

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

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO DOS EFEITOS DO MÉTODO DE PRODUÇÃO EM ACIARIA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PRODUTOS TREFILADOS A PARTIR DE AÇO
SEMELHANTE AO SAE 1045

João Vinícius de Souza Vares

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2016

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

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO DOS EFEITOS DO MÉTODO DE PRODUÇÃO EM ACIARIA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PRODUTOS TREFILADOS A PARTIR DE AÇO
SEMELHANTE AO SAE 1045

JOÃO VINÍCIUS DE SOUZA VARES
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2016

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Lisiane Trevisan – IFRS/Farroupilha
Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes – IFRS/Caxias do Sul
Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt – UFRGS/LaSid

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado uma família que sempre me apoia e incentiva tanto, por me dar saúde para perseguir e conquistar meus objetivos.

Aos meus pais, Carmen e Sílvio, pelo amor e carinho incondicionais; por sempre batalharem para me proporcionar as melhores condições em educação; por transmitirem ensinamentos de vida, de elevados valores éticos e morais; por tornarem possível a realização desse sonho.

À minha noiva Luisa Helena, por todo amor, carinho, apoio e incentivo para sempre seguir em busca de meus sonhos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Afonso Reguly, pela orientação e aconselhamento na execução deste trabalho.

Ao colega e amigo Rodrigo Machado pelo apoio nas análises metalográficas.

Aos colegas de trabalho, destacando Bruna Camacho, Iara Chemale, Marcus Steffenon, Rafael Wolanin, e Thiago Flor pela ajuda na condução deste trabalho, bem como pelo aprendizado que a mim proporcionaram e Alexsander Vilela, Elidiane Jaques, Henrique Brum, Janine Scherer e Luciana Wist, que me auxiliaram nos procedimentos experimentais.

A esta Universidade, pelo ensino de excelência e por todas as oportunidades oferecidas.

Por fim, agradeço àqueles que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS..... | VIII |
| LISTA DE TABELAS..... | XI |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS..... | XII |
| RESUMO..... | XIII |
| ABSTRACT | XIV |
| 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 do Aço no Brasil | 5 |
| 2.2 PRODUÇÃO DE ARAMES | 8 |
| 2.2.1 Produção do Aço..... | 10 |
| 2.3 ESPECIFICAÇÕES DO AÇO | 24 |
| 2.4 MECANISMOS PARA GANHO DE RESISTÊNCIA..... | 24 |
| 2.4.1 Endurecimento por Solução Sólida..... | 25 |
| 2.4.2 Endurecimento por Deformação Plástica a Frio | 26 |
| 2.4.3 Endurecimento por Refino de Grão | 28 |
| 2.4.4 Endurecimento por Tratamento Térmico..... | 29 |
| 2.4.5 Endurecimento por Precipitação | 31 |
| 2.5 ENVELHECIMENTO EM AÇOS | 31 |
| 2.6 ELEMENTOS RESIDUAIS..... | 33 |
| 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 36 |
| 3.1 LEVANTAMENTO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS..... | 36 |
| 3.2 AÇO PRODUZIDO VIA ACIARIA A OXIGÊNIO..... | 39 |
| 3.3 PRODUÇÃO DO AÇO | 44 |
| 3.4 ANÁLISE QUÍMICA..... | 45 |
| 3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL | 45 |
| 3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO | 46 |
| 3.7 ENSAIO DE ENROLAMENTO..... | 47 |
| 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 48 |
| 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA..... | 48 |
| 4.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL..... | 49 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 4.2.1 | Análise Microestrutural da Condição AEL 1 | 49 |
| 4.2.2 | Análise Microestrutural da Condição AEL 2 | 50 |
| 4.2.3 | Análise de Imagens | 53 |
| 4.3 | ENSAIO DE TRAÇÃO | 56 |
| 4.3.1 | Propriedades Mecânicas do aço AEL | 56 |
| 4.4 | ENSAIO DE ENROLAMENTO | 59 |
| 5.0 | CONCLUSÕES | 60 |
| 6.0 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 61 |
| 7.0 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Distribuição da produção mundial de aço bruto em 2015..... | 4 |
| Figura 2 | Distribuição mundial do consumo aparente de produtos siderúrgicos em 2015..... | 4 |
| Figura 3 | Distribuição da produção de aço bruto por empresas – 2015 | 5 |
| Figura 4 | Mercado brasileiro de aço – Evolução do Consumo aparente de produtos siderúrgicos no período 2008/2015 | 6 |
| Figura 5 | Mercado mundial de aço – Consumo per capita de aço bruto e Consumo aparente de aço bruto no ano de 2015..... | 7 |
| Figura 6 | Mercado brasileiro de aço – Evolução da participação das importações no consumo aparente final per capita no período 2008/2014..... | 7 |
| Figura 7 | Produção brasileira de aço bruto por processo de aciaria em 2015 | 8 |
| Figura 8 | Sistema de condução da videira em espaldeira; indicadas pelas setas as posições dos arames. | 9 |
| Figura 9 | Fluxo esquemático da rota de produção de arames de aço em uma usina siderúrgica. | 9 |
| Figura 10 | Fluxograma da produção de aço em usinas integradas e semi-integradas (mini-mills)..... | 11 |
| Figura 11 | Forno elétrico a arco utilizado para a fusão da carga metálica na produção de aço. | 12 |
| Figura 12 | Forno-panela utilizado para o acerto de composição química e de temperatura na produção do aço. | 12 |
| Figura 13 | Panela repassando o aço líquido para o distribuidor, que por sua vez, repassa aos veios da máquina de lingotamento contínuo. | 13 |
| Figura 14 | Forno de reaquecimento para laminação de tarugos. | 14 |
| Figura 15 | Desenho esquemático da conformação exercida pelos cilindros de laminação. | 15 |
| Figura 16 | Equipamento situado ao final do processo de laminação responsável pela formação das espiras..... | 16 |
| Figura 17 | Representação esquemática do processo de trefilação com fieira a partir de fio-máquina. | 17 |
| Figura 18 | Representação esquemática que mostra seção longitudinal de uma fieira. | 18 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 19 | Representação esquemática de uma fieira com os esforços envolvidos..... | 19 |
| Figura 20 | Representação esquemática de uma fieira e suas regiões..... | 19 |
| Figura 21 | Camada de lubrificante formada entre o arame e a fieira, a partir da passagem do arame e arraste do lubrificante..... | 20 |
| Figura 22 | Camada de lubrificante formada entre o arame de aço e a fieira. | 21 |
| Figura 23 | Etapas básicas do processo de galvanização por imersão a quente..... | 22 |
| Figura 24 | Perfil transversal de peça galvanizada por imersão a quente | 22 |
| Figura 25 | Tempo de vida útil esperado do revestimento de acordo com sua espessura e o ambiente em que se encontra inserido. | 24 |
| Figura 26 | Efeito de adições de elementos de liga em curvas tensão-deformação | 26 |
| Figura 27 | Variação das propriedades mecânicas com a quantidade de trabalho a frio. | 27 |
| Figura 28 | Ilustração do movimento de uma discordância frente a um contorno de grão ... | 28 |
| Figura 29 | Perfil de variação da dureza do material em função da distância até a extremidade temperada..... | 30 |
| Figura 30 | Limite de resistência do fio-máquina produzido a partir do aço AOX no ano de 2015 | 37 |
| Figura 31 | Estricção do fio-máquina produzido a partir do aço AOX no ano de 2015 | 37 |
| Figura 32 | Limite de resistência do arame produzido a partir do aço AOX, na bitola 2,10 mm, no ano de 2015 | 38 |
| Figura 33 | Carga de ruptura do arame produzido a partir do aço AOX, na bitola 2,10 mm, no ano de 2015..... | 38 |
| Figura 34 | Alongamento do arame produzido a partir do aço AOX, na bitola 2,10 mm, no ano de 2015..... | 39 |
| Figura 35 | Distribuição do elemento carbono no aço AOX, durante o ano de 2015 | 40 |
| Figura 36 | Distribuição do elemento manganês no aço AOX, durante o ano de 2015 | 40 |
| Figura 37 | Distribuição do elemento silício no aço AOX, durante o ano de 2015 | 41 |
| Figura 38 | Distribuição do elemento fósforo no aço AOX, durante o ano de 2015 | 41 |
| Figura 39 | Distribuição do elemento enxofre no aço AOX, durante o ano de 2015..... | 41 |
| Figura 40 | Distribuição do somatório dos elementos cromo, cobre e níquel no aço AOX, durante o ano de 2015..... | 42 |
| Figura 41 | Distribuição do carbono equivalente no aço AOX, durante o ano de 2015 | 42 |
| Figura 42 | Distribuição do elemento nitrogênio no aço AOX, durante o ano de 2015 | 42 |
| Figura 43 | Dispositivo para realização dos ensaios de enrolamento dos arames..... | 47 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 44 | Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina da condição AEL 1, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X..... | 49 |
| Figura 45 | Microestrutura da seção longitudinal de uma amostra de arame da condição AEL 1, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X..... | 50 |
| Figura 46 | Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina da condição AEL 2, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X..... | 50 |
| Figura 47 | Microestrutura da seção longitudinal de uma amostra de arame da condição AEL 2, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X..... | 51 |
| Figura 48 | Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AOX, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X..... | 52 |
| Figura 49 | Microestrutura da seção longitudinal de uma amostra de arame do aço AOX, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X | 52 |
| Figura 50 | (a) Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AOX, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 500X; (b) imagem tratada em software..... | 53 |
| Figura 51 | (a) Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AEL 1, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 500X; (b) imagem tratada em software..... | 54 |
| Figura 52 | (a) Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AEL 2, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 500X; (b) imagem tratada em software..... | 54 |
| Figura 53 | Micrografias obtidas através de microscopia eletrônica para determinação do espaçamento interlamelar nas amostras AOX (a), AEL 1 (b) e AEL 2 (c) | 55 |
| Figura 54 | Limite de resistência dos fios-máquina das condições AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX | 57 |
| Figura 55 | Estricção dos fios-máquina das condições AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX..... | 57 |
| Figura 56 | Limite de resistência dos arames produzidos a partir dos aços AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX | 58 |
| Figura 57 | Carga de ruptura dos arames produzidos a partir dos aços AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX | 58 |
| Figura 58 | Alongamento dos arames produzidos a partir dos aços AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX | 58 |
| Figura 59 | Amostra de arame após o ensaio de enrolamento..... | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | Massa mínima da camada de zinco para arames galvanizados..... | 23 |
| Tabela 2 | Especificação do arame galvanizado..... | 39 |
| Tabela 3 | Composição química expressa em faixas de elementos para as composições dos aços semelhantes ao SAE 1045, AOX e AEL; carbono equivalente médio, para efeitos comparativos..... | 43 |
| Tabela 4 | Composição química das condições analisadas..... | 48 |
| Tabela 5 | Resultados de determinação da fração volumétrica dos microconstituintes | 54 |
| Tabela 6 | Resultados de determinação do espaçamento interlamelar da perlita | 55 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ALNG – Alongamento;
ASTM – American Society for Testing and Materials;
Ceq – Carbono Equivalente;
CRup – Carga de Ruptura
IABr – Instituto Aço Brasil;
LE – Limite de Escoamento;
LR – Limite de Resistência;
NBR – Norma Brasileira Registrada;
SAE – Society of Automotive Engineers;
WSA – World Steel Association;
Z – Estricção;
Ø – Diâmetro.

RESUMO

O mercado siderúrgico vive um momento de grande competição e as empresas produtoras necessitam, cada vez mais, atuar internamente sobre seus custos para garantir lucratividade e rentabilidade. A motivação deste trabalho foi a redução de custos de produção de arames de aço para o setor agropecuário, por meio de estudo de viabilidade técnica do emprego de aço ao carbono produzido via aciaria elétrica, em lugar de aço produzido via aciaria a oxigênio – atualmente utilizado em algumas usinas siderúrgicas. As qualidades de aços estudadas são produzidas através de aciaria elétrica, dando origem aos tarugos que são laminados a quente para obtenção do fio-máquina que segue para os processos posteriores de trefilação e galvanização, em que se obtém os arames de aço. As composições químicas propostas neste trabalho devem garantir que as especificações de propriedades mecânicas permaneçam sendo atendidas. Foram realizados levantamento e análise de histórico de dados, análises de composição química, caracterização microestrutural, ensaios de tração e de enrolamento. Fundamentado nos resultados atingidos, mostra-se que a metodologia proposta para avaliação de propriedades mecânicas é válida. O presente estudo aponta também que é viável tecnicamente o emprego de aço ao carbono semelhante ao SAE1045, obtido via aciaria elétrica, na produção de arames de aço galvanizados para o setor agropecuário, mantendo o atendimento a todas as especificações e com possibilidade de redução de custos de produção.

Palavras-chave: Aciaria Elétrica. Redução de custo. Galvanização. Arames.

ABSTRACT

The steel market is experiencing a period of great competition and manufacturing companies need, increasingly, to act internally on their costs to ensure lucrativeness and profitability. The motivation of this work was to reduce the cost of production of steel wires for the agriculture sector, by studying the technical feasibility use of a carbon steel produced by electric arc furnace, replacing the oxygen furnace steel – currently used in some mills. The studied steels are manufactured in an electric arc furnace, giving rise to the billets that are hot rolled to obtain the wire rod to follow the subsequent process of drawing and galvanizing, where the wires of steel are made. The chemical compositions proposed in this paper must guarantee that the mechanical properties described in the technical standards continue be met. Data, chemical composition, microstructure, tensile strength and winding properties were surveyed and analyzed. Based upon the results achieved, it is shown that the proposed method for assessment of the mechanical properties is valid. This study also indicates that it is technically feasible the use of carbon steel similar to SAE1045, obtained by electric arc furnace, to manufacturing galvanized steel wires for the agriculture sector maintaining compliance to all technical standards and with the possibility of reducing costs.

Keywords: Electric Steel Plant. Cost Reduction. Galvanizing. Wires.

1.0 INTRODUÇÃO

O aço é um material que possui um vasto campo de aplicações devido às suas notáveis propriedades, à abundância das matérias-primas necessárias à sua produção e ao seu preço competitivo. Pode ser produzido em uma enorme variedade de características que podem ser bem definidas, de modo a atender usos específicos.

Um dos grandes campos de aplicação do aço é o setor agropecuário, com a produção de implementos agrícolas e máquinas. Nesse setor, há também a expressiva utilização de arames de aço para as mais diversas aplicações, que vão desde o cercamento de propriedades ao auxílio na fruticultura e a produção de mudas e plantas. Os arames utilizados são em sua maioria galvanizados, processo em que o aço recebe a proteção contra a corrosão através de um revestimento de zinco, que também contribui para um melhor aspecto superficial.

Por ser um produto pertencente à classe de *commodities*, o preço do aço é determinado pelo mercado e não pela indústria. Por essa razão, as empresas estão cada vez mais engajadas na busca de menores prazos de produção, menores custos e alta produtividade, para assim, tornarem-se mais rentáveis e competitivas.

A ideia de redução de custos de produção com vistas a uma maior competitividade foi uma das motivações deste trabalho, que tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica do emprego de um aço ao carbono produzido via aciaria elétrica na produção de arames de aço para o setor agropecuário. Esse aço, especificamente, deve atender os requisitos de propriedades mecânicas dos arames que atualmente empregam aço produzido via aciaria a oxigênio – utilizando como matéria-prima minério de ferro extraído da natureza. O aço produzido via aciaria elétrica advém de matéria-prima reciclada, pois utiliza sucata metálica em sua produção, o que contribui para a sustentabilidade ambiental, outro fator motivador do presente estudo.

Será apresentada uma descrição dos processos de produção do aço, via aciaria elétrica e via aciaria a oxigênio, do processo de laminação a quente para a produção de fio-máquina –

produto intermediário na produção de arames – e do processo de trefilação para a produção dos arames. Serão apresentadas as características e especificações dos arames que se objetivam atender. Após serão apresentados os mecanismos de endurecimento existentes para garantir a resistência mecânica dos arames. A seguir é exposta a metodologia empregada e feita uma discussão dos resultados obtidos em função do tipo de aço utilizado na produção dos arames.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MERCADO SIDERÚRGICO

O aço reúne características e propriedades singulares, que não são encontradas em nenhum outro material com custo igual ou similar. Essa é uma das razões que, somada ao extenso emprego desse material, torna a indústria do aço tão preponderante para a economia e sobre a sociedade como um todo.

A produção de aço é um forte indicador do patamar de desenvolvimento econômico de uma nação. Seu consumo cresce proporcionalmente com construções de edifícios, execução de obras de infraestrutura, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos dos mais diversos para atender a sociedade de forma geral.

O aço está presente nos campos e nas cidades, nas pequenas e nas grandes construções. Está presente em hidrelétricas, em torres de transmissão, em pontes e viadutos, nas máquinas e implementos que impulsionam todos os segmentos industriais. Por essa razão, o processo de aperfeiçoamento de produção e seu emprego são contínuos, o que o torna objeto de importantes estudos de universidades e empresas.

2.1.1 Produção Mundial de Aço

A produção mundial de aço bruto no ano de 2015 foi de 1,621 bilhões de toneladas. O país com a maior produção é a China, que representa 49,6% da produção mundial, conforme mostra a Figura 1 (WORLD STEEL ASSOCIATION – WSA 2016). A Figura 2 mostra a distribuição do consumo aparente de aço no mundo em 2015, em que se verifica a predominância da China não só como produtor, mas também como nação que lidera o consumo de aço no mundo.

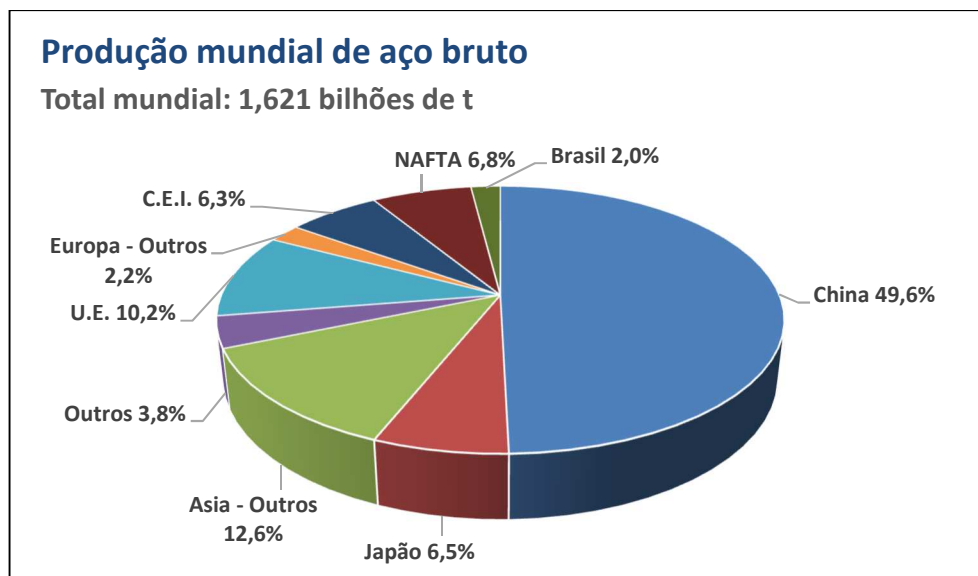


Figura 1 Distribuição da produção mundial de aço bruto em 2015
Fonte: WORLD STEEL ASSOCIATION – WSA 2016

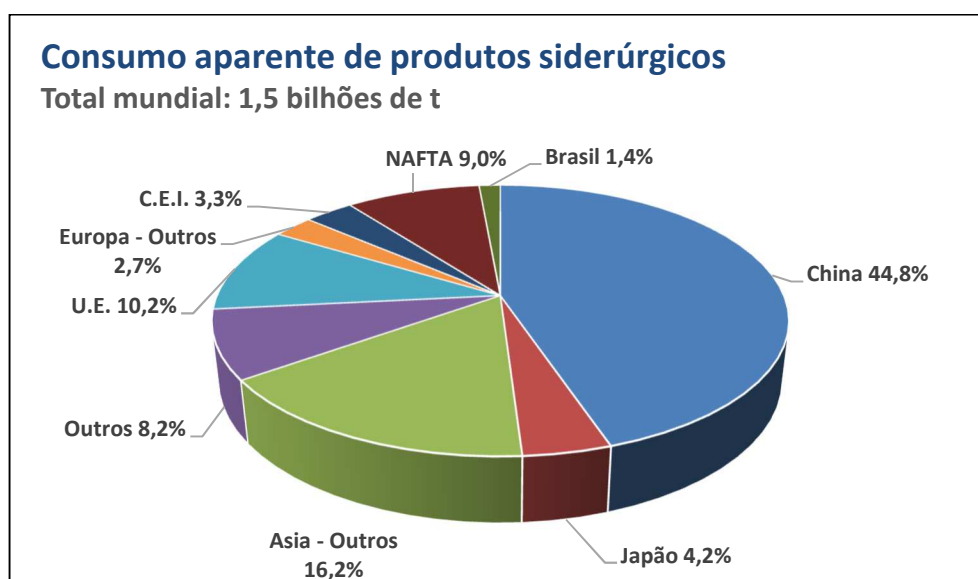


Figura 2 Distribuição mundial do consumo aparente de produtos siderúrgicos em 2015
Fonte: WORLD STEEL ASSOCIATION – WSA 2016

O Brasil vem se mantendo entre os 10 maiores produtores mundiais. Em 2015, assumiu a 8ª posição entre os maiores produtores mundiais de aço e a 1ª posição entre os países da América Latina com uma produção de 33,3 milhões de toneladas – o que representa 2,0% do total mundial. Em comparação aos BRICS – grupo formado por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul, que concentra 61,9% da produção mundial de aço – o Brasil ocupa a 4ª colocação no grupo.

