



---

ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE AÇO BAIXO CARBONO PRODUZIDO EM ACIARIA  
ELÉTRICA PARA A FABRICAÇÃO DO ARAME GALVANIZADO BWG 12**

Sabrina Karnopp Forte  
Matrícula 00216640

Professor Orientador Dr. Hugo Marcelo Veit

Junho de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais, Nilza e Carlos, e aos meus irmãos, Caroline, Camila e Diego.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por apoiar minhas escolhas e incentivar o meu crescimento profissional, principalmente durante o período da graduação, tornando essa conquista possível. Além disso, por serem meus grandes exemplos de caráter, integridade e profissionais.

Aos amigos que, de alguma forma, ajudaram na conclusão desse trabalho e também àqueles que compartilharam momentos, experiências e conhecimento durante a graduação.

Ao colega de trabalho Jéferson Cassio D'Ávila da Silva por ter me oportunizado a realização desse trabalho e apoiado na condução do mesmo.

Aos colegas de trabalho Gustavo Pelisser, pelo apoio na condução desse trabalho e pelas trocas de conhecimento, e Alexsander Otoni Vilela, pelo auxílio e apoio nas análises metalográficas.

Ao Professor Dr. Hugo Marcelo Veit, pela orientação na execução desse trabalho.

À essa Universidade e, principalmente, aos Professores, pelo conhecimento, oportunidades e aprendizagens oferecidas.

Por fim, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização desse trabalho e também para o meu crescimento pessoal e profissional.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>8</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 AÇO PARA A PRODUÇÃO DE ARAMES</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2 O PROCESSO SIDERÚRGICO</b> .....	<b>14</b>
<b>3.3 CONSTITUINTES DO AÇO</b> .....	<b>17</b>
3.3.1 INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS.....	19
<b>3.4 MECANISMOS DE AUMENTO DE RESISTÊNCIA</b> .....	<b>21</b>
<b>3.5 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO</b>	<b>22</b>
3.5.1 CARBONO.....	23
3.5.2 MANGANÊS.....	24
3.5.3 SILÍCIO.....	25
3.5.4 ENXOFRE.....	25
3.5.5 NITROGÊNIO.....	25
<b>3.6 PRODUÇÃO DO AÇO EM USINA SEMI-INTEGRADA (FORNOS ELÉTRICOS DE FUSÃO)</b>	<b>26</b>
3.6.1 <i>Matéria-prima para produção do aço</i> .....	26
3.6.2 <i>Desoxidação e Dessulfuração</i> .....	27
3.6.3 <i>O Processo Produtivo em Forno Elétrico de Fusão</i> .....	27
<b>3.7 PROCESSO DE LAMINAÇÃO</b> .....	<b>28</b>
<b>3.8 PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE ARAMES</b> .....	<b>30</b>
<b>3.9 RECOZIMENTO SUBCRÍTICO</b> .....	<b>34</b>
<b>3.10 GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE</b> .....	<b>38</b>
<b>4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1 ESCOLHA DO ARAME</b> .....	<b>40</b>
<b>4.2 PRODUÇÃO DO ARAME TREFILADO</b> .....	<b>41</b>
4.2.1 <i>Definição da Composição Química</i> .....	41
4.2.2 <i>Produção do Aço 1005X</i> .....	41
4.2.3 <i>Laminação e Trefilação</i> .....	42
<b>4.3 LINHA DE GALVANIZAÇÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO</b> .....	<b>44</b>
<b>4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL</b> .....	<b>44</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
<b>5.1 ARAME GALVANIZADO BWG 12 PRODUZIDO COM AÇO 1005F</b> .....	<b>46</b>
<b>5.2 ARAME GALVANIZADO BWG 12 PRODUZIDO COM AÇO 1005X</b> .....	<b>47</b>
<b>5.3 RELAÇÃO ENTRE COMPOSIÇÃO QUÍMICA E LIMITE DE RESISTÊNCIA</b> .....	<b>48</b>
5.3.1 <i>Aço 1005F</i> .....	48

