2, ainda houve ensaios em amostras do produto após endireitamento por roletes. Foi necessário verificar as propriedades mecânicas do material reto, pois as propriedades do material em rolo nessa composição não apresentaram

resultados satisfatórios como será visto no item 4.3.2. Alguns comparativos também são realizados, a fim de identificar os efeitos da redução de manganês e do endireitamento nas propriedades mecânicas.

Desde o levantamento dos dados de 2011 na composição original do aço SAE 1541 mod. até os resultados obtidos nas composições estudadas, verificou-se que os lotes de vergalhão apresentam para as propriedades limite de resistência, relação LR/LE e alongamento uma margem muito grande em relação aos valores especificados pela norma ABNT NBR 7480. Essa margem também existe para o limite de escoamento, inclusive sendo a motivação do estudo de otimização de manganês, no entanto não se mostra tão pronunciada quanto é para as outras características. Em função disso, as discussões apresentam foco no limite de escoamento, por ser a propriedade mecânica crítica deste trabalho.

Os limites mínimos indicados nas tabelas e gráficos são aqueles especificados na norma ABNT NBR 7480.

4.3.1 Propriedades Mecânicas do Teste 1

No primeiro teste, em que foi estudada a redução de manganês para 1,1%, os ensaios de tração foram realizados em 4 amostras para cada bitola do material em rolo.

A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos para as amostras de vergalhão 6,3 mm em rolo. Para essa bitola, percebe-se que os limites de escoamento mantiveram excelente margem com relação ao especificado pela norma.

Tabela 4.3 Resultados das propriedades mecânicas para o vergalhão 6,3 mm em rolo na composição com 1,1% de manganês

Amostras 6,3 mm	LE Mínimo (MPa)	LE (MPa)	LR Mínimo (MPa)	LR (MPa)	LR/LE Mínimo	LR/LE	Along. Mínimo (%)	Along. (%)
01	500	550	540	836	1,08	1,52	8,0	15,9
02		556		847		1,52		13,0
03		539		848		1,57		11,7
04		538		840		1,56		14,9

É feito um comparativo, na Figura 4.7, entre a média de limite de escoamento anteriormente encontrada através do levantamento dos dados de 2011 (composição química original do aço SAE 1541 mod.) e a média calculada para as amostras do produto na composição do teste 1.

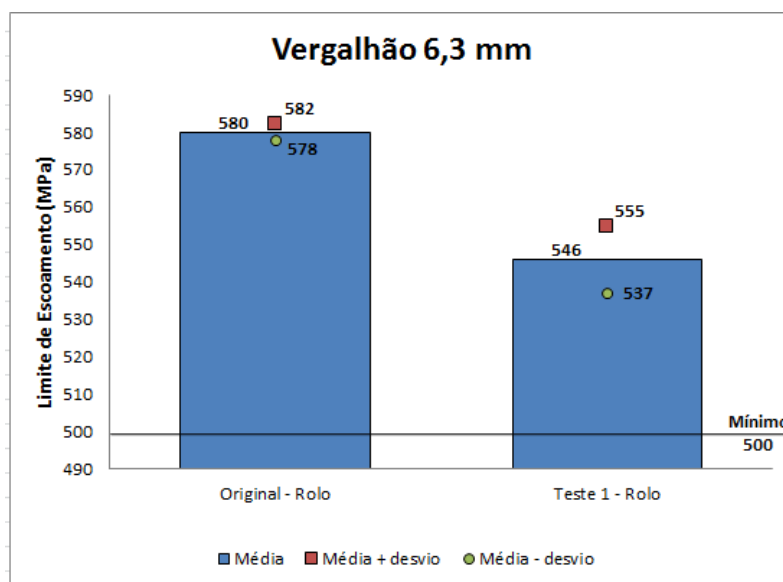


Figura 4.7 Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 6,3 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, e das amostras produzidas na composição de teste 1

Visualiza-se que a redução de manganês resultou em valores mais baixos de limite de escoamento. Esse efeito era esperado, uma vez que o elemento é um dos principais responsáveis por ganho de resistência mecânica no produto, através do mecanismo de endurecimento por solução sólida. Como havia sido verificada boa margem entre o mínimo de 500 MPa e os valores obtidos para a propriedade a partir da composição original nessa bitola, foi possível seguir com uma diferença segura entre os valores alcançados para o material apresentando 1,1% de manganês e o limite especificado.