2.1.2 Mercado do Aço no Brasil

Atualmente o parque produtor de aço no Brasil está instalado em 10 estados e conta com 14 usinas integradas e 15 semi-integradas, controladas por onze diferentes grupos empresariais. Na Figura 3, observa-se a distribuição da produção de aço bruto por empresas no ano de 2015.

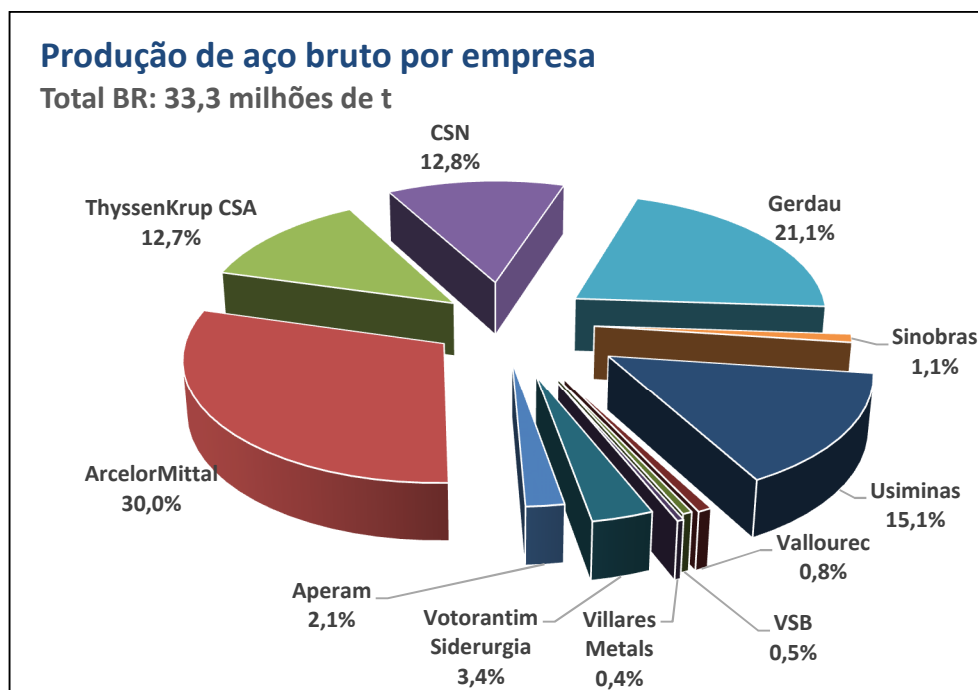


Figura 3 Distribuição da produção de aço bruto por empresas – 2015

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016

As usinas integradas foram responsáveis por 85,5% da produção de aço bruto em 2015, o que corresponde a 28,4 milhões de toneladas. Por sua vez, as usinas semi-integradas tiveram participação de 14,5%, o equivalente a 4,8 milhões de toneladas de aço bruto.

O parque siderúrgico brasileiro, composto por 29 usinas, tem sua maior concentração na região Sudeste, que responde por 96% da produção de aço do país, além de ser a região com as maiores usinas integradas. O setor tem capacidade instalada de 48,9 milhões de toneladas de aço por ano.

O consumo de aço tem grande relação e impacto sobre o PIB e o crescimento econômico dos países, na Figura 4 a seguir pode ser verificada a evolução do consumo aparente de produtos siderúrgicos no Brasil no período de 2008 a 2015. A indústria do aço vem sendo impactada pelo fraco desempenho dos seus principais consumidores, como o setor

automotivo para produtos planos e os setores de construção civil e veículos pesados para produtos longos.

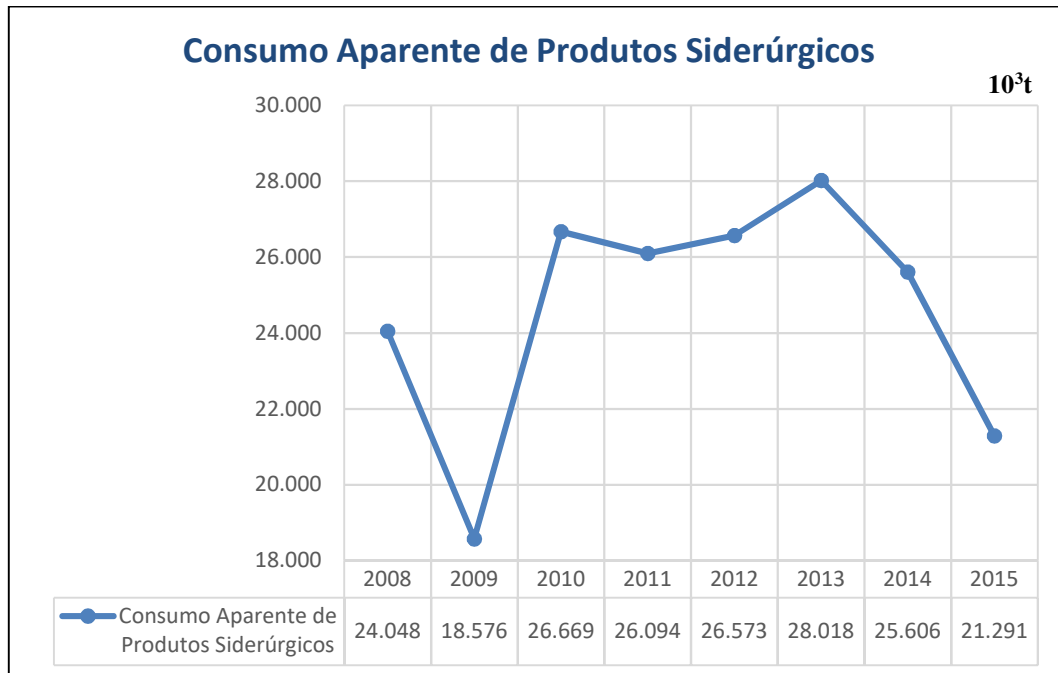


Figura 4 Mercado brasileiro de aço – Evolução do Consumo aparente de produtos siderúrgicos no período 2008/2015

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016

Enquanto em países europeus a média de consumo *per capita* passa de 400 kg por habitante, no Brasil se manteve em torno de 100 kg nos últimos anos. É um indicador que mostra a possibilidade de crescimento do mercado interno de aço para o desenvolvimento econômico do país.

Um dos desafios do setor é a necessidade de aumentar o consumo *per capita* de aço, o qual era em 1980 de 100kg de aço bruto por ano, ou 70% a mais que a China. Atualmente o consumo *per capita* chinês é de 509 kg, enquanto o brasileiro é de 116 kg por habitante, como pode ser observado na Figura 5, depois de ter atingido 155 kg por habitante em 2013.

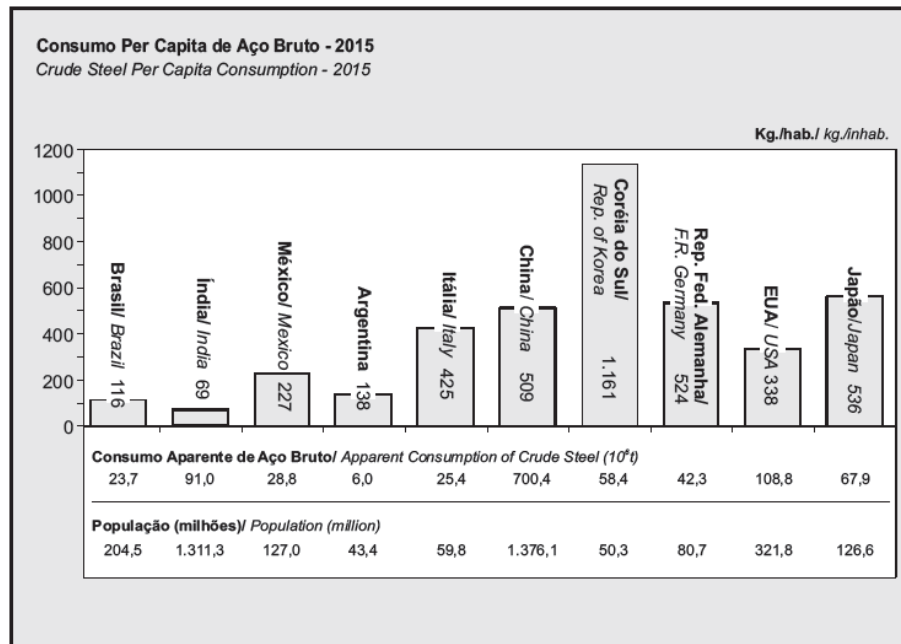


Figura 5 Mercado mundial de aço – Consumo per capita de aço bruto e Consumo aparente de aço bruto no ano de 2015

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016

O total de aço consumido em um país é dado pelo consumo aparente final, em que se tem a medição direta do consumo aparente de produtos siderúrgicos adicionado do saldo do comércio exterior de bens intensivos em aço. A análise do consumo aparente final *per capita*, na Figura 6, demonstra que vem ocorrendo expansão da participação das importações diretas e indiretas de aço no mercado de aço brasileiro (INSTITUTO AÇO BRASIL 2015).

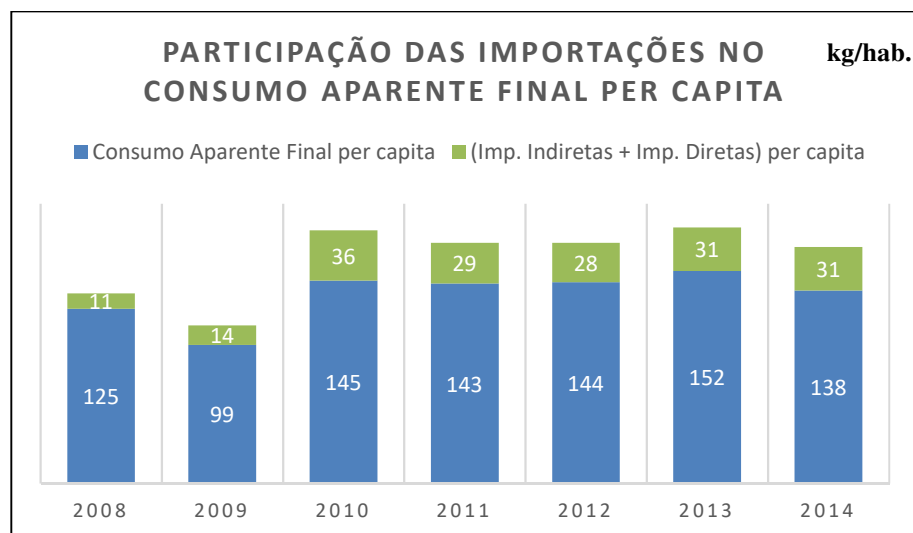


Figura 6 Mercado brasileiro de aço – Evolução da participação das importações no consumo aparente final per capita no período 2008/2014

Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015

Pode-se observar que dos 138 kg de aço consumido por habitante em 2014, 31 kg tiveram origem no exterior – o que representa 21,7% do total. Dessa forma, verifica-se a crescente participação do aço proveniente de outros países no consumo de aço brasileiro.

A partir da Figura 7, que mostra a produção de aço bruto por processo de aciaria, pode-se verificar que no Brasil a participação de aciarias elétricas é inferior à média mundial – que foi de 25,1% em 2015. Esse fato está atrelado ao baixo consumo de aço por habitante do país, responsável pela geração de sucata metálica – matéria-prima para esse tipo de processo produtivo. De acordo com o Instituto Aço Brasil, o consumo de aço apresenta potencial de crescimento muito elevado, em função, além do baixo consumo *per capita*, da grande necessidade de investimentos em infraestrutura no país.

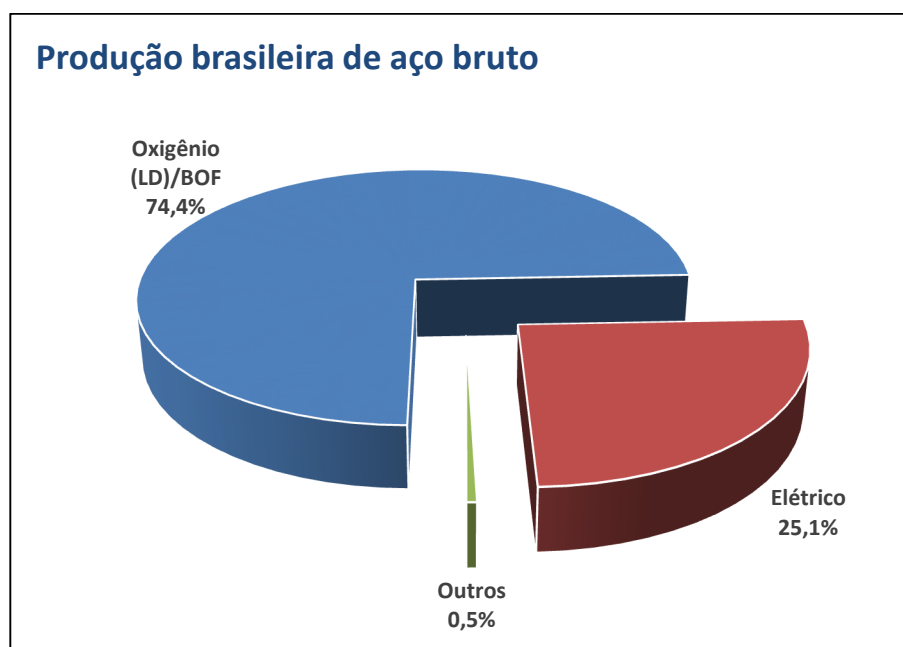


Figura 7 Produção brasileira de aço bruto por processo de aciaria em 2015

Fonte: WORLD STEEL ASSOCIATION – WSA 2016

2.2 PRODUÇÃO DE ARAMES

As aplicações possíveis para arames de aço são as mais diversas, podendo ter emprego na indústria mecânica, da construção civil e na agropecuária. Essa diversidade de usos e aplicações se deve, principalmente, à enorme variedade dimensional e de propriedades mecânicas que se podem obter nos arames.

Os arames destinados ao setor agropecuário são, em sua maior parte, galvanizados e de alta resistência mecânica. Esses arames são utilizados em várias etapas e atividades do setor, desde o cercamento de propriedades e contenção de animais, como no cultivo de fruticulturas que necessitam de sustentação e condução – sendo os parreirais um exemplo claro dessa aplicação, conforme mostra a Figura 8 com desenho esquemático e imagem da aplicação real.

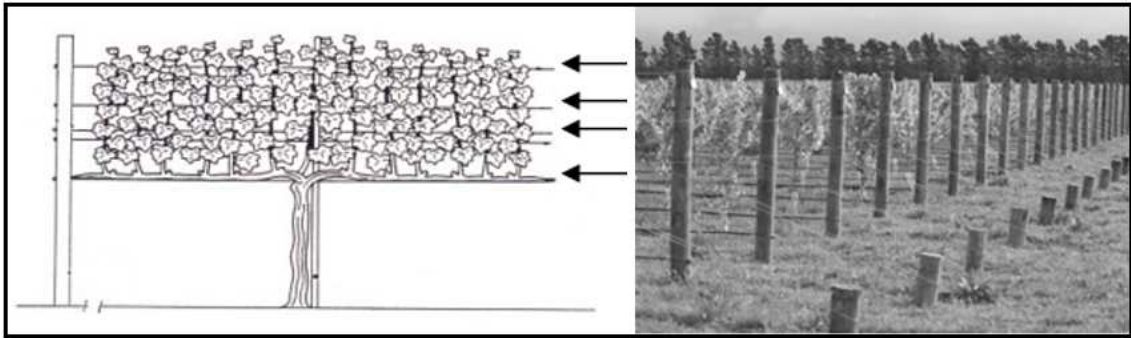


Figura 8 Sistema de condução da videira em espaldeira; indicadas pelas setas as posições dos arames.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA UVA E VINHO, 2014

A fabricação de arames pode se dar em usinas siderúrgicas (desde a produção do aço) ou em unidades que realizam apenas a etapa de conformação mecânica – Trefilação. O processo em uma usina siderúrgica tem início pela obtenção do aço que será laminado em fio-máquina, um produto intermediário, que seguirá para o processo de trefilação, que dará origem aos fios de aço – arames (ARAUJO, 2009). Na Figura 9 é apresentado um fluxo esquemático dos estágios da produção de arames em uma usina siderúrgica.



Figura 9 Fluxo esquemático da rota de produção de arames de aço em uma usina siderúrgica.

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.1 Produção do Aço

A etapa de aciaria é responsável pela obtenção do aço e compreende a fusão das matérias-primas, o refino do aço e sua solidificação. O aço solidificado, na forma de tarugos, segue para o processo de laminação.

As plantas siderúrgicas atuais podem ser separadas em dois grandes grupos: usinas integradas e usinas semi-integradas. A distinção se dá pelas etapas de produção que são compreendidas dentro da usina.

As usinas integradas são aquelas cujo processo de obtenção do aço é constituído pelas etapas de obtenção do ferro a partir de seu minério nos altos-fornos, a conversão do ferro-gusa, produto primário, em aço na aciaria; o lingotamento do aço líquido de forma a solidificar em forma conveniente para as operações seguintes; e, finalmente, a conformação do metal na forma de produto (MOURÃO et al., 2007).

A obtenção do aço se dá pelo refino do gusa, realizado nos conversores a oxigênio. Esse é o processo consagrado nas usinas integradas, que consiste na oxidação controlada do gusa, através de um fluxo de oxigênio lançado diretamente à superfície do banho. Posteriormente o aço segue para as etapas de refino secundário, em que a composição química é acertada, e de lingotamento, em que é solidificado (MCGANNON, 1971).

As usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução do minério de ferro. São representadas no Brasil, em grande parte, pelas Aciarias Elétricas, que utilizam como matéria-prima principal a sucata metálica e fazem parte de um modelo de produção chamado *mini-mills*.

O modelo de *mini-mills* apresenta uma configuração básica, composta por aciaria com fornos elétricos a arco e lingotamento contínuo. O insumo principal é fundamentalmente sucata metálica, que pode ser substituída, eventualmente, em parte por ferro-gusa ou ferro-esponja. São dotadas de um fluxo de produção mais curto que as usinas integradas, pois não realizam atividades de preparo do coque, sinterização e redução do minério. A escala de produção desse modelo é inferior, o que determina o direcionamento ao atendimento de mercados locais (ANDRADE et al., 2000).

Entre os atributos das *mini-mills* podem-se citar: escala mínima de operação reduzida, baixo custo de capital, usinas compactas e regionalizadas e menor agressão ambiental.

A Figura 10 apresenta as rotas de produção em usinas integradas e semi-integradas.

