

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MECÂNICA

Leonardo Henrique Diniz do Carmo

Estudo de caso sobre a soldabilidade do ferro fundido cinzento

Betim
2025

LEONARDO HENRIQUE DINIZ DO CARMO

Estudo de caso sobre a soldabilidade do ferro fundido cinzento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Betim

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

C287e Carmo, Leonardo Henrique Diniz do

Estudo de caso sobre a soldabilidade do ferro fundido cinzento /
Leonardo Henrique Diniz do Carmo. – 2025.

63 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas
Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

1. Ferro fundido. 2. Ensaios mecânicos. 3. Processos de soldagem.
4. Metalografia . 5. Engenharia Mecânica. I. Carmo, Leonardo Henrique
Diniz do. II. Título.

CDU: 621.791



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Rua Itamarati, 140 - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135325921 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 06 dias do mês de maio do ano de 2025, às 18h00, por videoconferência, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho e demais membros, Ismael Melo Rabelo de Melo e Mateus Codognotto Cunha. Nesta ocasião o discente Leonardo Henrique Diniz do Carmo do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0016247 do IFMG – Campus Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Estudo de Caso Sobre a Soldabilidade do Ferro Fundido Cinzento” e foi APROVADO, com 70 (setenta) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 30 dias úteis, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às 19h30. Para constar, eu, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Documento assinado digitalmente

gov.br

GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO

Data: 12/06/2025 15:02:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho
IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente

gov.br

ISMAEL NOGUEIRA RABELO DE MELO

Data: 13/06/2025 15:05:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Msc. Ismael Melo Rabelo de Melo
IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente

gov.br

MATEUS CODOGNOTTO CUNHA

Data: 13/06/2025 08:01:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Msc. Mateus Codognotto Cunha
IEC PUC-MG

Betim, 09 de junho de 2025.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a mim, pelo meu esforço, determinação e dedicação, que tornaram esta conquista uma realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar força e perseverança para seguir em frente, mesmo diante dos desafios. Aos meus professores, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, contribuindo para o meu crescimento acadêmico e profissional. À minha família, pelo incentivo constante, especialmente nos momentos mais difíceis. Sem vocês, essa conquista não teria o mesmo significado. Aos meus colegas e amigos, que estiveram presentes nessa caminhada, compartilhando desafios, aprendizados e conquistas. A troca de conhecimentos e o apoio mútuo fizeram toda a diferença.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

A soldabilidade do ferro fundido cinzento apresenta desafios devido à sua alta concentração de carbono e microestrutura frágil, o que pode resultar em trincas e porosidades durante a soldagem. Este estudo analisa diferentes técnicas de soldagem aplicadas a esse material, considerando variáveis como tipo de eletrodo, temperatura de pré-aquecimento e resfriamento controlado. Ensaios não destrutivos e metalográficos foram aplicados para avaliar a integridade das juntas soldadas. Os resultados demonstraram que a escolha adequada dos parâmetros de soldagem e do material de adição pode minimizar defeitos estruturais e melhorar a resistência mecânica do material. Dessa forma, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e economicamente viáveis para a aplicação da soldagem em ferro fundido cinzento, reduzindo desperdícios e ampliando seu uso na indústria.

Palavras-chave: Soldabilidade, ferro fundido cinzento, ensaios metalográficos, processos de soldagem, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The weldability of gray cast iron presents challenges due to its high carbon concentration and brittle microstructure, which can lead to cracks and porosity during welding. This study analyzes different welding techniques applied to this material, considering variables such as electrode type, preheating temperature, and controlled cooling. Non-destructive and metallographic tests were applied to evaluate the integrity of the welded joints. The results demonstrated that the proper selection of welding parameters and filler materials can minimize structural defects and improve the mechanical strength of the material. Thus, the research contributes to the development of sustainable and economically viable solutions for the application of welding in gray cast iron, reducing waste and expanding its industrial use.