5.3.2	Aço 1005X.....	53
<b>5.4</b>	<b>ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....</b>	<b>58</b>
5.4.1	ANÁLISE DE INCLUSÕES.....	58
5.4.1.1	AÇO 1005F.....	58
5.4.1.2	AÇO 1005X.....	61
5.4.1.3	COMPARAÇÃO ENTRE AÇO 1005F E AÇO 1005X .....	62
5.4.2	EFEITO DO ENCRUAMENTO .....	63
5.4.2.1	AÇO 1005F.....	64
5.4.2.2	AÇO 1005X.....	65
5.4.2.3	COMPARAÇÃO ENTRE AÇO 1005F E AÇO 1005X .....	66
5.4.3	EFEITO DO RECOZIMENTO SUBCRÍTICO.....	67
5.4.3.1	AÇO 1005F.....	67
5.4.3.2	AÇO 1005X.....	70
5.4.3.3	COMPARAÇÃO ENTRE AÇO 1005F E AÇO 1005X .....	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma simplificado do processo siderúrgico.....	15
Figura 2. Chapas grossas, produto plano típico.....	16
Figura 3. Perfil I laminado a quente.....	16
Figura 4. Fio-máquina obtido por laminação a quente.....	16
Figura 5. Arame galvanizado obtido por trefilação.....	17
Figura 6. Efeito da plasticidade relativa da inclusão sobre sua deformação em relação ao aço.....	20
Figura 7. Classificação para avaliação micrográfica das inclusões dos aços adotada pela Associação dos Siderúrgicos Suecos.....	21
Figura 8. Influência do teor de carbono sobre as propriedades de aços-carbono esfriados lentamente.....	24
Figura 9. Desenho esquemático da produção do aço em aciaria elétrica com lingotamento contínuo.....	28
Figura 10. Ilustração do processo de laminação.....	29
Figura 11. Deformações acima e abaixo da zona crítica.....	30
Figura 12. Esquema de uma máquina de trefilar contendo duas fieiras.....	31
Figura 13. Representação das regiões da fieira: cone de entrada (a), cone de trabalho (b), cilindro de calibração (c) e cone de saída (d).....	32
Figura 14. Fieiras utilizadas para produzir materiais com diferentes tipos de seções.....	32
Figura 15. Sequência de operações anteriores à trefilação.....	33
Figura 16. Comparação do diagrama tensão-deformação para um aço encruado e outro recozido.....	34
Figura 17. Efeito do recozimento pleno em diferentes estruturas.....	35
Figura 18. Efeito da temperatura do tratamento térmico de recozimento subcrítico sobre as alterações estruturais de aço trabalhado a frio.....	36
Figura 19. Diagrama de equilíbrio Fe-C mostrando as faixas para recozimento subcrítico.....	37
Figura 20. Efeito do tempo e temperatura de recozimento sobre a dureza de um aço de baixo carbono submetido à redução de 84%, por laminação a frio.....	38
Figura 21. Processo contínuo em uma linha de galvanização por imersão a quente.....	39
Figura 22. Fluxograma dos processos envolvidos na produção do arame galvanizado.....	40
Figura 23. Etapas do processo de lixamento.....	45
Figura 24. Limite de resistência de amostras do arame galvanizado BWG12 produzido com aço 1005F, no período de 01 de julho de 2017 a 30 de abril de 2018.....	47
Figura 25. Relação entre carbono e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005F.....	50
Figura 26. Relação entre manganês e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005F.....	50
Figura 27. Relação entre silício e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005F.....	51
Figura 28. Relação entre enxofre e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005F.....	51
Figura 29. Relação entre nitrogênio e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005F.....	52
Figura 30. Relação entre residuais e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005F.....	52
Figura 31. Relação entre carbono e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X a 65 m/min.....	55
Figura 32. Relação entre manganês e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X a 65 m/min.....	55
Figura 33. Relação entre silício e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X a 65 m/min.....	56
Figura 34. Relação entre enxofre e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X a 65 m/min.....	56
Figura 35. Relação entre nitrogênio e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X a 65 m/min.....	57
Figura 36. Relação entre residuais e limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X a 65 m/min.....	57
Figura 37. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção longitudinal produzida com aço 1005F, evidenciando a presença de inclusões. Aumento de 100x. Sem ataque.....	59
Figura 38. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção transversal produzida com aço 1005F, evidenciando a presença de inclusões. Aumento de 100x. Sem ataque.....	59
Figura 39. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção longitudinal produzida com aço 1005F, evidenciando a presença de inclusões alongadas em região específica. Aumento de 100x. Sem ataque.....	60