Os resultados dos ensaios de tração nas amostras de vergalhão 8,0 mm podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Resultados das propriedades mecânicas para o vergalhão 8,0 mm em rolo na composição com 1,1% de manganês

Amostras 8,0 mm	LE Mínimo (MPa)	LE (MPa)	LR Mínimo (MPa)	LR (MPa)	LR/LE Mínimo	LR/LE	Along. Mínimo (%)	Along. (%)
01	500	527	540	824	1,08	1,57	8,0	16,7
02		519		801		1,54		18,1
03		522		819		1,57		15,7
04		520		810		1,56		15,7

Os valores resultantes de LE para a bitola de 8,0 mm ficaram um tanto abaixo daqueles atingidos para a bitola 6,3 mm. A possível explicação para isso é o fato da bitola mais fina apresentar a microestrutura mais refinada, conforme foi observado na análise microestrutural. O refino de grão é um mecanismo que permite aumento de resistência mecânica no material.

Mesmo apresentando resultados menores, a composição de teste 1 mostra-se satisfatória na bitola de 8,0 mm, uma vez que segue existindo boa margem em relação ao limite inferior estabelecido na norma.

A Figura 4.8 mostra um gráfico comparativo para o vergalhão 8,0 mm na composição original e na composição de teste 1.

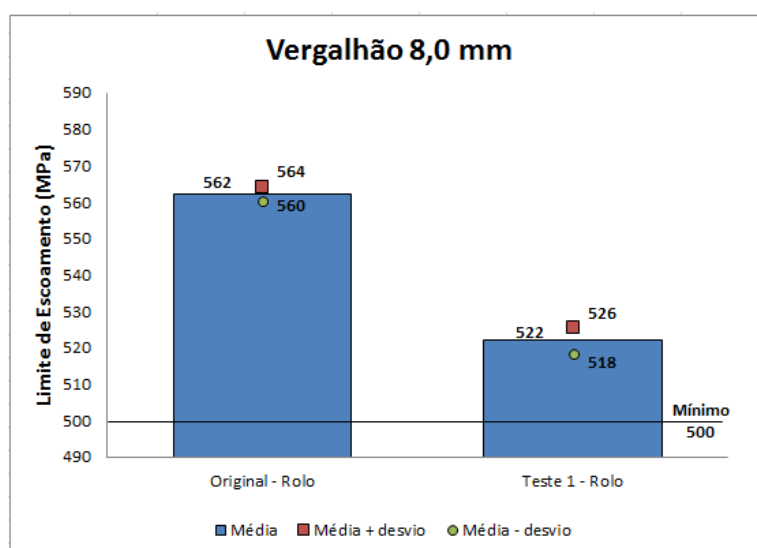


Figura 4.8 Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 8,0 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, e das amostras produzidas na composição de teste 1

Através dessa comparação entre médias, ficam evidentes a redução no limite de escoamento e a diferença que segue existindo entre a média dos resultados obtidos e o mínimo de 500 MPa. Pela análise do histórico de dados de 2011, ainda que haja variações no processo, a tendência é de que não aconteçam desvios para valores abaixo do mínimo especificado para o material de 8,0 mm com essa composição.

Os resultados obtidos na produção de vergalhão 6,3 e 8,0 mm em rolo com 1,1% de manganês foram considerados satisfatórios. Em função disso, não foram realizados ensaios para vergalhão reto nessa composição química, pois o endireitamento traz ganhos de resistência mecânica e deixaria os valores de propriedades com margem ainda maior em relação ao mínimo especificado pela norma brasileira. Como o objetivo é chegar a 1,0% de manganês, decidiu-se partir para os testes com a segunda composição proposta.

4.3.2 Propriedades Mecânicas do Teste 2

O segundo teste contemplou a redução de manganês para 1,0%, sendo inicialmente ensaiadas 4 amostras para cada bitola do material em rolo. Devido aos resultados limitados para o material em rolo, também foram ensaiadas 4 amostras para cada bitola de vergalhão reto.