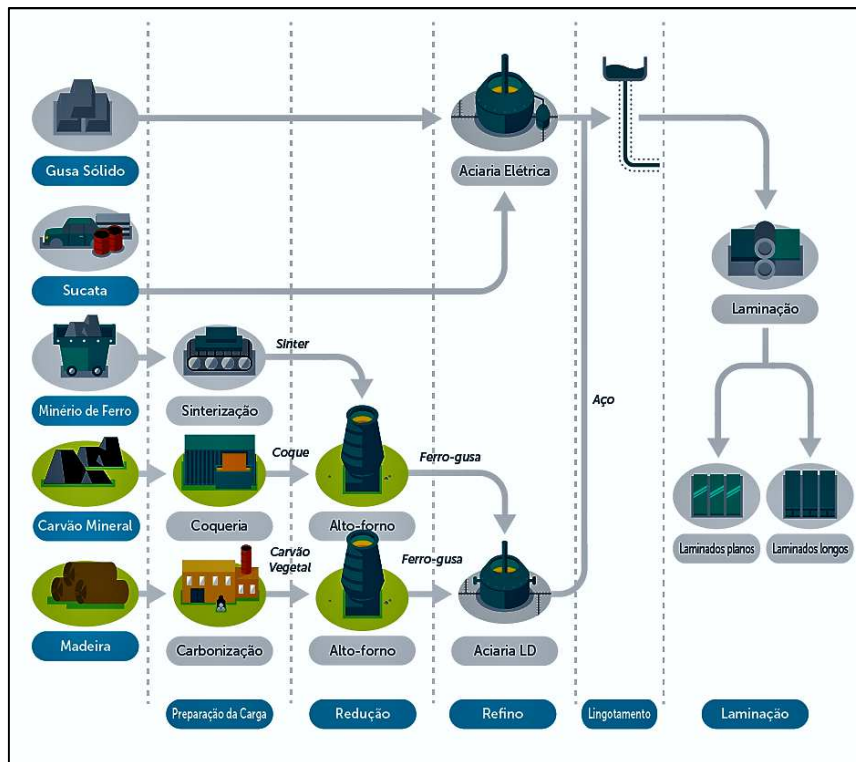


Figura 10 Fluxograma da produção de aço em usinas integradas e semi-integradas (*mini-mills*).

Fonte: Adaptado de INSTITUO AÇO BRASIL, 2015

A rota de produção mais tradicional deste tipo de planta siderúrgica se inicia pela fusão da carga metálica (combinação de sucata de aço e ferro-gusa) em forno elétrico a arco, no qual é totalmente fundida e a composição de alguns elementos químicos é corrigida. O aço então é vazado em uma panela e levado para o forno-panela para o processo de refino e acerto de composição química final. Após o forno-panela o aço está pronto para o processo de lingotamento contínuo (NUNES, 2009).

A Figura 11 mostra um forno elétrico a arco, que é utilizado para a fusão da carga metálica – sucata metálica e ferro-gusa sólido.



Figura 11 Forno elétrico a arco utilizado para a fusão da carga metálica na produção de aço.
Fonte: CORTESIA DE USINA SIDERÚRGICA

A Figura 12 mostra um forno-panela em operação durante a produção de aço. Nesta etapa são feitos os ajustes finais da composição química, além do acerto de temperatura para a etapa seguinte, o lingotamento do aço.



Figura 12 Forno-panela utilizado para o acerto de composição química e de temperatura na produção do aço.
Fonte: CORTESIA DE USINA SIDERÚRGICA

A etapa de solidificação do aço ocorre no equipamento de lingotamento contínuo que se constitui, resumidamente, em uma base para receber uma panela, um distribuidor de aço e de 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 podendo ser controlada individualmente por veio. Os veios são constituídos de moldes de cobre refrigerados com água, nos quais ocorre a solidificação do aço. Um sistema secundário de refrigeração garante a solidificação final e um equipamento de corte é utilizado para cortar os tarugos no comprimento desejado (NUNES, 2009).

A Figura 13 apresenta um distribuidor repassando o aço líquido para a máquina de lingotamento contínuo. A panela está posicionada acima do distribuidor realizando a alimentação do aço para ele.



Figura 13 Panela repassando o aço líquido para o distribuidor, que por sua vez, repassa aos veios da máquina de lingotamento contínuo.

Fonte: CORTESIA DE USINA SIDERÚRGICA

2.2.2 Processo de Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo transformar seções grandes em seções menores, de formatos diversos e, ao mesmo tempo, modificar profundamente a microestrutura do tarugo destruindo, assim, a microestrutura dendrítica do lingotamento e, por outro lado, caldear as bolhas internas (ARAUJO, 2009). Por

consequência, tem-se a melhoria de propriedades dos materiais, tais como ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial.

O processo de laminação tem início no reaquecimento dos tarugos, pois é fundamental garantir uma temperatura específica e homogênea ao longo de toda a peça para cada tipo de aço. Na Figura 14 é apresentado um modelo de forno de reaquecimento de tarugos.



Figura 14 Forno de reaquecimento para laminação de tarugos.
Fonte: CORTESIA DE USINA SIDERÚRGICA

A laminação de produtos longos consiste na conformação mecânica do tarugo, que ocorre pela passagem deste em sequência entre dois cilindros que giram em sentidos opostos com canais usinados, sendo a distância entre os cilindros menor 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 (RIZZO, 2010).

A Figura 15 apresenta um desenho esquemático em que se pode verificar a conformação imposta ao material pelos cilindros de laminação. Verifica-se, no desenho, que a seção do material laminado diminui ao passar pelos cilindros.

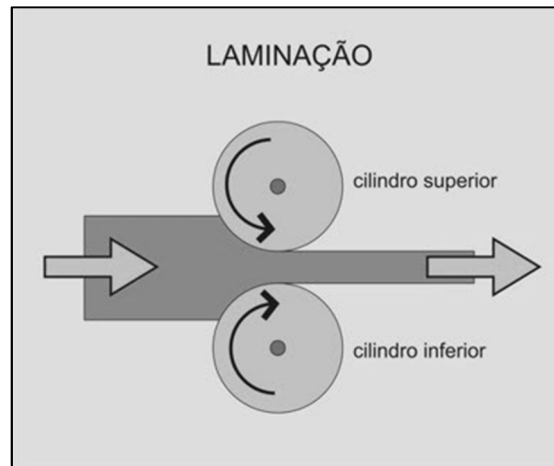


Figura 15 Desenho esquemático da conformação exercida pelos cilindros de laminação.
Fonte: Adaptado de BORGES, [201-?]

O processo de laminação é todo realizado a quente e 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).

O produto final desejado deve ser homogêneo em sua microestrutura, contendo grãos de pequeno tamanho e com dimensões geométricas as mais precisas possíveis. Para se conseguir este produto final com especificações de homogeneidade e tolerância, é necessário um importante controle de todo o processo de fabricação. Devem ser observadas as deformações (que devem ser as maiores possíveis em cada passe de laminação), as temperaturas (que devem ser as menores possíveis) e a composição química da matéria-prima. Para se conseguir estas condições impostas, alguns limites devem ser respeitados, como o atendimento às limitações do equipamento disponível, manutenção e controle da qualidade durante todas as etapas do processo e atendimento a segurança pessoal (RIZZO, 2010).

O fio-máquina é produzido em rolo, usando-se um bloco acabador ou laminador, podendo ser também conhecido como bloco Morgan – devido ao nome de seu fabricante que foi pioneiro neste tipo de equipamento. O bloco laminador consiste de conjuntos de gaiolas compactas de laminação montadas em um único conjunto mecânico; as gaiolas são acionadas por um ou vários motores, de acordo com a potência necessária; esta técnica foi desenvolvida inicialmente para a laminação de fio-máquina, sendo posteriormente estendida para laminadores de barras leves. Na parte final do processo de produção há um formador de espiras, que é exposto na Figura 16, que impõe uma curvatura ao fio-máquina em alta

velocidade, formando espiras que serão coletadas pelo coletor de espiras, obtendo dessa forma, um rolo de fio-máquina laminado a quente.



Figura 16 Equipamento situado ao final do processo de laminação responsável pela formação das espiras.
Fonte: Adaptado de WIREFIRST.COM, 2011

Fio-máquina é o produto intermediário que será empregado como matéria-prima no processo de trefilação para produção dos arames de aço.

2.2.3 Processo de Trefilação

A trefilação é a técnica de produzir fios ou barras pelo contínuo alongamento de um fio ou barra de maior diâmetro, obtido através da redução de área provocada pela passagem forçada do material por uma matriz de dimensão conhecida e controlada, mediante aplicação de esforço de tração na ponta do material que sai da matriz (BUTTON, 2001).

O processo de trefilação tem início com a decapagem (química ou mecânica) do fio-máquina, para a retirada de carepa, na sequência é colocado em uma máquina, onde começará a ser trefilado. Os tipos de máquinas possuem diferentes sequências de reduções, que são chamadas passes de trefilação. Em cada passe, o material sofre redução em área, até que no último passe lhe é conferido o diâmetro final (DOVE, 1979).

A Figura 17 ilustra o processo de trefilação com fieira, que é muito comum para a produção de arames a partir de fio-máquina, produzido por laminação a quente.

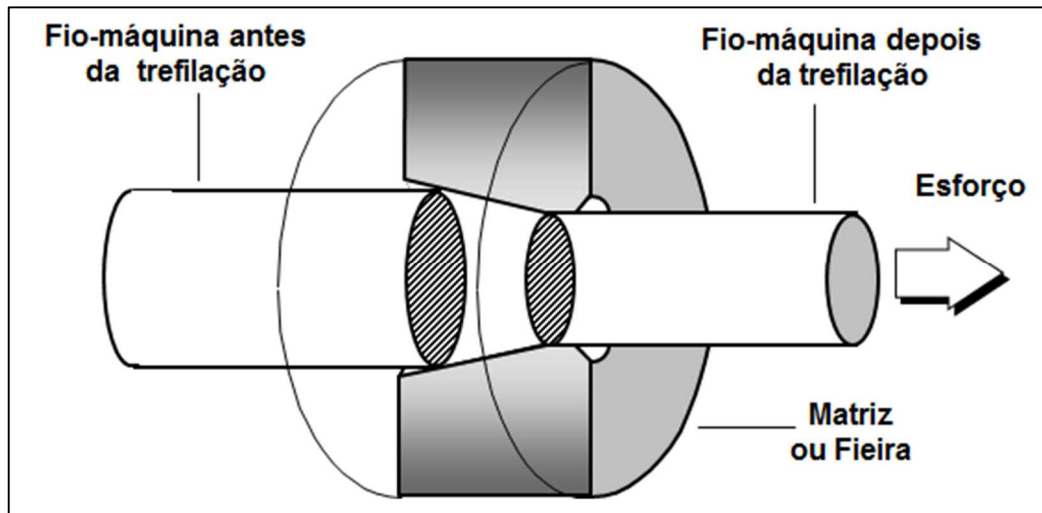


Figura 17 Representação esquemática do processo de trefilação com fieira a partir de fio-máquina.

Fonte: Adaptado de CETLIN, 2002

O processo tradicional de trefilação com fieiras impõe reduções de seção muito grandes, o excesso de atrito segura o material e o traciona, causando estiramento e grande geração de calor. Por essas razões é necessário um sistema de refrigeração em cada fieira, bem como lubrificação do material sendo trefilado, para evitar que o calor gerado pelo atrito entre a fieira e o material cause um aumento excessivo de temperatura – que causa diminuição da vida útil da ferramenta, prejudica a lubrificação e as propriedades finais do produto (EL-DOMINATY & KASSAB, 1998).

2.2.3.1 Tipos de Máquinas de Trefilar

O processo de trefilação de arames exige equipamentos – máquinas – que sejam capazes de tracionar o material, fio-máquina ou arame, através das matrizes (fieiras) em que ocorre a redução de seção transversal. Essas máquinas são classificadas de acordo com seu número de blocos (passes de redução) podendo ser:

- Simples ou monobloco, com apenas um passe de redução;
- Duplas, com dois passes;
- Múltiplas, contam com mais de dois passes.

Além dessa classificação, as máquinas múltiplas, que são as mais utilizadas, também podem ser classificadas em função de sua forma de atuação:

- Máquinas cumulativas;
- Máquinas não cumulativas.

Nas máquinas cumulativas todos os blocos têm rotação fixa durante o processo de trefilação. Já nas máquinas não cumulativas a velocidade de rotação dos blocos é variável, o que contribui para produtividade, pois minimiza o impacto do desgaste das fieiras no processo de trefilação (BUTTON, 2001).

2.2.3.2 Fieiras

Independentemente do produto ou equipamento utilizado todo processo de trefilação utiliza uma matriz chamada fieira. Essa é constituída basicamente por um núcleo e uma carcaça, conforme ilustrado na Figura 18.

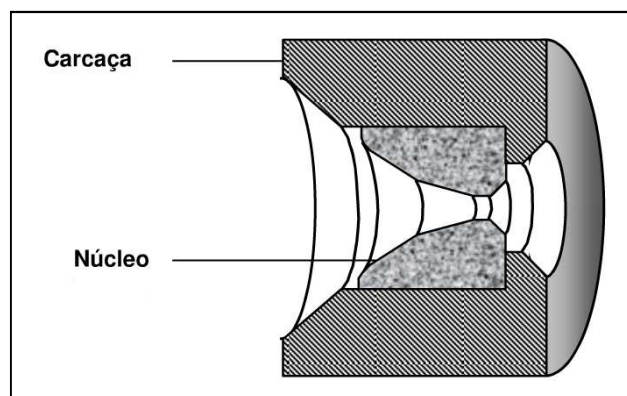


Figura 18 Representação esquemática que mostra seção longitudinal de uma fieira.

Fonte: Adaptado de CETLIN, 2002

O núcleo da fieira é normalmente de metal duro (liga de carbeto de tungstênio e cobalto), que possui elevada resistência ao desgaste. O objetivo principal do núcleo é suportar ao máximo o desgaste provocado pela passagem do arame, evitando, assim, produção de arames fora de especificação dimensional e até mesmo com defeitos superficiais (HILLERY & MCCABE, 1995).

Quando é requerida uma muito alta resistência ao desgaste são utilizados núcleos de diamante. Os mais comuns são de diamante policristalino, fabricados a partir de pequenos grãos de diamante sintético e cobalto (CETLIN, 2002).

A carcaça da fieira é usualmente fabricada em aço carbono e tem a função de suportar a pressão interna sofrida pelo núcleo. Essa pressão ocorre, pois, durante a trefilação o material que está sendo trefilado aplica forças no orifício do núcleo, tentando aumentar seu diâmetro. Por ser muito duro e quebradiço, o núcleo de metal duro pode se quebrar durante o processo.

Por essa razão, a carcaça exerce compressão sobre o núcleo, conforme pode ser observado na Figura 19 (HILLERY & MCCABE, 1995).

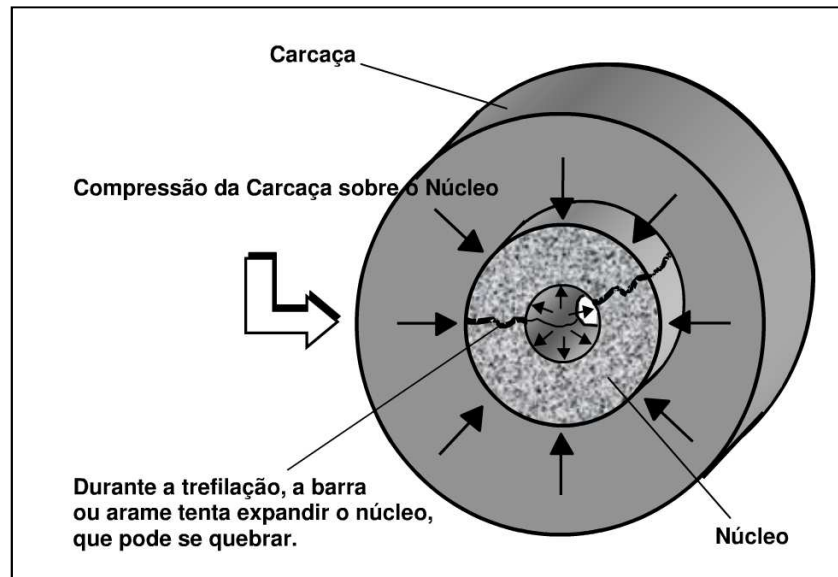


Figura 19 Representação esquemática de uma feira com os esforços envolvidos.
Fonte: Adaptado de CETLIN, 2002

A feira possui ainda cinco regiões distintas, sendo as seguintes: raio de entrada, cone de entrada, cone de trabalho, paralelo e cone de saída. Uma representação visual das regiões pode ser vista na Figura 20.

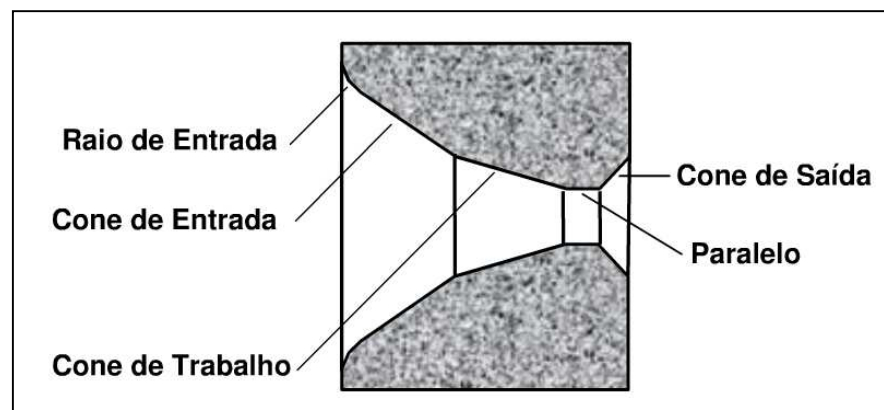


Figura 20 Representação esquemática de uma feira e suas regiões.
Fonte: Adaptado de CETLIN, 2002

O raio de entrada tem a função de dar o acabamento na feira e eliminar cantos vivos que poderiam danificar o fio-máquina, gerando um defeito superficial. O cone de entrada tem a função de auxiliar na entrada do lubrificante na região do cone de trabalho, que, por sua vez,

é onde ocorre a redução de diâmetro do material. Já o paralelo tem a função de reduzir o desgaste da saída da fieira e assim conservar o dimensional de saída do material, sendo protegido pelo cone de saída (ENGHAG, 2003).

2.2.3.3 Lubrificantes de Trefilação

A lubrificação na trefilação é uma necessidade. O processo é praticamente inviável se não houver a correta lubrificação, devido ao grande atrito entre a fieira e o material que pode provocar problemas de qualidade superficial bem como quebra do material. A maneira mais usual de promover a lubrificação durante o processo de trefilação é através da colocação do lubrificante na entrada da fieira, que penetrará por arraste entre a fieira e o material formando uma camada lubrificante entre as superfícies (HILLERY & McCABE, 1995). A Figura 21 apresenta de forma esquemática a formação de uma camada de lubrificante entre o material (aço) e a fieira a fim de minimizar a resistência ao movimento provocada pelo atrito.

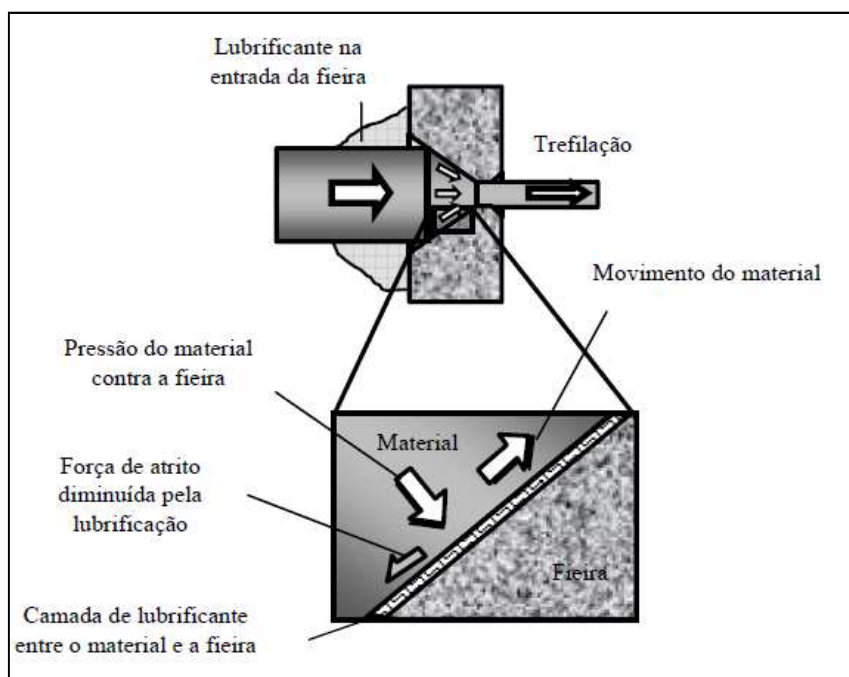


Figura 21 Camada de lubrificante formada entre o arame e a fieira, a partir da passagem do arame e arraste do lubrificante.

Fonte: Adaptado de CETLIN, 2002

Para cumprir essa função são utilizados dois tipos de lubrificantes: líquidos (óleos e misturas de óleos) e sólidos (sabão em pó, que são compostos contendo estearatos/palmitatos de cálcio e/ou sódio, ácidos graxos livres e/ou cloretos/sulfetos). Os lubrificantes sólidos são utilizados em máquinas cumulativas e não cumulativas. Com o aquecimento, durante a

trefilação, o sabão em pó se torna pastoso na região de entrada do material na fieira e na camada entre a fieira e o material (HAGLUND & ENGHAG, 1996).