Figura 40. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção transversal produzida com aço 1005F, evidenciando a aglomeração das inclusões em região específica. Aumento de 100x. Sem ataque. ...	60
Figura 41. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção longitudinal produzida com aço 1005X, evidenciando a presença de inclusões. Aumento de 100x. Sem ataque. ....	61
Figura 42. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção transversal produzida com aço 1005X, evidenciando a presença de inclusões. Aumento de 100x. Sem ataque. ....	62
Figura 43. Micrografias (MO) das amostras trefiladas de seção longitudinal produzidas com aço 1005F (a) e com aço 1005X (b). Aumento de 100x. Sem ataque.....	63
Figura 44. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção longitudinal produzida com aço 1005F, evidenciando os grãos alongados no sentido da deformação a frio (trefilação). Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	64
Figura 45. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção longitudinal produzida com aço 1005F, evidenciando os grãos alongados no sentido da deformação a frio (trefilação). Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	64
Figura 46. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção longitudinal produzida com aço 1005X, evidenciando os grãos alongados no sentido da deformação a frio (trefilação). Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	65
Figura 47. Micrografia (MO) da amostra trefilada de seção longitudinal produzida com aço 1005X, evidenciando os grãos alongados no sentido da deformação a frio (trefilação). Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	65
Figura 48. Micrografias (MO) das amostras trefiladas de seção longitudinal produzidas com aço 1005F (a) e com aço 1005X (b). Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	66
Figura 49. Micrografias (MO) das amostras trefiladas de seção transversal produzidas com aço 1005F (a) e com aço 1005X (b). Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	66
Figura 50. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção longitudinal produzida com aço 1005F a 65 m/min. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	67
Figura 51. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção longitudinal produzida com aço 1005F a 65 m/min. Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	68
Figura 52. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção transversal produzida com aço 1005F a 65 m/min. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	68
Figura 53. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção transversal produzida com aço 1005F a 65 m/min. Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	69
Figura 54. Micrografias (MO) da amostra trefilada (a) e da amostra galvanizada a 65 m/min (b) de seções longitudinais produzidas com aço 1005F. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	69
Figura 55. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção longitudinal produzida com aço 1005X a 65 m/min. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	70
Figura 56. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção longitudinal produzida com aço 1005X a 65 m/min. Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	70
Figura 57. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção transversal produzida com aço 1005X a 65 m/min. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	71
Figura 58. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção transversal produzida com aço 1005X a 65 m/min. Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	71
Figura 59. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção longitudinal produzida com aço 1005X a 50 m/min. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	72
Figura 60. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção longitudinal produzida com aço 1005X a 50 m/min. Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	72
Figura 61. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção transversal produzida com aço 1005X a 50 m/min. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	73
Figura 62. Micrografia (MO) da amostra galvanizada de seção transversal produzida com aço 1005X a 50 m/min. Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	73
Figura 63. Micrografias (MO) da amostra trefilada (a) e da amostra galvanizada a 65 m/min (b) de seções longitudinais produzidas com aço 1005X. Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	74
Figura 64. Micrografias (MO) das amostras galvanizadas de seção longitudinal produzidas com aço 1005X a 65 m/min (a) e a 50 m/min (b). Aumento de 500x. Ataque: Nital 2%. ....	75
Figura 65. Micrografias (MO) das amostras galvanizadas a 65 m/min de seção longitudinal produzidas com aço 1005F (a) e com aço 1005X (b). Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	75
Figura 66. Micrografias (MO) das amostras galvanizadas a 65 m/min de seção transversal produzidas com aço 1005F (a) e com aço 1005X (b). Aumento de 200x. Ataque: Nital 2%. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação de arames.....	13
Tabela 2. Classificação dos produtos siderúrgicos.....	15
Tabela 3. Propriedades mecânicas dos microconstituintes dos aços.....	18
Tabela 4. Composições químicas das amostras produzidas com aço 1005F, obtidas por Espectrometria de Emissão Óptica.....	46
Tabela 5. Composições químicas das amostras produzidas com aço 1005X, obtidas por Espectrometria de Emissão Óptica.....	48
Tabela 6. Limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005F, galvanizadas a uma velocidade de 65 m/min.....	49
Tabela 7. Limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X, galvanizadas a 65 m/min.....	53
Tabela 8. Limite de resistência das amostras produzidas com aço 1005X, galvanizadas a 65, 55 e 50 m/min.....	53



## RESUMO

A redução de custos nos processos siderúrgicos se faz necessária para que as empresas se mantenham competitivas e tenham maior lucratividade. Devido a isso, esse trabalho teve como motivação reduzir custos com a matéria-prima utilizada na produção do arame galvanizado BWG 12. Com esse intuito, desenvolveu-se um aço com baixo teor de carbono produzido em aciaria elétrica de uma usina semi-integrada, a fim de substituir o aço utilizado atualmente, produzido em usina integrada. Para tanto, foram realizados diferentes testes de composição química produzindo o aço a partir de sucata metálica em forno elétrico a arco (FEA). Os tarugos produzidos no lingotamento contínuo foram laminados a quente obtendo-se o fio-máquina. Esse foi trefilado, produzindo os arames que posteriormente foram recozidos e galvanizados. Além da composição química, variou-se a velocidade de galvanização a fim de avaliar a influência do tempo de recozimento no limite de resistência do material. As amostras produzidas foram ensaiadas mecanicamente realizando-se ensaio de tração e tiveram suas microestruturas analisadas utilizando microscopia óptica. De acordo com os resultados obtidos, o aço em desenvolvimento atende às propriedades mecânicas exigidas reduzindo-se a velocidade de galvanização de 65 m/min (padrão) para 50 m/min. Não foi possível relacionar a influência dos elementos presentes na composição química isolados com o limite de resistência do arame galvanizado. O recozimento subcrítico realizado foi satisfatório para recristalizar os grãos de ferrita e eliminar o efeito do encrimento do processo de trefilação.