A partir de amostras de vergalhão 6,3 mm em rolo e reto na composição de teste 2, atingiram-se os resultados que podem ser vistos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Resultados de propriedades mecânicas do segundo teste, para os vergalhões em rolo e reto na bitola 6,3 mm

Amostras 6,3 mm	LE Mínimo (MPa)	LE (MPa)		LR Mínimo (MPa)	LR (MPa)		LR/LE Mínimo	LR/LE		Along. Mínimo (%)	Along. (%)	
		Rolo	Reto		Rolo	Reto		Rolo	Reto		Rolo	Reto
01	500	504	524	540	783	780	1,08	1,55	1,49	8,0	15,9	16,5
02		515	558		772	815		1,50	1,46		16,3	14,1
03		504	549		786	812		1,56	1,48		17,5	14,2
04		513	548		764	790		1,49	1,44		17,0	16,4

A redução mais significativa de manganês considerada no segundo teste resultou em limites de escoamento próximos ao mínimo determinado na norma para o material em

rolo. No caso da bitola de 6,3 mm, os números ficaram acima do limite, porém eventuais variações de parâmetros de processo ao adotar essa composição podem resultar em não atendimento à norma.

É visível que há um ganho significativo de propriedades mecânicas no material endireitado. No caso do limite de escoamento, que é considerado o foco do estudo, há aumentos entre 20 e 50 MPa devido ao endireitamento. Pode-se dizer que o encruamento, gerado pela série de deformações que o material sofre durante o endireitamento por roletes, é responsável por essas mudanças na resistência mecânica do vergalhão. É um efeito positivo, pois ganha-se uma margem com relação ao limite estabelecido pela norma ABNT NBR 7480 para vergalhões da categoria CA-50, que é de 500 MPa.

A Figura 4.9 apresenta uma comparação entre o vergalhão 6,3 mm em rolo na composição original, em rolo na composição de teste 2 e reto na composição de teste 2.

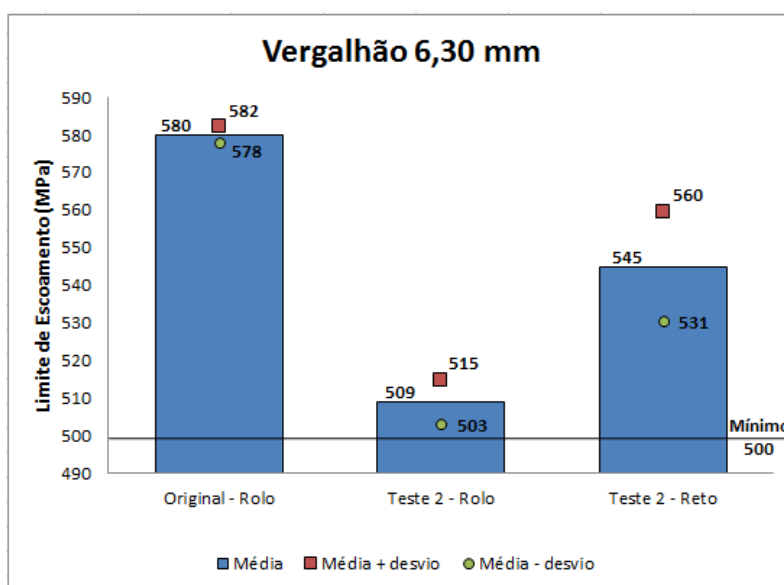


Figura 4.9 Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 6,3 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, do material em rolo na composição de teste 2 e do material reto na composição de teste 2

Há uma forte redução no LE para o material em rolo nessa bitola, não sendo recomendado o uso da composição 2 em vergalhões nessa condição. Uma recuperação significativa da propriedade acontece quando o material é endireitado, alcançando-se patamares que tornam interessante a aplicação da composição em vergalhão 6,3 mm reto.

Os valores das propriedades mecânicas atingidas para o vergalhão 8,0 mm em rolo e reto são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Resultados de propriedades mecânicas do segundo teste, para os vergalhões em rolo e reto na bitola 8,0 mm

Amostras 8,0 mm	LE Mínimo (MPa)	LE (MPa)		LR Mínimo (MPa)	LR (MPa)		LR/LE Mínimo	LR/LE		Along. Mínimo (%)	Along. (%)	
		Rolo	Reto		Rolo	Reto		Rolo	Reto		Rolo	Reto
01	500	491	518	540	778	792	1,08	1,58	1,53	8,0	16,0	15,7
02		499	519		792	793		1,59	1,53		16,0	15,6
03		491	519		775	789		1,58	1,52		16,8	15,1
04		499	514		790	791		1,58	1,54		15,7	14,1

O limite de escoamento, no caso do vergalhão 8,0 mm em rolo, ficou menor que o mínimo estabelecido na norma. Ao passar pelo endireitamento, o material apresenta ganhos no seu limite de escoamento, passando a valores que atendem à especificação da norma.