Na Figura 22 pode se observar a representação esquemática da formação da camada de lubrificante.

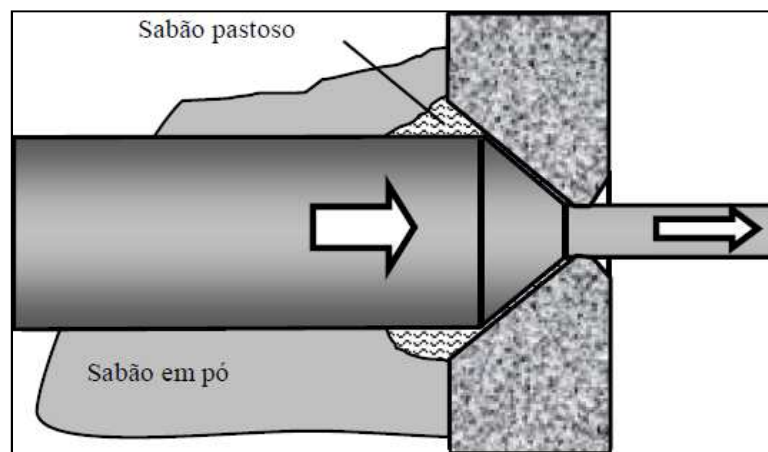


Figura 22 Camada de lubrificante formada entre o arame de aço e a fieira.

Fonte: Adaptado de CETLIN, 2002

A maioria dos lubrificantes sólidos, sabões, utilizados em trefilação são obtidos pela reação de diferentes ácidos graxos com cal ou soda cáustica. Os ácidos graxos são ótimos lubrificantes para a lubrificação limite – região onde a camada de lubrificante é fina. Por essa razão os sabões comumente têm ácidos graxos livres, que não reagiram com soda cáustica ou cal, para agir na lubrificação limite. Um inconveniente relativo aos ácidos graxos é que eles têm baixa viscosidade, que diminui muito com o aumento de temperatura. Acima de 150°C esse tipo de lubrificante não é capaz de fornecer a lubrificação limite. Nessas condições, então, são adicionados aditivos de alta pressão ao sabão. Esses aditivos são compostos de cloro ou enxofre que reagem com o ferro na superfície dos arames, formando cloretos e sulfetos de ferro. Os cloretos suportam temperaturas de até 350°C e os sulfetos, por sua vez, de até 600°C (HAGLUND & ENGHAG, 1996).

2.2.4 Galvanização contínua de arames

O processo de galvanização por imersão a quente, também conhecido como galvanização a fogo, está entre as técnicas mais usadas para proteção do aço contra a corrosão. Consiste na imersão do arame em banho de Zinco fundido, em que são formadas camadas de ligas Fe-Zn e de Zn puro. A proteção oferecida pela galvanização se dá por meio

de dois mecanismos: por barreira física e por proteção galvânica. Na primeira o Zn evita o contato do substrato metálico de interesse (aço) com a atmosfera e o meio corrosivo. Por sua vez, a proteção galvânica se dá pelo fato do Zn ser menos nobre que o Fe e, por essa razão, corroer-se preferencialmente a ele (MARDER, 2000).

A galvanização de arames é chamada de contínua por consistir em uma sequência de banhos dispostos em linha, onde o arame é tracionado por uma de suas extremidades promovendo sua passagem através dos referidos banhos, conforme mostra a Figura 23.

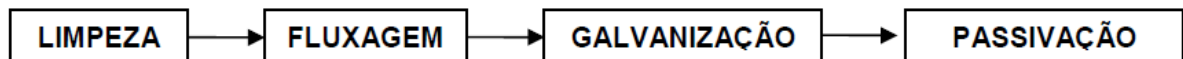


Figura 23 Etapas básicas do processo de galvanização por imersão a quente
Fonte: Adaptado de CAMPANHER, 2009

A etapa de galvanização se dá pela imersão do material em uma cuba de Zn fundido a temperaturas entre 445°C e 460°C, onde o Fe reage com o Zn fundido, formando as camadas intermetálicas que compõem o revestimento. Cada uma dessas camadas de liga Fe-Zn, em função da interdifusão, é uma fase distinta. Tem-se, portanto, um gradiente de composições ao longo da seção transversal com ligas mais ricas em Fe quanto mais próximas do substrato de aço e mais ricas em Zn quanto mais externas. A Figura 24 mostra através de microscopia eletrônica o perfil de um revestimento com três camadas intermetálicas (gama, delta e zeta) e uma camada de Zn metálico puro (eta) (PANNONI, 2015).

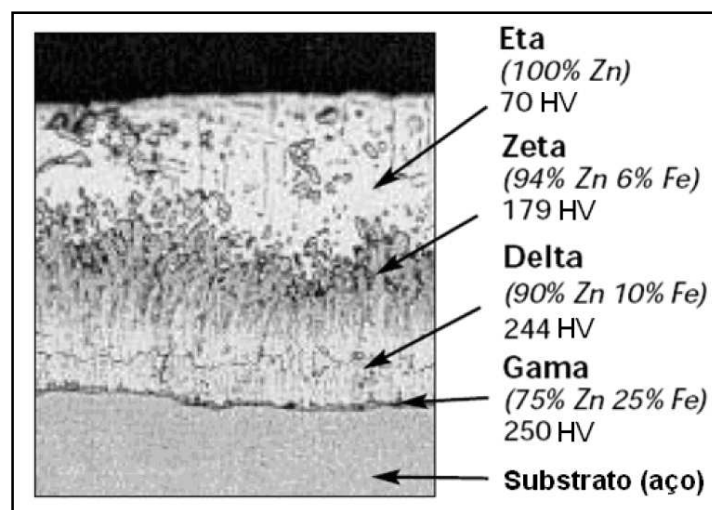


Figura 24 Perfil transversal de peça galvanizada por imersão a quente
Fonte: Adaptado de CAMPANHER, 2009

A temperatura de galvanização (do banho de Zn fundido) e o tempo de imersão são fatores preponderantes para a morfologia das camadas intermetálicas e a própria espessura do revestimento, embora influenciem de maneiras distintas. Quanto maior a temperatura do banho, mais fluído ele é. Com isso, tem-se uma menor espessura de revestimento. Em relação ao tempo de imersão temos uma relação direta com a espessura, pois, as reações terão mais tempo para ocorrer, até determinado limite quando é atingida uma estabilidade do revestimento (ZEMPULSKI & ZEMPULSKI, 2007).

Para arames galvanizados uma das normas existentes é ABNT NBR 6331:2010 que especifica a massa mínima da camada de zinco, entre outras características como aderência do revestimento e quesitos dimensionais e de resistência. Na Tabela 1, pode-se observar que há intervalos dimensionais e os respectivos valores mínimos de camada para as condições de camada leve e pesada.

Tabela 1 Massa mínima da camada de zinco para arames galvanizados

| Diâmetro nominal dos arames galvanizados [mm] | Camada de Zinco [g.m⁻²] | |
|--|---|---------------|
| | Leve | Pesada |
| 0,18 a 0,24 | 15 | - |
| 0,25 a 0,32 | 15 | 45 |
| 0,33 a 0,50 | 20 | 70 |
| 0,51 a 0,80 | 20 | 110 |
| 0,81 a 1,00 | 30 | 150 |
| 1,01 a 1,80 | 35 | 150 |
| 1,81 a 2,50 | 40 | 190 |
| 2,51 a 3,55 | 50 | 200 |
| 3,56 a 5,00 | 55 | 260 |
| 5,01 a 10,00 | 65 | 290 |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6331:2010

Com relação ao tipo de camada, leve ou pesada, opta-se por utilizar maiores gramaturas em arames que serão utilizados em ambientes mais agressivos ou em aplicações que requeiram uma vida útil mais longa do revestimento.

Na Figura 25 é mostrado um exemplo de relação entre a espessura da camada de galvanização e o tempo de vida útil do revestimento, que pode ser alterado significativamente em função da agressividade do meio em que será aplicado.

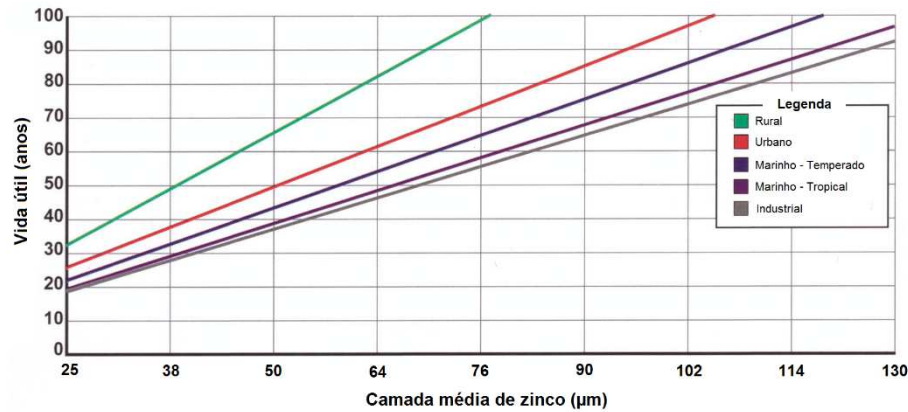


Figura 25 Tempo de vida útil esperado do revestimento de acordo com sua espessura e o ambiente em que se encontra inserido.

Fonte: Adaptado de AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION, 2011

A vida útil do revestimento é definida como o tempo de corrosão de 5% da superfície do aço, quando é necessária manutenção de reparo da peça e/ou equipamento.

2.3 ESPECIFICAÇÕES DO AÇO

Os arames de aço produzidos ou comercializados no Brasil devem atender às características especificadas pelas normas técnicas brasileiras. Dentre as normas existentes para arames galvanizados, pode-se citar a ABNT NBR 6331:2010 como a norma geral para esses produtos, versando sobre a massa da camada de zinco e sua aderência, a resistência à tração e as especificações dimensionais. Além dessa, existem outras normas específicas para determinados produtos e normas que prescrevem métodos de ensaios para avaliação de características, como ductilidade e aderência do revestimento na ABNT NBR 6005:2011. O atendimento às especificações é uma garantia para o consumidor que não tendo total conhecimento para diferenciar um produto de baixa qualidade e um que atenda às suas necessidades no momento da compra. Essas avaliações somente são possíveis em laboratórios especializados e normalmente via ensaios destrutivos.

2.4 MECANISMOS PARA GANHO DE RESISTÊNCIA

De acordo com as aplicações a que são destinados os aços e as exigências quanto às suas propriedades mecânicas, torna-se necessário o emprego de técnicas que possibilitem o aumento dessas propriedades. As diferentes técnicas viabilizam ganhos significativos de

resistência mecânica. Os mecanismos mais explorados, tanto pela viabilidade técnica quanto econômica, são: solução sólida, endurecimento por deformação plástica a frio (encruamento), refino de grão, tratamento térmico e endurecimento por partículas de segunda fase (precipitação).

2.4.1 Endurecimento por Solução Sólida

O mecanismo de endurecimento por solução sólida proporciona o aumento da resistência mecânica dos materiais pela adição de elementos de liga. Os átomos desses elementos de liga, o soluto, causam distorções da rede cristalina do solvente. Essa interação do campo de deformação da rede cristalina entre as discordâncias e os átomos de soluto, acaba restringindo o movimento das discordâncias (CALLISTER, 2008).

Caso os átomos de soluto e solvente sejam aproximadamente similares em tamanho – até 15% de diferença no raio atômico – os átomos de soluto ocupam parte da rede cristalina do átomo solvente, constituindo, então, uma solução sólida substitucional. Por outro lado, se os átomos de soluto são muito menores que os átomos de solvente, eles ocupam posições intersticiais na rede cristalina do solvente (DIETER, 1981).

Nesses dois casos de solução sólida, o soluto causa deformação na rede cristalina, dificultando a movimentação de discordâncias naquela região. O aumento da concentração de átomos de soluto provoca aumento da resistência e dureza de ligas quando comparadas com metais de alta pureza, que são quase sempre mais macios e mais fracos (PICKERING, 1978).

O resultado do aumento da concentração de elementos de liga é o aumento da resistência do material, como mostra a Figura 26. Quanto maior for a concentração de elementos de liga, maior será o aumento dos limites de escoamento e resistência.

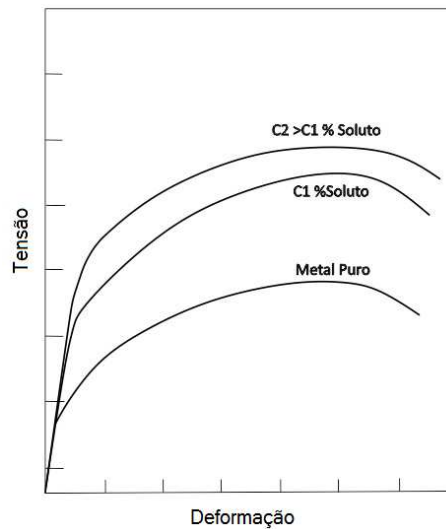


Figura 26 Efeito de adições de elementos de liga em curvas tensão-deformação
 Fonte: DIETER, 1981

O mecanismo de endurecimento por solução sólida, normalmente, é utilizado na produção de arames de aço que posteriormente sofrerão tratamentos térmicos de recozimento e, contudo, necessitam conservar determinados níveis de resistência mecânica. Altos teores de carbono, manganês e alguns outros elementos de liga são empregados para garantir o atendimento às especificações de propriedades mecânicas.

2.4.2 Endurecimento por Deformação Plástica a Frio

O endurecimento por deformação plástica a frio (também chamado de encruamento) é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando é submetido a uma deformação plástica. Pelo fato da deformação é ser realizada abaixo da temperatura de recristalização, diz-se que é um trabalho a frio.

O encruamento é explicado com base em interações entre os campos de deformação das discordâncias. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou o trabalho a frio, devido à multiplicação das discordâncias ou à formação de novas. Como consequência, tem-se que a distância média de separação entre as discordâncias diminui – elas ficam posicionadas mais próximas umas das outras. Na média, as interações discordâncias-deformações de discordâncias são repulsivas. O resultado global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença das demais. Na medida em que se eleva a densidade de discordâncias, a resistência ao movimento se torna, cada vez mais, pronunciada.

Assim, a tensão imposta, necessária para deformar um metal, aumenta com o aumento do trabalho a frio (GLADMAN, 1997).

As relações entre o percentual de trabalho a frio imposto a um material e o seu impacto nas propriedades mecânicas é demonstrada na Figura 27, em que se observa a variação típica de resistência e de ductilidade com o aumento da quantidade de trabalho a frio (DIETER, 1981).

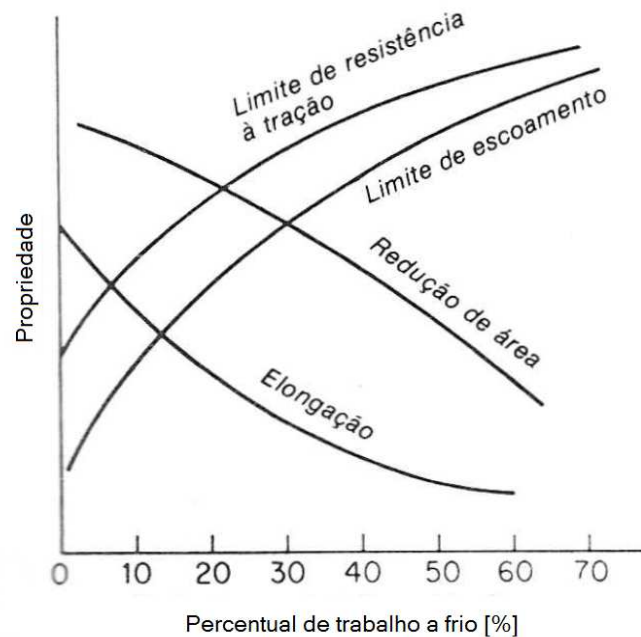


Figura 27 Variação das propriedades mecânicas com a quantidade de trabalho a frio.

Fonte: DIETER, 1981

O trabalho a frio, além de alterar as características mecânicas do material, também produz alterações microestruturais. A morfologia dos grãos é a alteração mais significativa, com grãos deformados e alongados na direção da deformação plástica.

O endurecimento por deformação plástica a frio é amplamente empregado na produção de arames de aço, pois é o mecanismo inerente ao processo de trefilação, em que ocorre a deformação plástica do material – havendo a redução da seção transversal e, simultâneo e consequente, aumento do comprimento (CETLIN, 2002). Os arames de aço são produzidos por processos de conformação mecânica a frio que partem do fio-máquina e que utilizam feiras ou microcassetes como matrizes.

2.4.3 Endurecimento por Refino de Grão

O tamanho dos grãos, ou seu diâmetro médio, em um metal policristalino influencia as suas propriedades mecânicas. Os grãos adjacentes, normalmente, possuem orientações cristalográficas diferentes e, conseqüentemente, 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 uma barreira ao movimento das discordâncias por duas razões (HONEYCOMBE & BHADESHIA, 2006):

- 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 na orientação cristalográfica aumenta.
- O desordenamento atômico 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.

A Figura 28 ilustra como sucede o movimento das discordâncias à medida que elas encontram um contorno de grão e como ele se torna uma barreira à continuação do seu movimento de escorregamento.

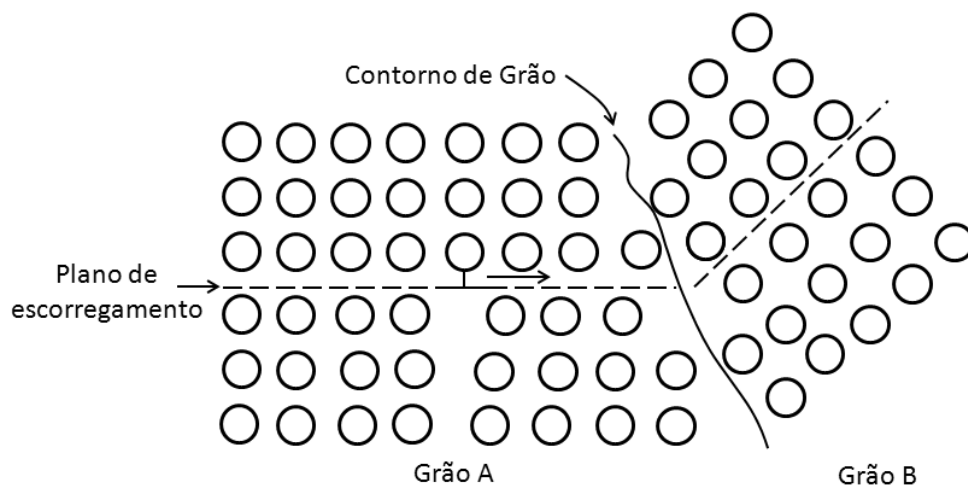


Figura 28 Ilustração do movimento de uma discordância frente a um contorno de grão
Fonte: CALLISTER, 2008

Materiais com granulação fina são mais duros e mais resistentes do que materiais que possuem uma granulação grosseira pelo fato de sua área total de contornos de grãos, para dificultar o movimento das discordâncias, ser maior. Também se deve mencionar que a redução no tamanho de grão além de aumentar a resistência, também aumenta a tenacidade de muitas ligas (PICKERING, 1978).

O limite de escoamento (LE), de muitos materiais, varia de acordo com o tamanho de grão conforme a Equação 1:

$$LE = \sigma_0 + k_e d^{-1/2} \quad (1)$$

Nessa expressão, intitulada “Equação de *Hall-Petch*”, d representa o diâmetro médio do grão, enquanto k_e e σ_0 são constantes para cada material específico. O tamanho de grão pode ser regulado mediante o ajuste da taxa de solidificação a partir da fase líquida e também por deformação plástica seguida por um tratamento térmico apropriado (GLADMAN, 1997).

O endurecimento por refino de grão pode estar presente na produção de arames que empregam aços microligados a elementos refinadores de grão, como nióbio e vanádio, para dessa forma evitar tamanhos de grão grosseiros e possibilitar o atendimento das propriedades mecânicas especificadas.

2.4.4 Endurecimento por Tratamento Térmico

Os tratamentos térmicos de transformação martensítica (têmpera), geralmente, envolvem o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra que foi austenitizada em algum tipo de meio de resfriamento rápido, como a água, o óleo ou o ar.

As propriedades ótimas de um aço que sofreu um processo de têmpera e depois foi revenido podem ser obtidas somente se durante o tratamento térmico por têmpera a amostra tiver sido transformada a ponto de conter um elevado teor de martensita. Durante o tratamento de têmpera, é impossível resfriar o material a uma taxa uniforme ao longo de toda a sua extensão. A superfície do material sempre irá resfriar mais rapidamente do que seu núcleo. Logo, a austenita irá se transformar ao longo de uma faixa de temperaturas, propiciando possíveis variações nas microestruturas e propriedades em função da posição de uma amostra (BAIN, 1939).