**Palavras-chave:** arame de aço, redução de custo, aciaria elétrica, limite de resistência.

## 1 INTRODUÇÃO

O atual cenário dos processos siderúrgicos exige que as empresas desse ramo sejam competitivas, sendo a redução de custos com matéria-prima, equipamentos e eliminação de perdas ou retrabalhos, fatores essenciais para tal posicionamento.

As indústrias siderúrgicas, desde o início da década de 90, têm buscado alternativas para reduzir custos em geral. Para tanto, faz-se necessário uma reestruturação de seus processos e modelos de operação (1, 2).

Para reestruturar os processos utilizados na obtenção de determinada matéria-prima, principalmente com o intuito de reduzir custos, é necessário conhecer a aplicação do material a ser produzido para que se tenha uma composição química compatível com as necessidades. Dessa forma é possível garantir que o material desempenhará corretamente as funções desejadas, não havendo falhas durante sua utilização (3).

A produção de arames galvanizados exige especificações de propriedades mecânicas que, atualmente, são conseguidas apenas utilizando-se aços produzidos em usinas integradas, que têm como base para a sua produção a utilização de minério de ferro como matéria-prima. Aliando-se a esse fator as condições de processo em que se tem em usinas integradas, é possível garantir a produção do aço com baixo teor de carbono e de residuais, fazendo com que as propriedades mecânicas desejadas sejam obtidas (1).

Porém, grande parte das usinas integradas brasileiras estão situadas no estado de Minas Gerais, o que aumenta o custo de matéria-prima para usinas situadas nos demais estados e que dependem da utilização desse material para a fabricação dos seus produtos.

As usinas semi-integradas, conhecidas também como *mini-mills*, operam com aciarias elétricas e utilizam sucata como principal matéria-prima, contribuindo com a sustentabilidade ambiental, pois minimiza o gasto energético e aumenta a disponibilidade dos recursos naturais (1, 2). Além disso, as aciarias com fornos elétricos a arco têm aprimorado suas tecnologias para minimizar inclusões, homogeneizar o aço e descarburá-lo até teores de ppm, produzindo um aço com qualidades competitivas e de alto nível de limpeza (1).

Com o intuito de atender às exigências de mercado em relação ao aumento de produtividade e redução de custos, percebeu-se a necessidade de reduzir os custos de emprego de uma usina semi-integrada, associados à matéria-prima utilizada na produção de arames galvanizados vinda de usinas integradas. Dessa forma, além de reduzir os custos de emprego, é possível ter ganhos relacionados ao aumento de produtividade da aciaria elétrica envolvida nesse trabalho. Atualmente, a produção do arame galvanizado BWG 12 na usina semi-integrada que foi o foco desse estudo, ocorre a partir da laminação a quente dos tarugos do aço denominado 1005F, que são transferidos de uma usina integrada localizada em Minas Gerais. Para a realização desse estudo, todas as etapas foram realizadas na usina semi-integrada, desde a produção do aço (solidificados no lingotamento contínuo na forma de tarugos) até a galvanização do arame BWG 12.

Assim, os demais processos envolvidos na produção do arame galvanizado em estudo, como laminação, trefilação, recozimento e galvanização, não possuem ganhos relacionados ao aumento de produtividade, visto que a matéria-prima vinda de usina integrada é recebida na forma de tarugos, mantendo-se inalterados os processos após a obtenção do aço no lingotamento contínuo.

Para tanto, esse estudo desenvolveu um aço denominado 1005X produzido a partir de sucata metálica em aciaria elétrica a fim de substituir o aço 1005F utilizado para a produção do arame galvanizado BWG 12 que é obtido em usina integrada, obtendo-se propriedades mecânicas que atendam às especificações do produto definidas internamente, à Norma ABNT NBR 6331:2010 (14) e que sejam semelhantes às propriedades já obtidas atualmente.

Nos próximos capítulos deste trabalho estão descritos o processo de obtenção do aço em aciaria elétrica e os subsequentes processos utilizados para a produção dos arames galvanizados, além dos fatores que influenciam o limite de resistência dos arames de aço, como composição química, conformação mecânica e tratamentos térmicos. Além disso, estão descritas a discussão e as considerações finais que contribuem e esclarecem o trabalho realizado nessa pesquisa.