A Figura 4.10 mostra um comparativo entre o vergalhão 8,0 mm em rolo na composição original, em rolo na composição de teste 2 e reto na composição de teste 2.

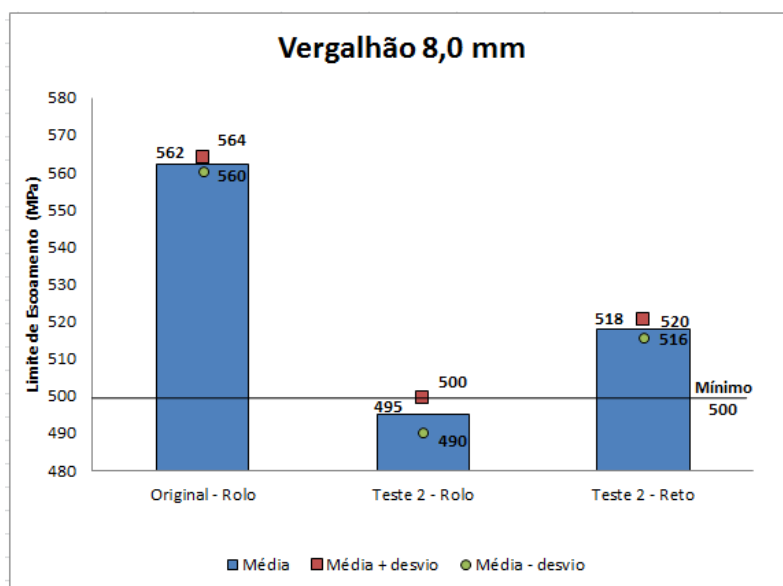


Figura 4.10 Gráfico comparativo entre as médias de LE dos lotes de vergalhão 8,0 mm em rolo produzidos em 2011 na composição original, do material em rolo na composição de teste 2 e do material reto na composição de teste 2

O gráfico comparativo evidencia a queda do LE na bitola de 8,0 mm em rolo para valores abaixo do mínimo de 500 MPa, decorrente da redução para 1,0% de manganês. Com o ganho de resistência mecânica em função do endireitamento, pode-se dizer que existe a possibilidade de aplicação da segunda composição de teste em vergalhão 8,0 mm reto.

4.4 Ensaio de Dobramento

Os dobramentos foram realizados nas amostras priorizando regiões onde existem marcações nos vergalhões, tais como número da bitola e marca do produto. Isso foi considerado com a finalidade de ensaiar pontos críticos, que muitas vezes tendem a fissurar ou romper preferencialmente, pois são regiões que concentram tensões. Não foi identificado a olho nu qualquer tipo de fissura ou quebra na região tracionada em todas as amostras ensaiadas.

4.4.1 Ensaios de Dobramento do Teste 1

Foram ensaiadas 4 amostras de cada bitola do vergalhão em rolo na composição do primeiro teste. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram as fotografias de algumas amostras após realização do ensaio.



Figura 4.11 Amostras de vergalhão em rolo após ensaio de dobramento a 180° na bitola 6,3 mm



Figura 4.12 Amostras de vergalhão em rolo após ensaio de dobramento a 180° na bitola 8,0 mm

4.4.2 Ensaio de Dobramento do Teste 2

Na composição atingida no teste 2, foram ensaiadas 4 amostras para cada uma das seguintes condições: vergalhão 6,3 mm em rolo, 8,0 mm em rolo, 6,3 mm reto e 8,0 mm reto. Algumas amostras de material em rolo após dobramento podem ser visualizadas nas Figuras 4.13 e 4.14. No caso do vergalhão reto, podem-se ver os resultados dos ensaios nas Figuras 4.15 e 4.16.



Figura 4.13 Resultados dos ensaios de dobramento a 180° nas amostras de vergalhão em rolo na bitola 6,3mm



Figura 4.14 Resultados dos ensaios de dobramento a 180° nas amostras de vergalhão em rolo na bitola 8,0mm



Figura 4.15 Amostras de vergalhão reto após ensaio de dobramento a 180° na bitola 6,3mm



Figura 4.16 Amostras de vergalhão reto após ensaio de dobramento a 180° na bitola 8,0mm

O material reto, por ter sofrido encruamento durante o endireitamento por roletes, poderia apresentar fissuras pelo aumento da sua resistência mecânica. Os dobramentos, no entanto, evidenciam que esse ganho no limite de escoamento aconteceu sem prejudicar a ductilidade do material.