O êxito do tratamento térmico de aços, para produzir uma estrutura predominantemente martensítica ao longo de toda a seção do material, depende especialmente de três fatores (CALLISTER, 2008):

- Composição química;
- Tipo e natureza do meio de resfriamento;
- Tamanho e geometria da amostra.

A Figura 29 mostra a variação de dureza de um material, em função da distância a partir da sua superfície, após sofrer um tratamento térmico de têmpera. A extremidade do material temperado experimenta um resfriamento mais rápido e, conseqüentemente, resulta na maior dureza. Nessa região, normalmente, consegue-se obter microestrutura totalmente martensítica. O distanciamento da extremidade resulta em menores níveis de dureza, por conta das menores taxas de resfriamento, que também possibilitam maiores tempos para a difusão do carbono e a formação de outras microestruturas – como misturas de martensita, bainita, perlita e ferrita.

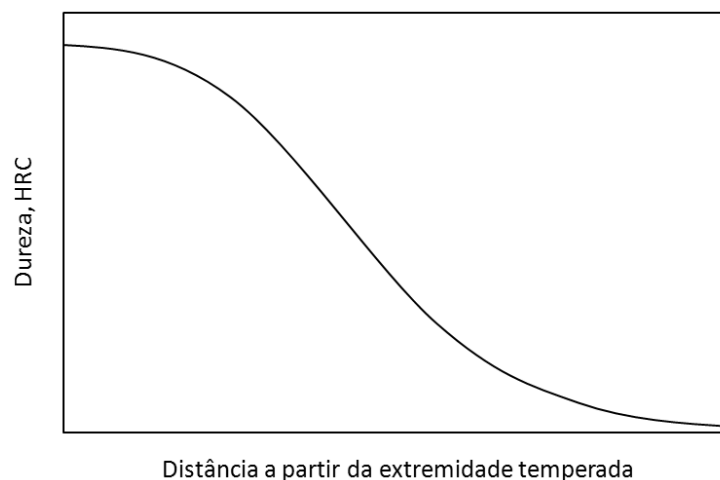


Figura 29 Perfil de variação da dureza do material em função da distância até a extremidade temperada
Fonte: CALLISTER, 2008

O tratamento térmico de transformação martensítica não é usual na produção de arames de aço. Possui maior aplicabilidade na produção de vergalhões (barras de aço para concreto armado) e peças de segmentos como automotivo e de implementos agrícolas. Na

grande maioria dos casos é sucedido pelo tratamento de revenido, com vistas à recuperação de tenacidade e ajuste de resistência.

2.4.5 Endurecimento por 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 fase original. Isso deve ser alcançado através de tratamentos térmicos que promovam transformações de fases. Esse processo é conhecido por endurecimento por precipitação, pois as pequenas partículas da nova fase são chamadas “precipitados” (GLADMAN, 1997).

A precipitação ocorre quando de um tratamento térmico de uma liga em que a segunda fase está em solução sólida em elevadas temperaturas, mas que precipita ao ser resfriada ou envelhecida em baixas temperaturas (DIETER, 1981).

Os precipitados atuam como barreiras, restringindo o movimento de discordâncias e assim, aumentando resistência mecânica dos materiais. Quanto mais finas e dispersas, maior será o efeito. No caso dos aços, elementos formadores de segunda fase ligados ao carbono, nitrogênio e oxigênio são geralmente empregados. Dentre os elementos utilizados estão o boro, o vanádio, o titânio e o nióbio (NUNES, 2009).

O endurecimento por precipitação também pode ser utilizado na produção de arames, normalmente, quando do uso de aços microligados a elementos que são fortes formadores de carbonetos e nitretos, por exemplo, que contribuem para o ganho de resistência por atuarem como barreiras aos movimentos de discordâncias.

2.5 ENVELHECIMENTO EM AÇOS

O envelhecimento é definido como um conjunto de alterações que ocorrem nas propriedades mecânicas de um metal durante ou após a deformação plástica. O envelhecimento que ocorre posteriormente à deformação é chamado de estático, já o que ocorre durante a deformação é chamado, por sua vez, de dinâmico (LESLIE, 1981).

O fenômeno de envelhecimento se baseia, essencialmente, no alívio das tensões elásticas gerado pela presença de átomos de soluto no campo das discordâncias. Em condições cinéticas propícias, os átomos de soluto sob esse gradiente de potencial elástico se movem, por difusão, para as discordâncias formando as “atmosferas de Cottrell”. O decréscimo de energia resultante da associação discordância e soluto torna mais dificultoso a movimento de discordâncias pelo aumento da tensão necessária, que se traduz em um aumento de resistência do material.

A velocidade de movimentação dos átomos de soluto na rede cristalina em direção às discordâncias é controlada pelo coeficiente de difusão deste. Por ser esse um fenômeno termicamente ativado, em altas temperaturas as velocidades de difusão são elevadas e os átomos de soluto migram rapidamente para o entorno das discordâncias. Pode ocorrer a precipitação de uma segunda fase na vizinhança da discordância, caso os átomos de soluto se atraiam reciprocamente. Caso não haja a precipitação, haverá o desenvolvimento de um estado de equilíbrio entre o número de átomos que se aproximam de uma discordância e os átomos que migram para outras discordâncias. O excesso de átomos de soluto agregados a uma discordância é o que forma sua atmosfera (HÄMMERLE *et al.*, 2004).

Em um ensaio de tração comum as discordâncias começam a se desprender dos átomos de soluto em uma determinada região, formando um aspecto superficial característico conhecido como bandas de Lüders ou estrias de deformação.

Os elementos C e N possuem raio atômico suficientemente menor em comparação ao ferro, o que lhes confere a condição de elementos intersticiais na rede cristalina do aço. Para elementos com raio atômico semelhante ao do ferro o efeito será substitucional. A formação das atmosferas de Cottrell, que bloqueiam as discordâncias, pela difusão dos átomos de C e N, é apontada como causadora do envelhecimento estático a baixas temperaturas (BUONO *et al.*, 1997).

Em relação à difusividade, tanto C quanto N apresentam coeficientes muito próximos no ferro e distorcem da mesma maneira o seu reticulado, o que poderia indicar o mesmo efeito no envelhecimento. Entretanto, em temperatura ambiente o C tem solubilidade na ferrita muito inferior ao N, cerca de cem vezes menor (MOHAN; MARSCHALL, 1998).

Na laminação de fio-máquina, busca-se o controle do envelhecimento, que ocorre devido ao aquecimento resultante do atrito entre o metal e a matriz (fieira), pois o aumento de

resistência e a queda de ductilidade podem causar a formação de trincas no material e o desgaste prematuro da ferramenta; além, é claro, de poder comprometer o atendimento às especificações de resistência mecânica do material desejado (OLIVEIRA, 2003).

2.6 ELEMENTOS RESIDUAIS

A composição química dos aços é fundamental para a obtenção das propriedades desejadas e existem certos elementos químicos que podem diferir em razão da rota de produção adotada. Existem, essencialmente, duas vias de produção: integrada e semi-integrada. Além das etapas compreendidas em cada ciclo produtivo, também há distinção na matéria-prima empregada para obtenção do aço.

O minério de ferro é encontrado na natureza na forma de rochas e minerais, dos quais o ferro metálico pode ser extraído economicamente. São formados por óxidos de ferro e, usualmente, encontrados na forma de magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n(\text{H}_2\text{O})$) ou siderita (FeCO_3). Para obtenção do ferro metálico é necessário o uso de um agente redutor (carburante) para promover a separação do oxigênio. O ferro-gusa é o produto primário de fusão do minério de ferro e conta com um teor muito alto de carbono, tipicamente 3,5%-4,5%, juntamente com silício e outros elementos constituintes de impurezas, o que o torna muito quebradiço e não diretamente útil como material aplicável (CIRIZA, 2013).

A sucata é o emprego principal dos fornos elétricos a arco e tem origem industrial ou de obsolescência. A sucata industrial é gerada através das perdas nas matérias-primas durante a produção de bens de consumo metálicos, como na indústria automotiva em seus processos de estampagem. Já a sucata de obsolescência advém de bens de consumo metálicos descartados pela sociedade em geral (CIRIZA, 2013).

A distinção na matéria-prima empregada e nas suas proporções são as grandes razões para a presença, mesmo após a etapa de refino, de certos elementos químicos, em muito baixos teores. Esses elementos, como Cu, Cr e Ni, são chamados de residuais por não serem adicionados intencionalmente à composição do aço, tendo, contudo, os mesmos efeitos como se fossem elementos de liga adicionados propositadamente.

Em aços de aciarias elétricas há a presença em maiores teores desses elementos químicos em função da sucata metálica ser a matéria-prima principal de seus fornos elétricos – em comparação com aços provenientes de convertedores a oxigênio, em que a sucata é utilizada em bem menor proporção como refrigerante. Além disso, os teores dos elementos residuais oscilam consideravelmente em razão da matéria-prima, como, por exemplo, o tipo de sucata metálica empregada e o seu nível de pureza, relacionado com sua procedência – sucata advinda de processo industrial, como cavaco de usinagem ou produto não conforme ou de obsolescência.

A presença do cobre no aço resulta em elevação da resistência mecânica da ferrita sem prejuízo da ductilidade de aços recozidos, normalizados ou de baixo carbono endurecidos por precipitação, principalmente em produtos trabalhados mecanicamente (SOUZA, 1989). O cobre contribui também com a fragilidade a quente, em razão da formação de uma fase líquida na região de contorno de grão austenítico, gerando fissuras durante a laminação a quente, o que pode acarretar não conformidades superficiais que comprometam os processos posteriores de conformação, como a trefilação (LEROY *et al.*, 1995).

O cromo é um elemento que quando presente no aço forma carbonetos estáveis e muito duros. Apresenta maior tendência à formação de carbonetos que o Manganês, por exemplo. Com porcentagem baixa de carbono, os aços contendo cromo são dúcteis, porém, com o aumento do teor de carbono, eles se tornam muito duros devido à presença de excesso de carboneto de cromo. Por outro lado, a influência do cromo no aumento de resistência da ferrita é pequena. Sua presença contribui para o aumento da temperatura de recristalização da ferrita trabalhada a frio. Com médios e altos teores de carbono, o cromo aumenta o tempo necessário para a transformação isotérmica da austenita em perlita no intervalo de temperaturas acima de 540°C e em bainita em temperaturas mais baixas. O aumento da resistência mecânica é característico da presença do cromo como residual, o que afeta o trabalho de conformação a frio e sua trefilabilidade (LEROY *et al.*, 1995; SOUZA, 1989).

O níquel, por sua vez, não tem tendência a formar carbonetos, permanecendo em solução sólida no aço. Ele aumenta a resistência mecânica e a dureza da ferrita, sem diminuir sua ductilidade e tenacidade, até um teor de 5%. Em aços de baixo carbono, evita que se forme cementita nos contornos de grão de aços normalizados, contribuindo para o aumento da ductilidade. O níquel se combina com o cobre a fim de formar uma liga de alto ponto de fusão, que se mantém sólida durante o aquecimento do aço para trabalho a quente, evitando a

fusão do cobre nessas temperaturas e, conseqüentemente, o surgimento de trincas pela fragilidade (RUDDLE, 2002; SOUZA, 1989).

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todas as etapas do procedimento experimental, envolvendo a produção do aço, laminação do fio-máquina, trefilação do arame, coleta das amostras e realização dos ensaios foram feitas em uma usina siderúrgica semi-integrada – que conta com uma aciaria elétrica.

Os estudos de viabilidade técnica do emprego de um aço produzido via aciaria elétrica na produção de arames de aço para o setor agropecuário foram motivados pela ideia de redução de custos internos de uma empresa siderúrgica e pelo impacto ambiental positivo que essa alternativa traz, em função de não utilizar matéria-prima extraída da natureza, como é o caso do minério de ferro que abastece uma usina integrada.

Os materiais testados foram laminados e geraram rolos de fio-máquina, que posteriormente foram submetidos aos processos de trefilação e galvanização, dando origem aos arames galvanizados.

As análises das amostras coletadas foram realizadas em laboratório, passando por análises de composição química e microestrutural, além de ensaios mecânicos de tração e enrolamento.

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

3.1 LEVANTAMENTO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Foi realizado o levantamento das propriedades mecânicas para o arame galvanizado, bitola 2,10mm, com a finalidade de qualificar o arame produzido a partir de aço de aciaria a oxigênio, denominado AOX, e a partir disso poder comparar com a proposta de um aço advindo de aciaria elétrica, denominado AEL. Também foi feito o levantamento das propriedades mecânicas do fio-máquina.

O levantamento das propriedades mecânicas foi baseado no histórico de resultados de ensaios dos lotes produzidos ao longo do ano de 2015. Nas Figuras 30 e 31, pode-se verificar a distribuição de resultados de limite de resistência (LR) e estrição para o FM AOX, respectivamente:

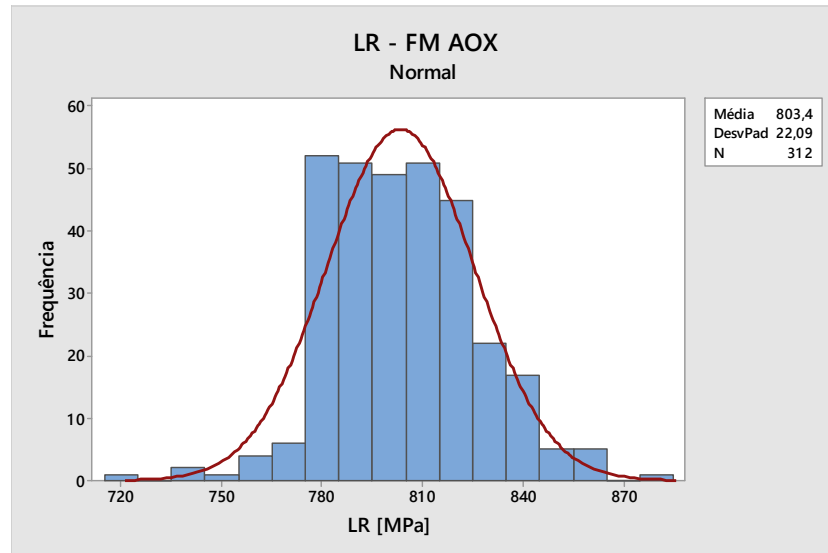


Figura 30 Limite de resistência do fio-máquina produzido a partir do aço AOX no ano de 2015

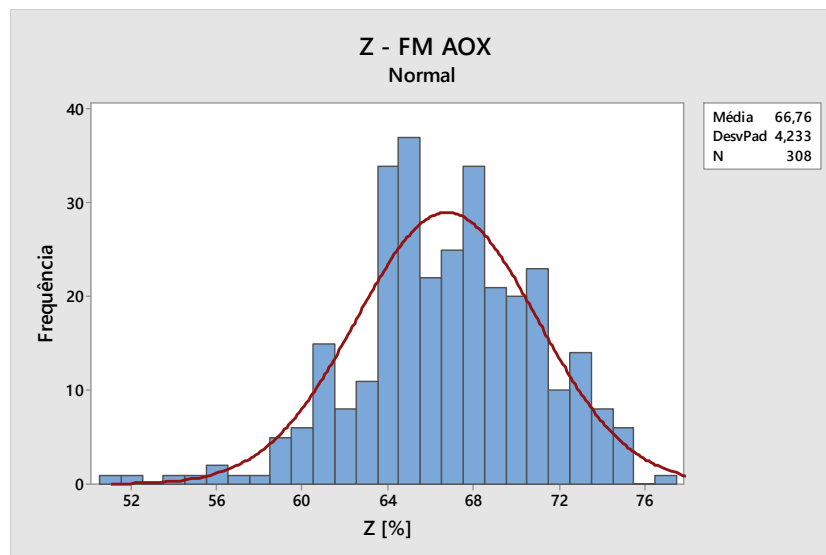


Figura 31 Estrição do fio-máquina produzido a partir do aço AOX no ano de 2015

Em relação aos arames, o levantamento dos resultados foi feito de forma análoga ao fio-máquina, tendo por base os ensaios realizados para os lotes produzidos ao longo do ano de

2015. Na Figura 32 é apresentada a distribuição dos resultados de LR, com média de 136,9 kgf/mm².

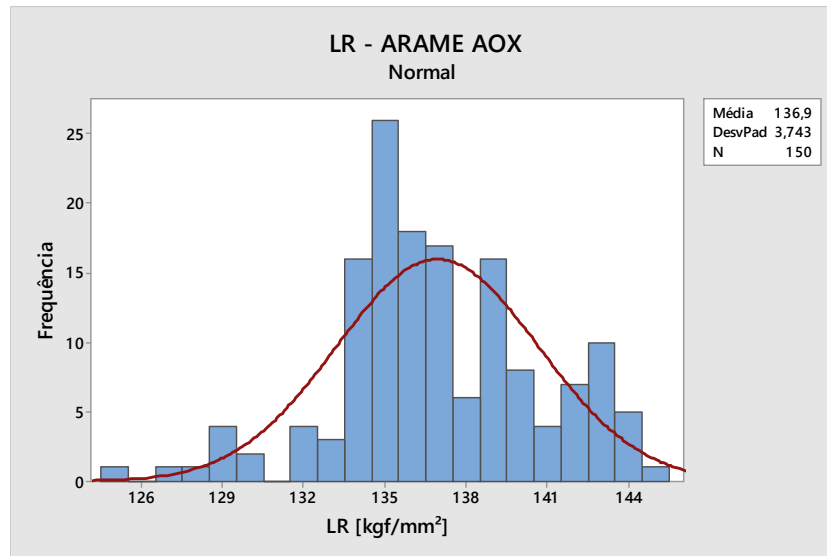


Figura 32 Limite de resistência do arame produzido a partir do aço AOX, na bitola 2,10 mm, no ano de 2015

Na Figura 33, verifica-se a distribuição de resultados de carga de ruptura (CRup) com média de 526,7 kgf, para um limite mínimo de especificação de 500 kgf.

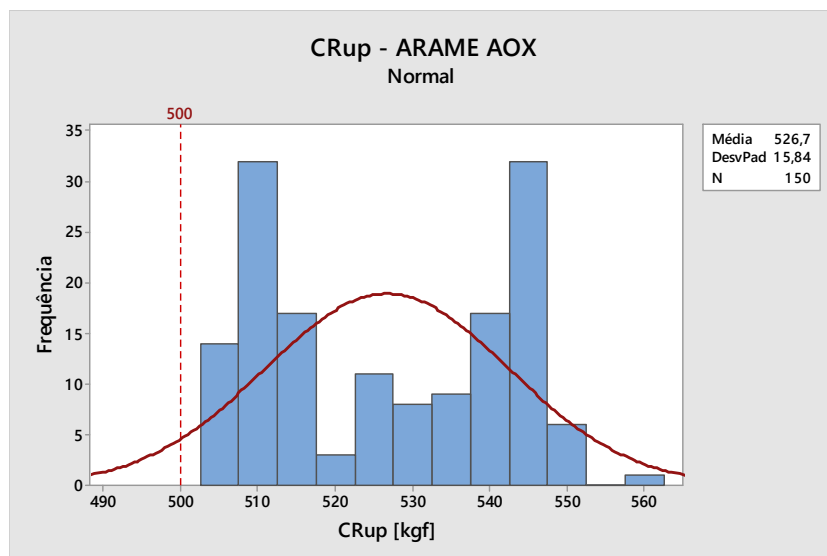


Figura 33 Carga de ruptura do arame produzido a partir do aço AOX, na bitola 2,10 mm, no ano de 2015

Na Figura 34, observa-se a distribuição de resultados de alongamento, medidos no ensaio de tração, em que se tem uma média de aproximadamente 8,9 %.

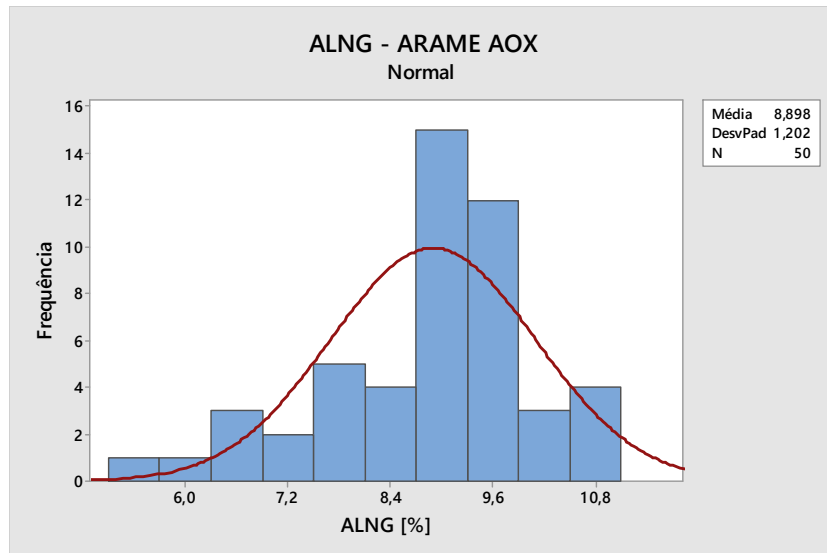


Figura 34 Alongamento do arame produzido a partir do aço AOX, na bitola 2,10 mm, no ano de 2015

A partir da análise dos dados e em função da especificação de produto, que consta na Tabela 2, estabeleceu-se que a carga de ruptura e o alongamento do arame são as propriedades mecânicas que norteiam a aprovação do mesmo, tornando-se, assim, referências na execução do presente trabalho.

Tabela 2 Especificação do arame galvanizado

| Dimensional (mm) | CRup (kgf) | Camada Zn (g/m²) | Enrolamento - Diâmetro do pino (mm) |
|-----------------------------|-----------------------|--|--|
| Ø 2,10 | 500 | 190 | 1 x Ø |

As propriedades do fio-máquina, além de não possuírem especificação estrita, apresentam grande variabilidade, não sendo consideradas para efeitos de especificação, já que o produto submetido às análises de liberação é o produto final (arame).

3.2 AÇO PRODUZIDO VIA ACIARIA A OXIGÊNIO

O material empregado na produção dos arames é um aço de médio carbono, semelhante ao SAE 1045, de acordo com a ABNT NBR 6330:1980, produzido em uma usina siderúrgica integrada, tendo como matéria-prima o minério de ferro.

Foi feita uma análise do histórico de composições químicas referentes aos lotes desse aço produzidos durante o ano de 2015, com o intuito de avaliar a distribuição dos principais

elementos químicos presentes. Foi utilizada a Equação 2, formulada pelo *International Institute of Welding* (IIW), para o cálculo do Carbono Equivalente no aço (Ceq).

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2)$$

Os valores médios de carbono equivalente das composições dos aços AOX e AEL servem como referência da relação entre a composição química e as propriedades mecânicas dos aços. Deve ser avaliado conjuntamente com as tolerâncias de carbono, manganês e silício durante a produção do aço, para que todos os limites sejam devidamente respeitados

A distribuição dos principais elementos químicos presentes nos lotes avaliados do aço supracitado é exposta nas Figuras 35 a 42.

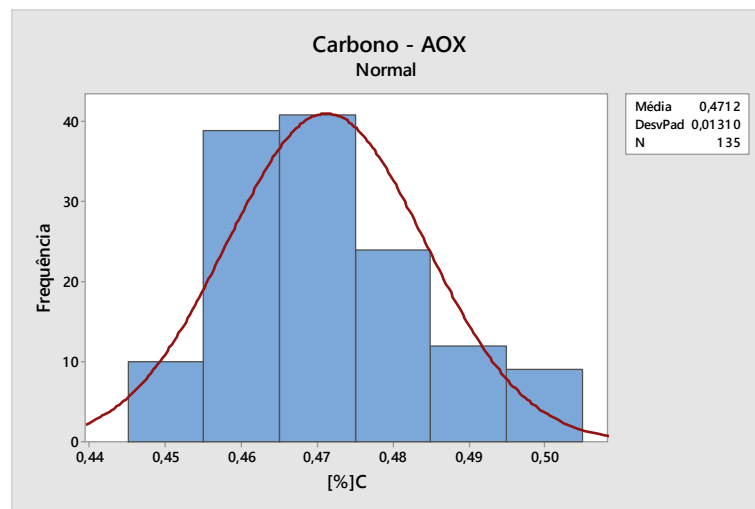


Figura 35 Distribuição do elemento carbono no aço AOX, durante o ano de 2015

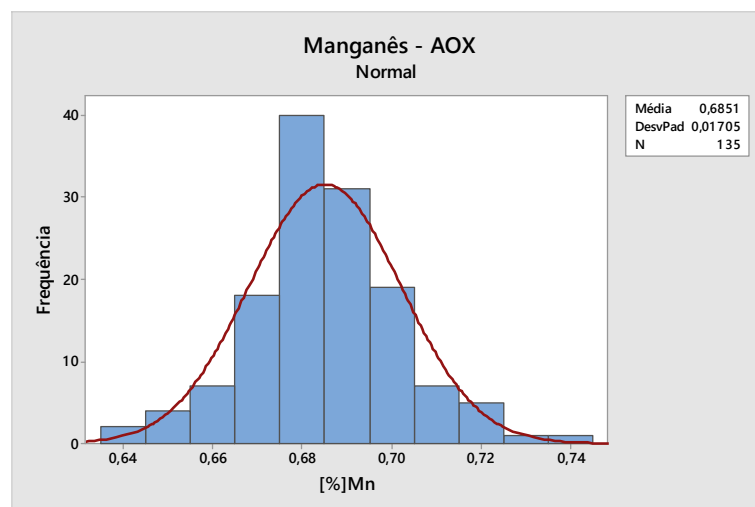


Figura 36 Distribuição do elemento manganês no aço AOX, durante o ano de 2015

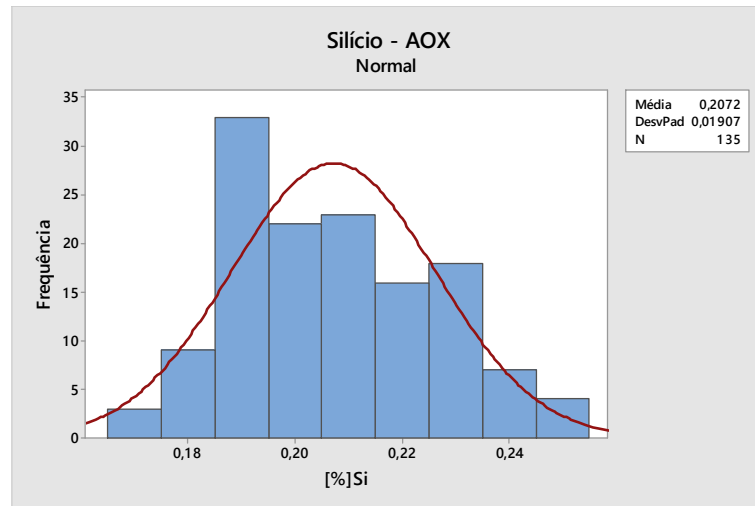


Figura 37 Distribuição do elemento silício no aço AOX, durante o ano de 2015

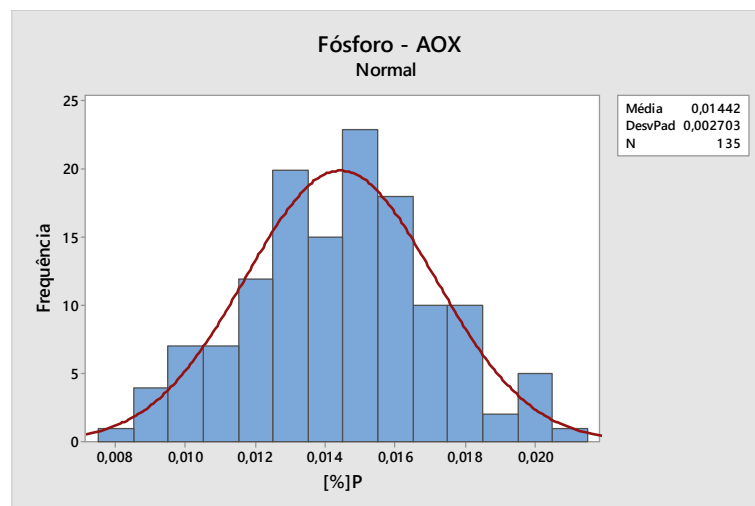


Figura 38 Distribuição do elemento fósforo no aço AOX, durante o ano de 2015

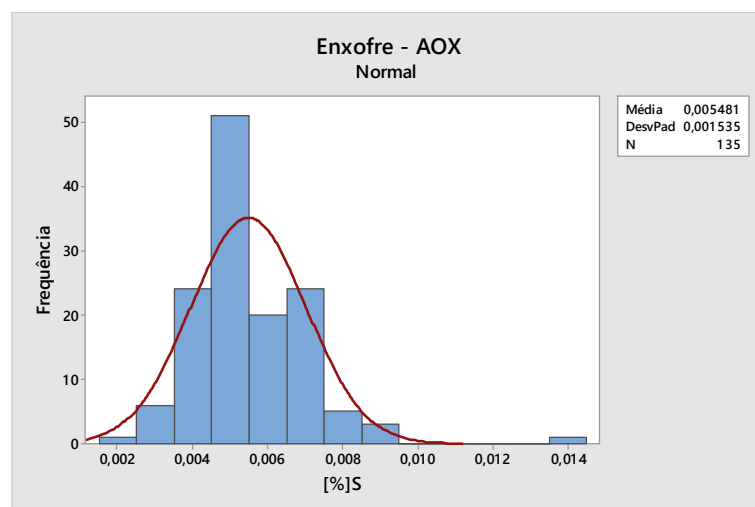


Figura 39 Distribuição do elemento enxofre no aço AOX, durante o ano de 2015

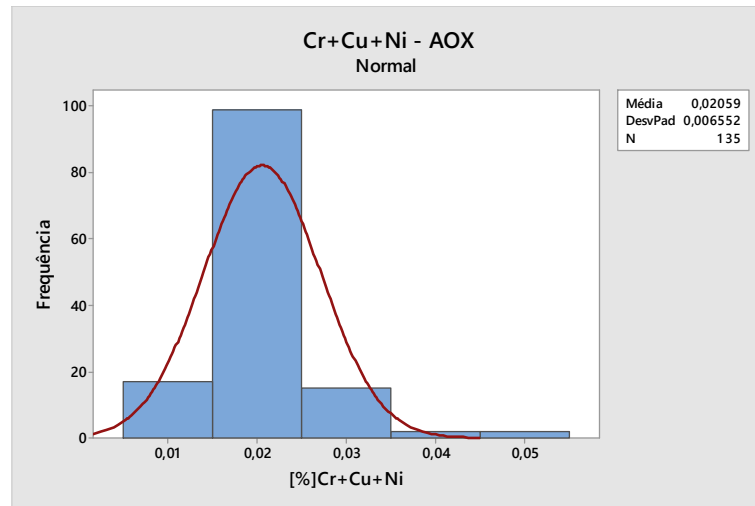


Figura 40 Distribuição do somatório dos elementos cromo, cobre e níquel no aço AOX, durante o ano de 2015

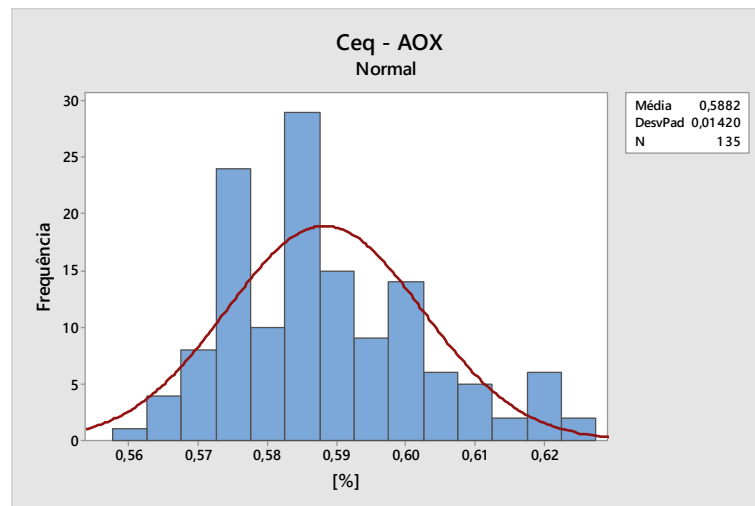


Figura 41 Distribuição do carbono equivalente no aço AOX, durante o ano de 2015

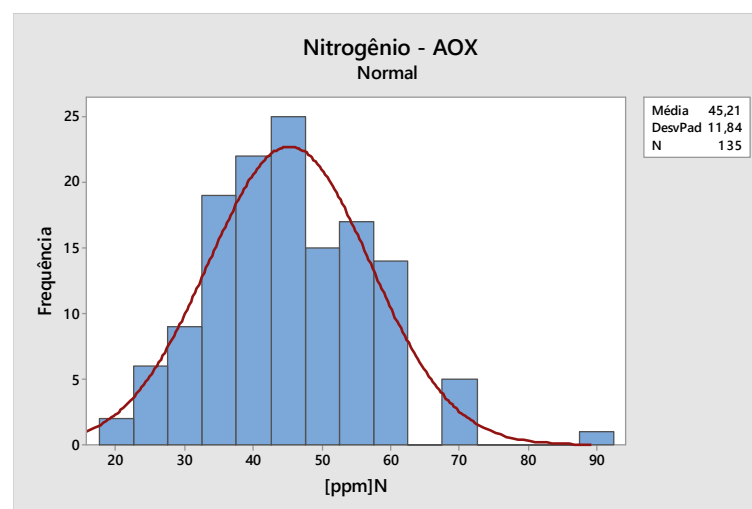


Figura 42 Distribuição do elemento nitrogênio no aço AOX, durante o ano de 2015

Com vistas à avaliação de um aço produzido via aciaria elétrica foram definidas duas condições de composições químicas, com Carbonos Equivalentes (Ceq) distintos. Optou-se por qualidade de aço também similar ao SAE1045, diferindo basicamente na matéria-prima e no processamento do aço. Buscou-se também privilegiar composições químicas que contemplassem mesmos teores de elementos residuais. Com base nos resultados desse estudo, pretende-se verificar o desempenho das composições na produção de fio-máquina destinado à produção de arames de aço.

Na Tabela 3 são apresentadas as composições químicas dos aços AOX e AEL – em termos de faixas para cada elemento – sendo o primeiro utilizado no processo produtivo, para fins comparativos.

Tabela 3 Composição química expressa em faixas de elementos para as composições dos aços semelhantes ao SAE 1045, AOX e AEL; carbono equivalente médio, para efeitos comparativos

| Composição Química [%] | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------------|----------|-------------|--------------|-----------------|
| | C | Mn | Si | S | P | Cr+Cu+Ni | N | Mn/S | Mn/Si | Ceq (%)* |
| AOX | 0,45 | 0,60 | 0,15 | - | - | - | - | >40 | - | 0,59 |
| | 0,50 | 0,80 | 0,25 | 0,015 | 0,020 | 0,13 | 60 | | | |
| AEL | 0,43 | 0,60 | 0,15 | - | - | - | - | >30 | >3 | 0,58 |
| | 0,48 | 0,90 | 0,30 | 0,030 | 0,030 | 0,36 | 100 | | | |

* Valor obtido pela média das faixas de cada elemento, usando a Equação 2.

Com o objetivo de considerar as condições mais representativas do aço AEL, em termos de composição química, buscou-se na seleção dos lotes para os testes, que o Carbono Equivalente estivesse próximo do máximo e do mínimo dos limites percentuais.

A relação %Mn/%S no aço apresenta um limite mínimo a ser atingido para garantir que ocorra 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 caso de %Mn/%Si no aço, é fundamental atender o valor estabelecido para que haja formação de inclusões líquidas durante o lingotamento, com o menor nível de oxigênio dissolvido possível. Valores baixos de Mn/Si favorecem formação de inclusões sólidas 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.

3.3 PRODUÇÃO DO AÇO

Os lotes dos aços com as composições utilizadas neste trabalho tiveram origem em uma usina siderúrgica semi-integrada, dotada de uma aciaria com forno elétrico a arco, que utiliza sucata metálica como matéria-prima principal. Os ajustes necessários de composições químicas e de temperatura foram realizados em um forno-panela. Logo após, o aço líquido passou pela etapa de lingotamento contínuo, onde foram produzidos os tarugos – a matéria-prima para a laminação do fio-máquina e posterior trefilação dos arames.

Os tarugos foram direcionados para a laminação do fio-máquina, passando por um forno de reaquecimento, no qual atingiram temperaturas próximas a 1100°C. Depois disso, os tarugos passaram por um trem de laminação composto por 24 passes, sendo que os últimos 10 passes ocorreram em um bloco laminador. O trem de laminação é dividido em desbaste, onde ocorrem grandes reduções; trem médio, início das diferentes regulagens para as diversas bitolas; e por fim o bloco acabador, que confere a forma e o dimensional necessários para o fio-máquina, que no presente trabalho é o dimensional de 5,50 mm.

Ao passar pelo último passe no bloco laminador, o fio-máquina adquiriu sua forma final. Em seguida, o material passou por uma zona de resfriamento, na qual água sob pressão é utilizada para reduzir a temperatura para um valor em torno de 950°C. O resfriamento é necessário para que ocorra a formação correta das espiras de fio-máquina.

A formação das espiras se dá por um equipamento que impõe uma curvatura em alta velocidade ao fio-máquina, que serão coletadas pelo coletor de espiras, formando rolos que caem sobre uma esteira, na qual o material segue resfriando ao ar, com a possibilidade de alteração das taxas de resfriamento – com o emprego de ventiladores ou capotas abafadoras, por exemplo. Na sequência, o material depois de prensado, é amarrado, pesado e identificado.

Por fim, o fio-máquina é destinado à trefilação, para produção dos arames de aço e posterior processo de galvanização. O processo de conformação mecânica se dá em uma trefila com máquinas dotadas de decapagem mecânica, por flexão e lixas rotativas, e que utilizam feiras como matrizes – que possibilitam grande precisão e controle dimensional e superficial. Para o arame em estudo, foi utilizada uma sequência de reduções composta de sete passes e lubrificantes sólidos a base de cálcio e sódio para se chegar ao dimensional de 2,10 mm, partindo do fio-máquina 5,50mm.

Após a trefilação os arames seguiram para o processo de galvanização, que ocorre em uma linha contínua, onde passa pelas etapas de desengraxe, decapagem química, lavagem, fluxagem, galvanização e passivação. Ao final, a etapa de bobinamento, em que o material é acondicionado em embalagens convenientes a cada aplicação (rolos).

3.4 ANÁLISE QUÍMICA

As amostras para análise de composição química foram retiradas em diferentes momentos da fabricação do aço na aciaria. Medições foram feitas no forno elétrico, durante a fusão da matéria-prima; no forno-panela, durante os acertos de composição química; e no distribuidor, que é considerada para aprovação final do aço antes da solidificação no processo de lingotamento contínuo.

Os resultados de composições químicas expostos neste trabalho foram obtidos a partir de amostras retiradas diretamente dos fios-máquina. Os ensaios foram realizados via espectrometria de emissão óptica, com o equipamento ARL 3460 AES.

3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para a caracterização dos fios-máquina e dos arames, amostras foram coletadas, cortadas em pequenos pedaços e embutidas para análise microestrutural das seções transversais e longitudinais, respectivamente. Após a etapa de embutimento, as amostras foram lixadas e polidas em feltro com pasta de diamante.

Para revelar a microestrutura foi feito ataque das superfícies com reagente Nital 2%. A aquisição das imagens obtidas foi realizada com auxílio de um microscópio óptico OLYMPUS BX60M acoplado a uma câmera digital SONY DXC-970MD e um sistema de aquisição de imagens por computador.

A análise permitiu a visualização das microestruturas, nos fios-máquina e nos arames, e a determinação de tamanho de grão nos fios-máquina. Para obtenção dos valores de tamanho de grão, valeu-se da técnica de cálculo de área, através do software analisador de imagens DIGIMET 5G.

Os procedimentos de análise para a determinação de tamanho de grão seguiram a norma ASTM E112:2013.

Também foram feitas análises em um microscópio eletrônico de varredura SHIMADZU SSX-550, a fim de avaliar a morfologia da perlita presente em cada uma das condições estudadas.

Complementarmente, procedeu-se a análise e tratamento das micrografias com uso de *software* analisador de imagens – utilizando o *software* IMAGE J, de código aberto e uso livre.

3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram conduzidos em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013. A máquina EMIC DL10000, com capacidade de 10t, foi eleita para realização dos ensaios em laboratório, com a finalidade de que não houvesse alterações quanto à metodologia e aos procedimentos empregados.

As amostras para este ensaio foram retiradas das espiras de fios-máquina e de arames de cada uma das condições propostas do aço AEL. Foram realizados ensaios em 30 amostras de cada condição, anteriormente citadas. Por se tratarem de produtos em rolo, foi necessário um procedimento de endireitamento manual das amostras, que impusesse a menor deformação plástica possível, para viabilizar os ensaios sem que ocorressem alterações nos resultados de propriedades mecânicas por conta do encruamento.