5.0 CONCLUSÕES

Tendo como referência os testes realizados e os resultados obtidos neste trabalho, podem-se chegar às seguintes conclusões:

1. A composição química que propõe faixa de 1,1 a 1,3% de manganês atendeu, para os vergalhões 6,3 e 8,0 mm em rolo, aos valores de propriedades mecânicas estabelecidos pela norma ABNT NBR 7480;

2. Ainda considerando a faixa de 1,1 a 1,3% de manganês, e tendo como base o atendimento à norma pelo material em rolo e o efeito do endireitamento, a composição pode ser adotada para fabricação de vergalhão 6,3 e 8,0 mm reto;

3. O endireitamento por roletes resultou em ganhos significativos no limite de escoamento dos vergalhões nas bitolas 6,3 e 8,0 mm, da ordem de 20 a 50 MPa;

4. A composição química que propõe faixa de 1,0 a 1,2% de manganês não atendeu, para os vergalhões 6,3 e 8,0 mm em rolo, aos valores de propriedades mecânicas estabelecidos pela norma ABNT NBR 7480;

5. Ainda considerando a faixa de 1,0 a 1,2% de manganês, para os vergalhões 6,3 e 8,0 mm reto, houve atendimento às propriedades mecânicas especificadas na norma ABNT NBR 7480;

6. Os vergalhões, em ambas as composições testadas, não apresentaram qualquer tipo de fissura ou quebra na região tracionada durante os ensaios de dobramento;

7. A metodologia empregada neste trabalho é válida, pois além de ter como base levantamento e análise de um histórico de dados que orientaram melhor os testes, também considerou condições críticas de composição química, com a finalidade de garantir resultados mais previsíveis e satisfatórios.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser aprofundado e complementado a partir das seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1. Avaliar parâmetros de laminação, tais como: vazão de água na zona de resfriamento que antecede o formador de espiras, temperatura no próprio formador de espiras e condições de resfriamento do material na esteira em que acontece resfriamento ao ar do material em rolo. Com essa avaliação, pode-se entender o efeito desses parâmetros sobre as propriedades mecânicas dos vergalhões produzidos a partir de aços carbono com alto manganês e microligados ao vanádio. Existindo domínio sobre essas variáveis, podem-se testar teores ainda menores de manganês que os estudados neste trabalho;

2. Buscar variações nos teores de vanádio no aço, com o objetivo de testar a viabilidade de redução dos custos de produção do material, e ainda assim seguir atendendo às propriedades mecânicas exigíveis por norma;

3. Alterar os teores de nitrogênio no aço microligado ao vanádio, com cautela para não haver fragilização dos vergalhões, e verificar a influência sobre as propriedades mecânicas do produto final. Dessa forma, podem-se compreender as formações de nitretos de vanádio, que ocorrem por conta da afinidade que os dois elementos apresentam, e os ganhos de resistência mecânica que acontecem nos vergalhões em função disso;

4. Aprofundar o conhecimento com relação aos precipitados de vanádio, com auxílio de técnicas de microscopia apropriadas, e a sua importância na garantia de resistência mecânica de vergalhões.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. ASTM International, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6153**: Produtos metálicos - Ensaio de dobramento semi-guiado. Rio de Janeiro, 1988.

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

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

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço Brasil 2012: institucional**. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder_Aco_Brasil_2012_Institucional.pdf>. Acesso em 15 Jun. 2012.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2011**. Rio de Janeiro: O Instituto, 2011.

MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: ABM, 2007.

NIKOLAOU, J.; PAPADIMITRIOU, G. D. **Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore, microalloyed with vanadium and work-hardened)**. *Construction and Building Materials* 18. 4, p. 234-254, 2004.

NUNES, L. M. **Desenvolvimento de Aço Microligado para a Produção de Vergalhão Nervurado**. Dissertação. PPGE: PUCRS, 2009.

PENNA, L. V. **Trinca de Solidificação Off-Corner no Lingotamento Contínuo de Tarugos**. Dissertação. PPGEM: UFMG, 2005.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. 3. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Processos produtivos: laminação**. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/epdprocessos/laminacao>> Acesso em 25 Jun. 2012.

WORD STEEL ASSOCIATION. **Steel production 2011**. Disponível em:
<<http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/2011-steel-production.html>>.
Acesso em 15 Jun. 2012.