As amostras foram cortadas em comprimento de 300 mm e marcadas em espaçamentos de 10 vezes o diâmetro nominal do arame, para determinação de alongamento após a ruptura. O laboratório de ensaios tem controle e monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar, que são mantidas dentro de limites especificados para não comprometerem os resultados.

A partir destes ensaios foi possível obter valores de limite de escoamento, limite de resistência, carga de ruptura, alongamento após ruptura e estrição.

3.7 ENSAIO DE ENROLAMENTO

Os ensaios de enrolamento foram realizados nas amostras de arames galvanizados com dispositivo de enrolamento manual, conforme mostra a Figura 43, que consiste em enrolar o corpo de prova (arame) de modo a formar um determinado número de espiras justapostas ao redor de um mandril de diâmetro determinado. O corpo de prova é enrolado perpendicularmente ao eixo do mandril.

O ensaio de enrolamento visa a verificação da ductilidade de arames de aço e também, no caso de arames galvanizados, a aderência de seu revestimento, conforme a norma ABNT NBR 6005:2011.



Figura 43 Dispositivo para realização dos ensaios de enrolamento dos arames
Fonte: CORTESIA DE USINA SIDERÚRGICA.

Após o enrolamento do arame, que não pode romper durante o ensaio, o corpo de prova é examinado visualmente. Relativo à aderência do revestimento, esse é considerado aderente quando não apresenta fissuras ou trincas. As etapas envolvidas nos ensaios de enrolamento seguiram os critérios definidos na norma ABNT NBR 6005:2011.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados nos fios-máquina e nos arames a partir das duas condições de composições químicas do aço AEL em substituição ao aço AOX.

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para o presente estudo, foram analisadas duas condições de composições químicas do aço AEL em comparação ao aço AOX, empregado na produção de arames. Buscando-se explorar uma maior amplitude de composições, foi objetivado o emprego de duas condições com valores distintos de C_{eq} .

Os teores de carbono, manganês e silício da condição AEL 1 ficaram bastante próximos dos limites mínimos da especificação proposta. Por outro lado, para a condição AEL 2, objetivou-se ficar próximo dos limites máximos da especificação proposta.

As composições químicas das qualidades propostas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 Composição química das condições analisadas

| Composição Química [%] | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------------|-------------|--------------|---------------|
| | C | Mn | Si | S | P | Cr+Cu+Ni | Mn/S | Mn/Si | Ceq[%] |
| AEL 1 | 0,43 | 0,63 | 0,19 | 0,02 | 0,02 | 0,25 | 34 | 3 | 0,57 |
| AEL 2 | 0,46 | 0,81 | 0,29 | 0,02 | 0,02 | 0,24 | 51 | 3 | 0,62 |

Os valores de $\%Mn/\%S$ obtidos minimizam a incidência de problemas durante o lingotamento contínuo e a posterior laminação. As relações $\%Mn/\%Si$ atingidas garantem a formação de inclusões líquidas durante as operações de lingotamento, melhorando, por exemplo, aspectos operacionais como a obstrução das válvulas da panela e do distribuidor.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As microestruturas analisadas a seguir são de seções transversais das amostras de fio-máquina e das seções longitudinais dos arames. As imagens apresentam magnificação de 200X na imagem original, em microscópio óptico.

4.2.1 Análise Microestrutural da Condição AEL 1

A Figura 44 mostra a microestrutura transversal do fio-máquina, onde pode ser observada a estrutura composta por perlita e grãos de ferrita pró-eutetóide em rede, com regiões apresentando morfologias de *widmanstätten* – características de um provável resfriamento mais severo. Para este fio-máquina os tamanhos de grão ferrítico apresentaram-se na ordem de $29,9 \mu\text{m}^2$ ou ASTM 12.

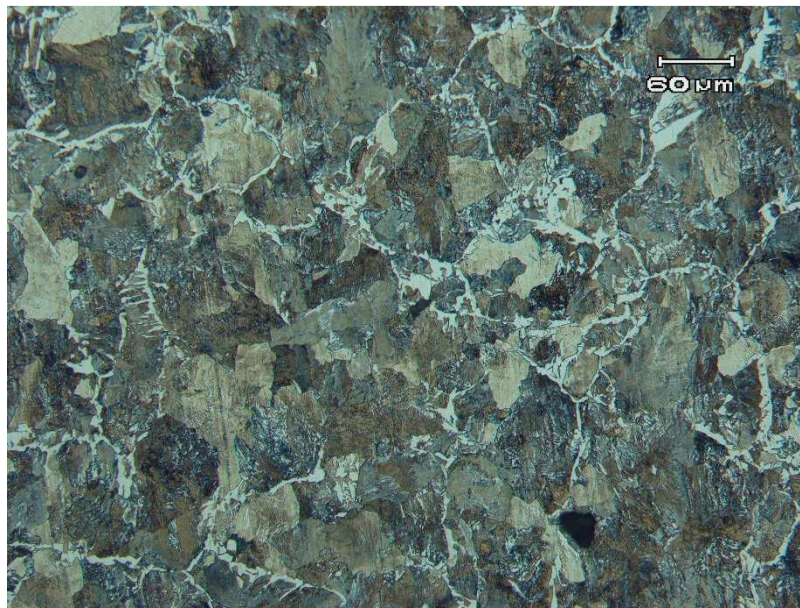


Figura 44 Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina da condição AEL 1, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

A Figura 45 mostra a seção longitudinal do arame em que é possível observar a microestrutura típica de um material que sofreu trabalho de conformação a frio, com grãos alongados, que caracterizam a microestrutura encruada. Pelo fato do alongamento dos grãos, não foram feitas medidas de tamanho de grão da estrutura trabalhada a frio.



Figura 45 Microestrutura da seção longitudinal de uma amostra de arame da condição AEL 1, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

4.2.2 Análise Microestrutural da Condição AEL 2

A Figura 46 mostra a microestrutura transversal do fio-máquina produzido com aço da condição AEL 2, onde pode ser observada a estrutura, com grãos mais regulares (equiaxiais), composta de perlita e ferrita pró-eutetóide em rede. Para este fio-máquina os tamanhos de grão ferrítico apresentaram-se na ordem de $27,3 \mu\text{m}^2$ ou ASTM 12,2.

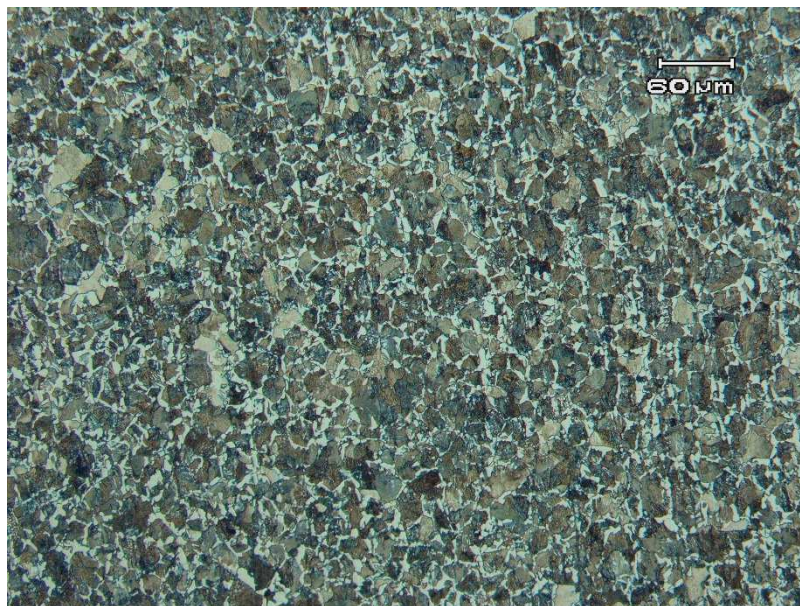


Figura 46 Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina da condição AEL 2, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

A Figura 47 mostra a seção longitudinal do arame em que é possível observar os grãos fortemente alongados, resultado esperado de uma microestrutura encruada, devido ao trabalho de conformação a frio.

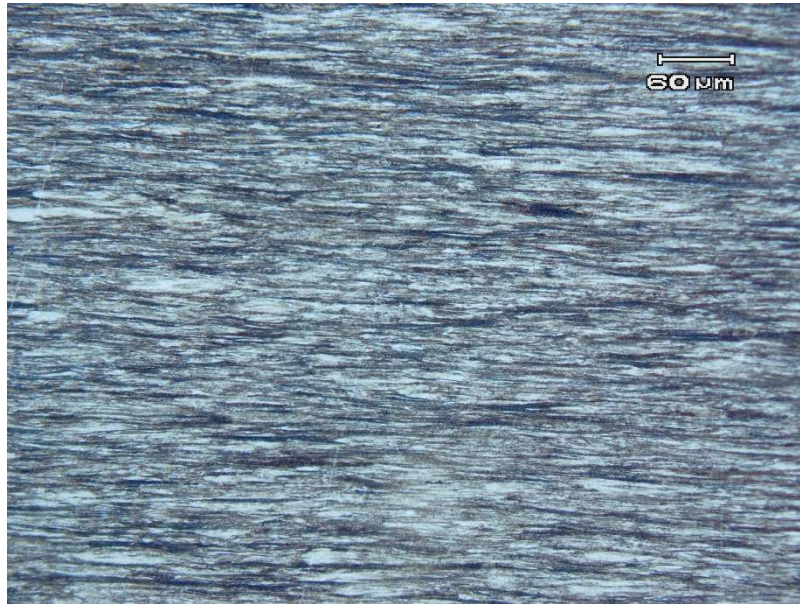


Figura 47 Microestrutura da seção longitudinal de uma amostra de arame da condição AEL 2, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

De forma geral, pode-se observar diferenças significativas nas microestruturas das duas condições, AEL 1 e AEL 2, com relação ao tamanho das colônias de perlita e, por outro lado, similaridade quanto aos tamanhos de grão ferrítico quando observadas as micrografias dos fios-máquina. Na análise das microestruturas dos arames, verifica-se uma aparente diferença na proporção de perlita e ferrita.

A Figura 48 mostra a seção transversal do fio-máquina do aço AOX, com microestrutura também composta de perlita e ferrita pró-eutetóide e que apresenta tamanho de grão ferrítico médio da ordem de $20,4 \mu\text{m}^2$ ou ASTM 12,6.



Figura 48 Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AOX, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

Na Figura 49 é apresentada a seção longitudinal de arame obtido a partir desse fio-máquina, com a característica estrutura encruada.

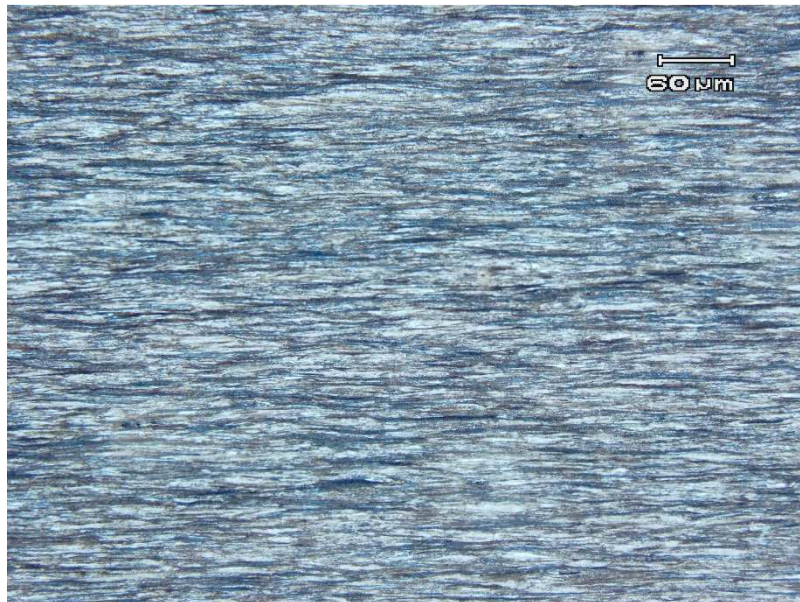


Figura 49 Microestrutura da seção longitudinal de uma amostra de arame do aço AOX, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 200X

Comparativamente, as microestruturas do aço AOX e da condição AEL2 apresentaram resultados similares, diferentemente da condição AEL 1, tanto para os fios-máquina quanto para os arames.

4.2.3 Análise de Imagens

Foram selecionadas micrografias representativas dos materiais a serem analisados, nas condições de fio-máquina dos aços AEL 1, AEL 2 e AOX com o intuito de determinar as frações presentes e, a partir desses dados, buscar relacionar com os resultados obtidos de propriedades mecânicas.

Para a determinação da fração volumétrica em metais, considera-se, em geral, que essa é igual à fração em área. Pelo fato da opacidade dos metais, não se tem acesso ao volume, para o que seria necessária a obtenção de sucessivas seções do material, em uma espécie de tomografia, o que é demasiado trabalhoso e demorado (LOMBARDO *et al*, 2010).

Na Figura 50 é apresentada micrografia da condição AOX. Através da preparação da imagem, foi possível realizar a medição das áreas e chegar aos valores de fração de volume dos microconstituintes.

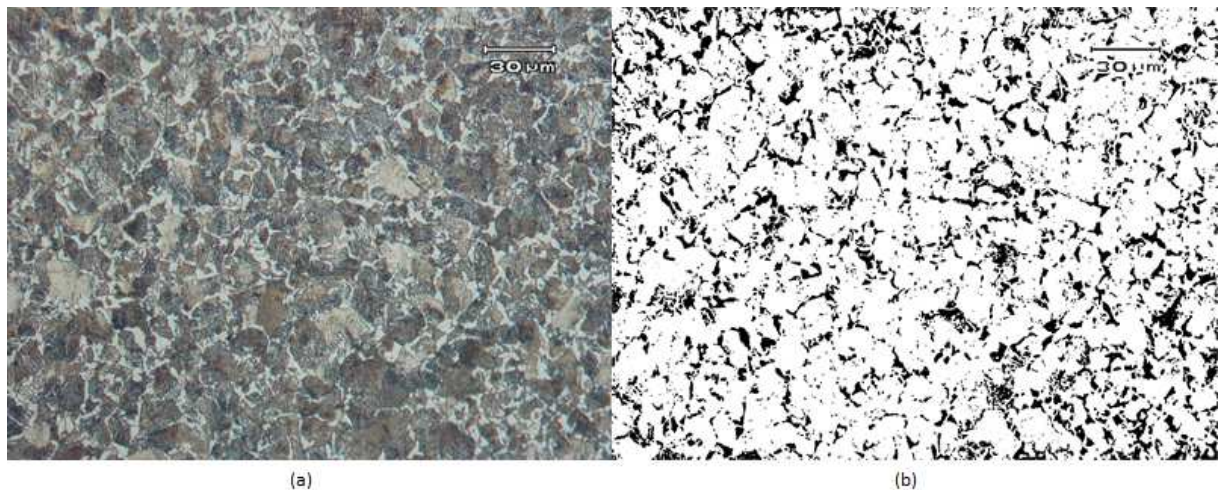


Figura 50 (a) Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AOX, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 500X; (b) imagem tratada em *software*

Nas Figuras 51 e 52 tem-se as micrografias das condições AEL 1 e AEL 2.

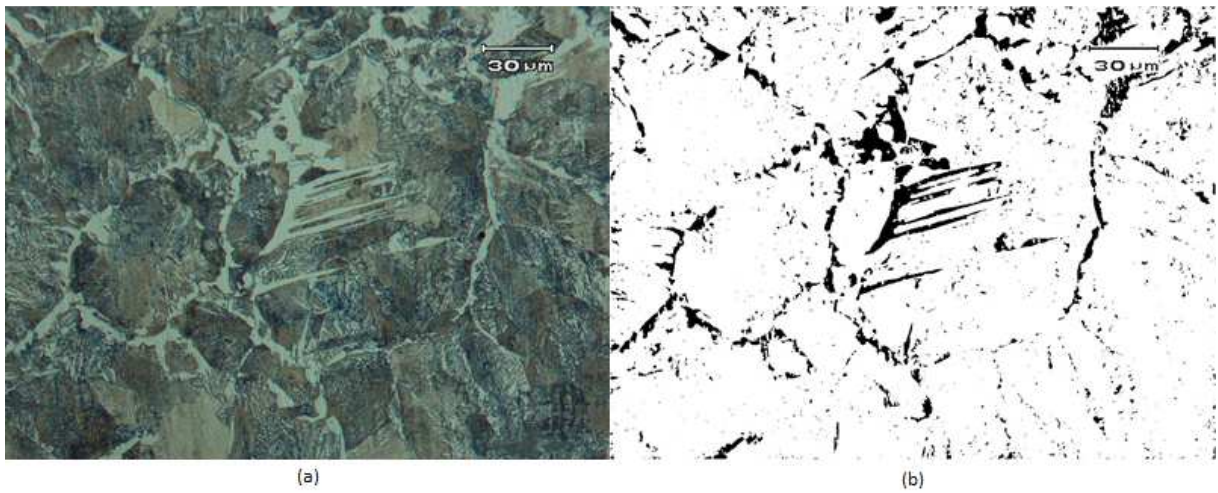


Figura 51 (a) Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AEL 1, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 500X; (b) imagem tratada em *software*

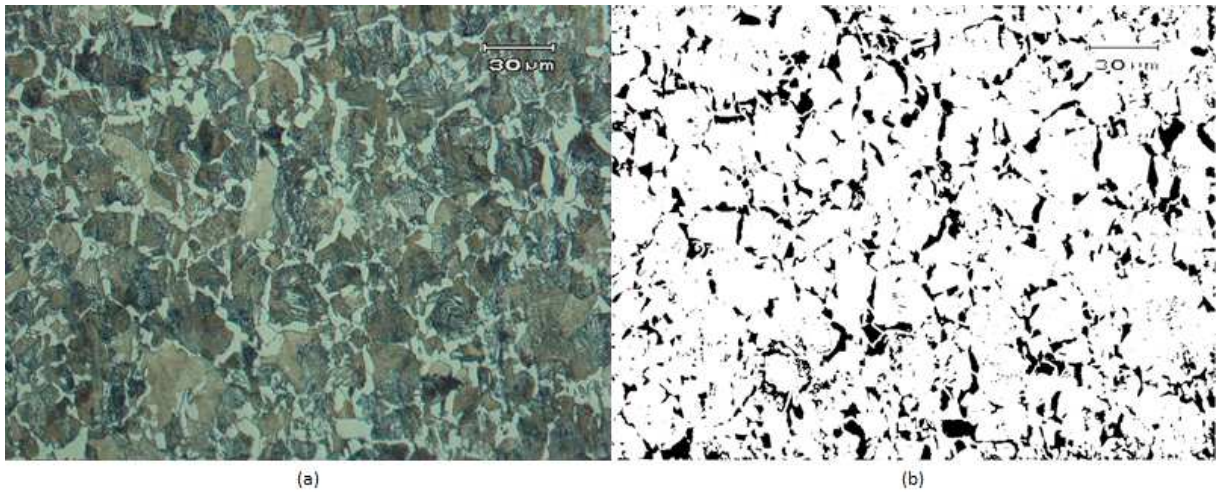


Figura 52 (a) Microestrutura da seção transversal de uma amostra de fio-máquina do aço AEL 2, revelada a partir de ataque Nital 2% e com aumento de 500X; (b) imagem tratada em *software*

A seguir na Tabela 5 são apresentados os resultados da determinação da fração volumétrica dos microconstituintes:

Tabela 5 Resultados de determinação da fração volumétrica dos microconstituintes

| Condição | Fração volumétrica de ferrita [%] |
|-----------------|--|
| AOX | 17,95 |
| AEL 1 | 8,57 |
| AEL 2 | 14,50 |

A partir dos resultados de determinação da fração volumétrica, realizada por meio de *software* de análise de imagens, verificou-se que a condição AEL 1 é a que apresenta a menor fração de ferrita pró-eutetóide em sua microestrutura – tendo, portanto, predominância de perlita em sua microconstituição.

Os resultados para as condições AOX e AEL 2 revelam frações volumétricas de ferrita superiores, em que o aço AOX é o que apresenta a maior fração desse microconstituente.

Além das micrografias obtidas por microscopia óptica, também foi utilizada microscopia eletrônica de varredura para avaliação do espaçamento interlamelar da perlita – Figura 53 – presente em cada uma das amostras.

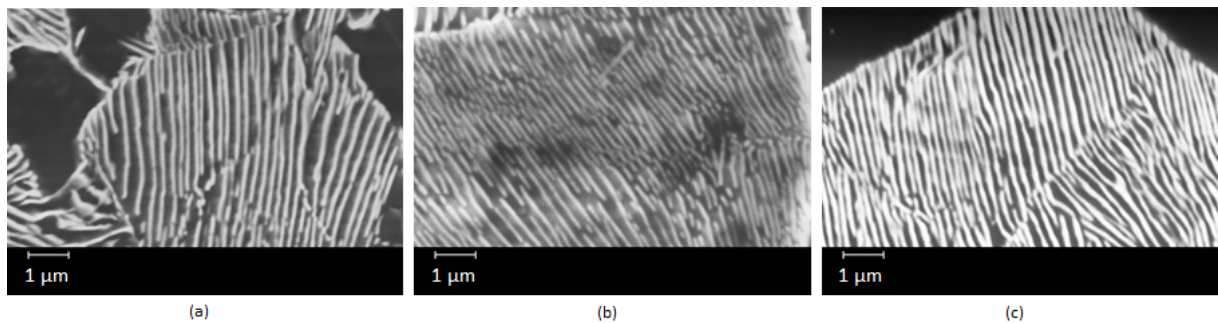


Figura 53 Micrografias obtidas através de microscopia eletrônica para determinação do espaçamento interlamelar nas amostras AOX (a), AEL 1 (b) e AEL 2 (c)

Conforme abordado por Silva (2007), o espaçamento interlamelar da perlita, em uma determinada amostra a uma determinada temperatura, é constante, não variando consideravelmente em relação a um valor médio. Razão essa, pela qual, assume-se esse valor médio como referência. Adicionalmente, segundo Reed-Hill (1982), a variação do valor médio é consideravelmente inferior ao que se poderia prever em função do exame metalográfico, em que, aparentemente, o espaçamento varia bastante. Credita-se ao fato de que o plano correspondente à superfície analisada não intercepta todas as colônias sob o mesmo ângulo, em função das diferentes orientações cristalográficas.

Na Tabela 6 são apresentados os valores de espaçamento interlamelar médio da perlita para cada uma das condições avaliadas:

Tabela 6 Resultados de determinação do espaçamento interlamelar da perlita

| Condição | Espaçamento interlamelar médio [µm] |
|-----------------|--|
| AOX | 0,20 |
| AEL 1 | 0,16 |
| AEL 2 | 0,22 |

Observou-se similitude entre os valores de espaçamento determinados para as condições AOX e AEL 2, tendo a condição AEL 1 apresentado um espaçamento médio relativamente menor – o que se pode depreender de uma maior taxa de resfriamento no formador de espiras na laminação do fio-máquina, conforme Silva (2007). Para Takashi *et al.* (1980 *apud* Ramalho, 1994) o menor espaçamento interlamelar médio da perlita da condição AEL 1 pode ser considerado fator positivo para sua trefilabilidade nos processos posteriores.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados para as duas condições propostas do aço AEL. Para cada uma das condições, são apresentados os resultados referentes a limite de resistência (LR) e estrição (Z), para o fio-máquina. Para o arame são apresentados resultados de limite de resistência (LR), carga de ruptura (CRup) e alongamento (ALNG).

O limite mínimo apresentado nos gráficos de carga de ruptura (CRup) é oriundo da especificação do produto.

4.3.1 Propriedades Mecânicas do aço AEL

O aço AEL consiste em uma qualidade semelhante ao SAE1045 produzido em aciaria elétrica a partir de sucata ferrosa. Para o presente estudo foram produzidas duas condições de composição química, AEL 1 e AEL 2, com Ceq 0,57 e 0,62, respectivamente.

Foram realizados ensaios em 30 amostras de cada condição, fio-máquina e arame, de AEL 1 e AEL 2.

As Figuras 54 e 55 mostram os resultados obtidos para as amostras de ambos os fios-máquina e são colocados também os resultados do aço AOX, já apresentados anteriormente, para efeitos de comparação.

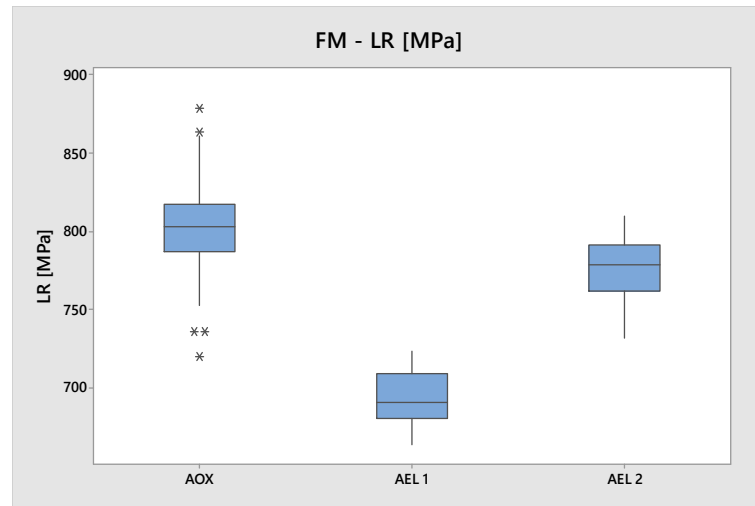


Figura 54 Limite de resistência dos fios-máquina das condições AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX

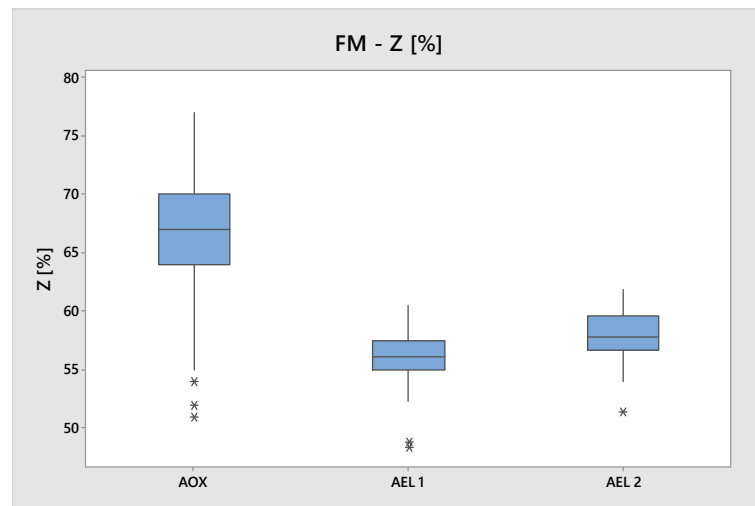


Figura 55 Estricção dos fios-máquina das condições AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX

Com relação às propriedades mecânicas, o fio-máquina da condição AEL 2 apresenta valores maiores para LR, principalmente por seu maior teor de carbono frente a condição AEL 1 e semelhantes ao do aço AOX. Quanto à estricção, ambas as condições AEL 1 e AEL 2 apresentam valores inferiores ao aço AOX.

A seguir, nas Figuras 56 a 58, são exibidos os resultados de propriedades mecânicas – LR, CRup e ALNG – para os arames AEL 1 e AEL 2, em comparação ao aço AOX.

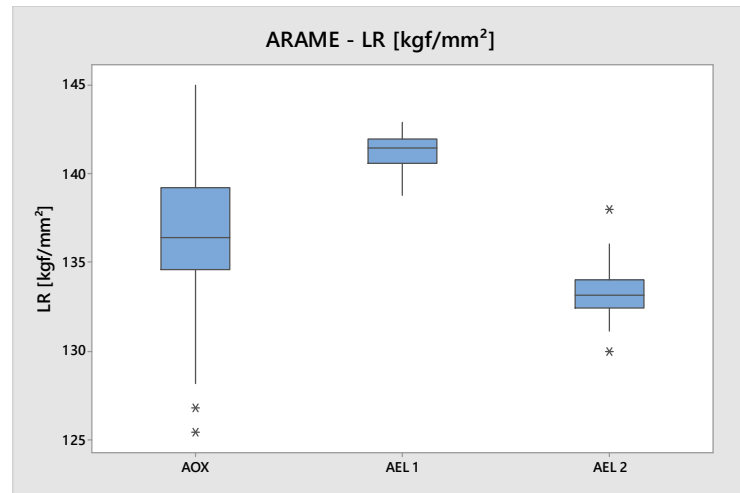


Figura 56 Limite de resistência dos arames produzidos a partir dos aços AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX

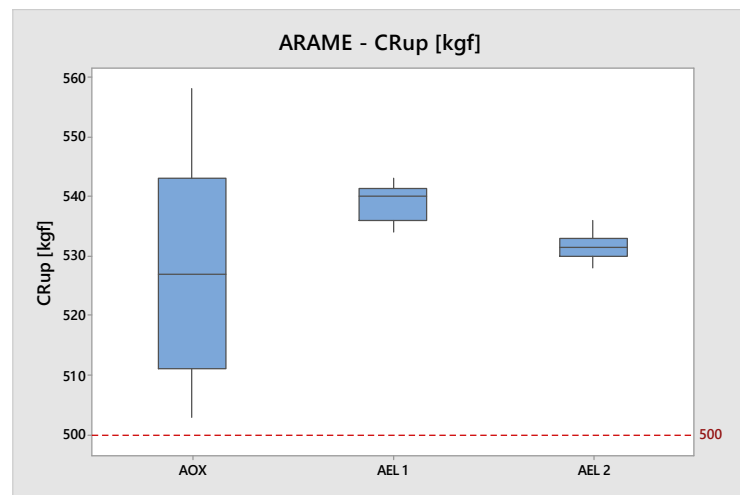


Figura 57 Carga de ruptura dos arames produzidos a partir dos aços AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX

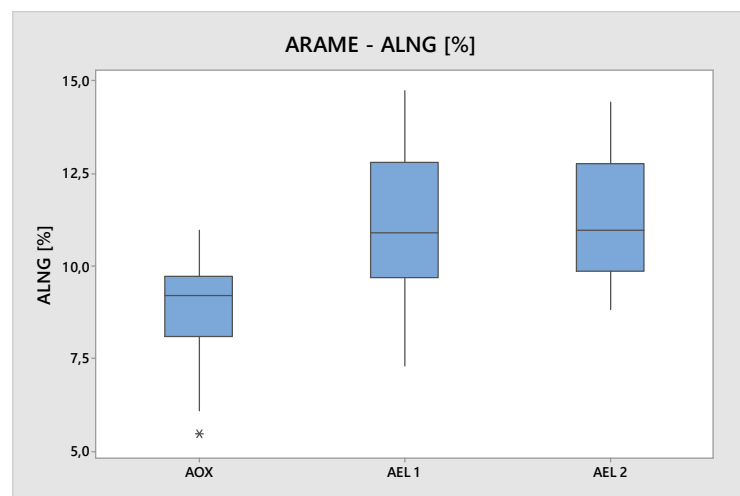


Figura 58 Alongamento dos arames produzidos a partir dos aços AEL 1 e AEL 2, em comparação aos resultados do aço AOX

Com base nos resultados dos ensaios de tração, restou evidenciado que os arames da condição AEL 1 foram os que apresentaram os maiores valores de resistência mecânica – LR e CRup. Tal situação não foi observada nos resultados referentes aos fios-máquina, em que as condições AOX e AEL 2 é que apresentaram os maiores valores para tais propriedades.

Essa alteração na ordenação, após o trabalho de conformação mecânica a frio, pode ser explicada pelas diferentes frações volumétricas de ferrita encontradas na microestrutura de cada condição (AKBARPOUR; EKRAMI, 2007). O endurecimento promovido pela deformação plástica a frio, durante o processo de trefilação, resulta em diferentes níveis de encruamento em função da microestrutura prévia – maior ou menor fração de perlita, que é um microconstituente de maior dureza, quando comparado com a ferrita (CETLIN, 2002).

4.4 ENSAIO DE ENROLAMENTO

Os ensaios de enrolamento foram realizados nos arames trefilados a partir do aço AEL, nas condições 1 e 2, posteriormente à etapa de galvanização. O referido ensaio pretende avaliar a ductilidade do material e a aderência do revestimento, no caso dos galvanizados.

Foram ensaiadas 10 amostras de cada condição, AEL 1 e AEL 2, dos arames. A Figura 59 apresenta um exemplo de amostra após a realização do ensaio.



Figura 59 Amostra de arame após o ensaio de enrolamento

Tendo sido feitos os ensaios, não foi observado qualquer tipo de fissura, trinca ou quebra em sua superfície, indicativo de ductilidade do arame e aderência do revestimento satisfatórias para os arames galvanizados.

5.0 CONCLUSÕES

Fundamentando-se nos testes realizados, na metodologia aplicada e nos resultados obtidos neste trabalho, permite-se concluir que:

1. As condições propostas, denominadas AEL 1 e AEL 2 (semelhantes ao aço SAE1045), nas composições químicas empregadas nos testes atenderam aos valores de propriedades mecânicas especificados para o arame em estudo;
2. Considerando a proposta AEL 1, na condição empregada nos testes, verificou-se os maiores valores de LR e CRup – 141,2 kgf/mm² e 538 kgf, respectivamente – após o processo de trefilação, para uma fração volumétrica de ferrita 52% menor na microestrutura e um espaçamento interlamelar da perlita 20% inferior, em comparação à condição AOX;
3. Os arames, das condições testadas, não apresentaram qualquer tipo de rompimento ou fissura do revestimento durante os ensaios de enrolamento;
4. A metodologia proposta neste trabalho é válida, visto que além de ter como referência, na condução dos testes, o levantamento e análise de um histórico de dados, também considerou condições críticas de composição química, com o intuito de viabilizar resultados prenunciados e satisfatórios.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

1. Avaliar demais condições críticas no desenvolvimento do emprego do aço, AEL, semelhante ao SAE1045 na produção de arames galvanizados para o setor agropecuário, tais como: faixa de composição química e seus limites, parâmetros operacionais de produção do aço em aciaria elétrica. A partir dessa avaliação, poderá se compreender os efeitos desses sobre as propriedades mecânico-metalúrgicas dos arames produzidos;
2. Avaliar parâmetros de operação e condições críticas do processo de laminação do fio-máquina, com ênfase na etapa de resfriamento das espiras, a fim de verificar a relação com as microestruturas obtidas;
3. Também na etapa de resfriamento das espiras, avaliar a formação dos óxidos de ferro (carepa) adequadas ao processamento posterior na trefilação, visando otimização de decapagem e vida útil de matrizes.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARPOUR, M.R.; EKRAMI, A. **Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels**. Materials Science and Engineering A, 2007.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. **Zinc coatings: A comparative analysis of process and performance characteristics**. Centennial, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. ASTM International, 2013.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G. T. **A Ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2000.

ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia – Volume II**. 2ed. Arte e Ciência. São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6005: Arames de aço revestidos e não revestidos – Verificação da ductilidade e da aderência do revestimento**. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6331: Arame de aço de baixo teor de carbono, zincado, para uso geral - Especificação**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de tração; Parte 1: Métodos de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2013.

BAIN, E.C. **Functions of the Alloying Elements in Steel**. Cleveland, Ohio: ASM, 1939.

BORGES, M. M. **Processos Produtivos: Conformação Mecânica**, [201-?] Disponível em: <<https://sites.google.com/site/epdprocessos/conformacao>>. Acesso em 9 Set. 2015.

BUONO, V.T.L.; GONZALEZ, B.M.; SILVA, E.M.P.; ANDRADE, M.S. **Cinética do envelhecimento após deformação em fios de aços eutetóides**. Matéria, v.2, n.1, 1997.

BUTTON, S. T. **Trefilação: Programa de Educação Continuada**. São Paulo: ABM, 2001.

- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CAMPANHER, C. G. **Otimização Experimental em Processo de Galvanização de Arames de Camada Pesada**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- CETLIN, P. R. **Trefilação básica**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG. Belo Horizonte, 2002.
- CIRIZA, J. **Fundamentos da Fabricação do Aço**. Escola Técnica: Gerdau, 2013.
- DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**. 2ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- DOVE, A. B. **Steel Wire Handbook**. USA: The Wire Association International INC, Vol1, 3ªed., 1979.
- EI-DOMINATY, A.; KASSAB, S. Z. **Temperature Rise in Wire-Drawing**. Journal of Materials Processing Technology, v.83, p. 72-83, 1998.
- EMBRAPA UVA E VINHO. **Sistemas de Condução da Videira**. Disponível em: <<http://www.cnpuv.embrapa.br/publica/sprod/viticultura/espald.html>>. Acesso em 15 Set. 2015.
- ENGHAG, P. **Steel Wire Technology**. Sweden: Repro Örebro University, 3ed., 2003.
- GLADMAN, T. **The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels**. 1ed. Londres: The Institute of Materials, 1997.
- HAGLUND, B. O.; ENGHAG, P. **Characterization of Lubricants Used in the Metalworking Industry by Thermoanalytical Methods**. Termochimica Acta, p. 494-499, No 282/283, 1996.
- HÄMMERLE, J. R.; DE ALMEIDA, L. H.; MONTEIRO, S. N. **Lower temperatures mechanism of strain aging in carbon steels for drawn wires**. Scripta Materialia, p. 1289-1292, No 50, 2004.
- HILLERY, M. T.; McCABE, V. J. **Wire Drawing at Elevated Temperatures Using Different Die Materials and Lubricants**. Journal of Materials Processing Technology, Vol.55, p. 53-57, 1995.
- HONEYCOMBE, R. W. K.; BHADSHIA, H. K. D. H. **Steels: Microstructure and Properties**. Oxford: Elsevier, 2006.
- IMANDOUST, A. *et al.* **Effects of ferrite volume fraction on the tensile deformation characteristics of dual phase twinning induced plasticity steel**. Materials and Design 53, 2014.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Mercado Brasileiro de Aço: Análise Setorial e Regional**. Rio de Janeiro, 2015.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2016**. Rio de Janeiro, 2016.
- LEROY, V. *et al.* **Effects of tramp elements in flat and long products**. Office for Official Publications of the European Communities, Brussels, 1995.

- LESLIE, W.C. **The Physical Metallurgy of Steels**, McGraw-Hill, New York, 1981.
- LOMBARDO, S. et al. **Método para o cálculo da fração volumétrica de austenita retida através do software de análise digital de imagens**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 19. Campos do Jordão, 2010, p. 4968-4975.
- MARDER, A. R. **The Metallurgy of Zinc-Coated Steel**. Progress in Materials Science, p. 191-271, 2000.
- MOHAN, R.; MARSCHALL, C. **Cracking Instabilities in a Low-Carbon Steel Susceptible to Dynamic Strain Aging**. Acta Metallurgica, v.4, n. 6, 1998.
- MCGANNON, H. E. **The making, shaping and treating of steel**. 9ed. Pittsburgh: United States Steel Co., 1971.
- MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: ABM, 2007.
- NUNES, L. M. **Desenvolvimento de Aço Microligado para a Produção de Vergalhão Nervurado**. Dissertação – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- OLIVEIRA, W. C. **Influência do cromo no envelhecimento após deformação em fios de aço perlítico trefilados**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- PANNONI, F. D. **Princípios da galvanização a fogo**. Centro Brasileiro da Construção em Aço. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/266345339_Principios_da_Galvanizacao_a_Fogo>. Acesso em 14 Jul. 2016.
- PENNA, L. V. **Trinca de Solidificação Off-Corner no Lingotamento Contínuo de Tarugos**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- PICKERING, F. B. **Physical Metallurgy and the Design of Steels**. 1ed. Londres: ASP, 1978.
- RAMALHO, J. G. **Desenvolvimento de aço produzido por lingotamento contínuo para fio-máquina de alta resistência adequado à trefilação direta**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1994.
- REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. Guanabara Dois: Rio de Janeiro, 1982.
- RIZZO, E. M. S. **Processos de Laminação de Produtos Longos de Aços**. 1ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010.
- RUDDLE, G. E. **Effects of Residuals in Carbon Steels**. American Iron and Steel Institute, Pittsburgh, 2002.
- SILVA, F. A. **Efeito do resfriamento controlado após laminação a quente nas propriedades mecânicas e na microestrutura de um fio-máquina de aço alto carbono com cromo**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SOUZA, S.A. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

WIREFIRST.COM. **ArcelorMittal Hamburg modernizes wire rod mill**, 2011. Disponível em: <<http://www.wirefirst.com/newsdetail.php?ID=3089>>. Acesso em 27 Out. 2016

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2016**. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2016/World-Steel-in-Figures-2016-is-available-online.html>>. Acesso em 27 Ago. 2016

ZEMPULSKI, L. N.; ZEMPULSKI, M. F. S. **Galvanização eletrolítica**. Instituto de Tecnologia do Paraná, SBRT, 2007. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MTM0>>. Acesso em 18 Out. 2016.