Keywords: Weldability, gray cast iron, metallographic tests, welding processes, mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema de soldagem por eletrodo revestido	16
Figura 2. Conjunto oxiacetilênico	18
Figura 3. Tipos de chama do oxiacetileno	18
Figura 4. Microestrutura do ferro fundido cinzento.	20
Figura 5. Microestrutura do ferro fundido branco.....	22
Figura 6. Microestrutura do ferro fundido maleável.	23
Figura 7. Microestrutura do ferro fundido nodular.....	24
Figura 8. Operação de chanfro com eletrodos.....	28
Figura 9. Vareta para soldagem oxiacetilênica	29
Figura 10. Esquema de teste de soldabilidade	31
Figura 11. Fluxograma esquemático do procedimento experimental	35
Figura 12.Preparação do disco	36
Figura 13.Disco em processo de limpeza	37
Figura 14.Inversora regulada em 85A e soldagem em processo	39
Figura 15.Martelamento do cordão e escovamento.....	40
Figura 16.Medição de temperatura	40
Figura 17.Limpeza da superfície e 2º cordão de solda	41
Figura 18.Limpeza com escova de aço	41
Figura 19.Removedor E59 e Líquido penetrante VP30	43
Figura 20.Revelador D70 e Temperatura pós soldagem.....	43
Figura 21.Temperatura pós soldagem e limpeza para o END de LP	44
Figura 22.– LP aplicado e Pisseta utilizada	44
Figura 23.Remoção do LP e secagem da peça.....	45
Figura 24.Aplicação do revelador D70 e Peça para realizar análise	45
Figura 25.Peça pronta para análise	46
Figura 26. Politriz lixadeira metalográfica – PL02E e Microscópio ótico	47
Figura 27. Amostra 3A após ataque nital 2% e Amostra 5B após ataque nital 2%.....	48
Figura 28.Descontinuidades encontradas no cordão B	49
Figura 29.Descontinuidades encontradas no cordão A	50
Figura 30.Descontinuidade encontrada no ensaio por LP do cordão B	51
Figura 31.Descontinuidade encontrada no ensaio por LP do cordão A	52
Figura 32. Lamelas do ferro fundido cinzento – aumento de 100x – amostra 5B	53
Figura 33. Transição de zonas da amostra – aumento de 100x – amostra 3A	53
Figura 34. Transição de zonas da amostra – aumento de 100x – amostra 3A	54
Figura 35. Transição de zonas da amostra – aumento de 100x – amostra 5B	55
Figura 36. Transição de zonas da amostra – aumento de 400x – amostra 3A	56
Figura 37. Transição de zonas da amostra – aumento de 400x – amostra 5B	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do ferro fundido cinzento:.....	21
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem aplicados com eletrodo E-Ni CI	37
Tabela 3 - Requisitos de composição química para metal de solda não diluído para eletrodos revestidos e com núcleo fluxado de soldagem a arco elétrico	38
Tabela 4. Composição química do ferro fundido cinzento do disco de freio	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

NBR - Normas Técnicas Brasileiras

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

OXI – Soldagem Oxiacetilênica

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ASTM – American Society for Testing and Materials

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.3	Objetivos específicos.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Processos de soldagem	15
2.1.1	Soldagem a arco com eletrodo revestido -SMAW	15
2.1.1.1	Definição	15
2.1.1.2	Fundamentos do processo	16
2.1.1.3	Características.....	16
2.1.1.4	Limpeza e preparação das juntas.....	17
2.1.2	Soldagem Oxiacetilênica	17
2.1.2.1	Definição	17
2.1.2.2	Fundamentos do processo	17
2.1.2.3	Tipos de chama	18
2.2	Conceito de Ferro Fundido.....	19
2.3	Elementos básicos do Ferro Fundido	19
2.3.1	Causa e efeito dos elementos que compõe as ligas de ferro fundido	19
2.4	Tipos de ferro fundidos	20
2.4.1	Ferro fundido cinzento.....	20
2.4.2	Ferro fundido ligado cinzento	21
2.4.3	Ferro fundido branco	22
2.4.4	Ferro fundido maleável.....	23
2.4.5	Ferro fundido nodular	23
2.5	Procedimento de soldagem.....	24
2.5.1.1	Aspectos físicos.....	25
2.5.2	Procedimento de soldagem para ferros fundidos	26
2.5.3	Soldagem a quente – oxiacetileno.....	26
2.5.3.1	Procedimento de soldagem.....	26
2.5.3.1.1	Limpeza e preparação da peça	26
2.5.3.1.2	Identificação do metal de base	27
2.5.3.1.3	Preparação do chanfro	28

2.5.3.1.4	Pré-aquecimento	28
2.5.3.1.5	Operação de soldagem	29
2.5.3.1.6	Pós aquecimento – alívio de tensões	29
2.5.3.1.7	Resfriamento lento	30
2.5.4	Soldagem a meio quente – processo arco elétrico	30
2.5.4.1	Procedimento de soldagem	30
2.5.4.2	Recomendações	31
2.5.4.3	Pós-aquecimento	31
2.5.5	Soldagem à frio – arco elétrico	32
2.5.5.1	Procedimento de soldagem	32
2.5.5.2	Técnica de soldagem a frio	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Materiais	34
3.2	Equipamentos	34
3.2.1	Equipamentos de soldagem	34
3.2.2	Equipamento auxiliares	34
3.2.3	Equipamento de medição	34
3.3	Métodos	35
3.3.1	Procedimento experimental	35
3.3.1.1	Preparação e limpeza da peça	35
3.3.1.2	Processo de soldagem	37
3.3.1.3	Ensaio e testes	41
3.3.1.3.1	Ensaio não destrutivo (END)	42
3.3.1.3.2	Visual de soldagem	42
3.3.1.3.3	Líquido penetrante	42
3.3.1.3.4	Ensaio metalográfico:	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Ensaio Visual de solda	49
4.1.1	Cordão de solda B	49
4.1.2	Cordão de solda A	49
4.2	Ensaio por líquido penetrante	50
4.2.1	Cordão B	50
4.2.2	Cordão A	51
4.3	Ensaio metalográfico	52

4.3.1	Imagens antes do ataque de Nital 2%.....	52
4.3.2	Imagens após ataque de Nital 2%.....	54
5	CONCLUSÃO.....	57
6	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos são ligas ferrosas com teor de carbono acima de 2,14%, onde a grafita se encontra geralmente na forma de flocos em uma matriz de ferrita alfa ou perlita (CALLISTER, 2007).

Analisando as características mecânicas, o ferro fundido cinzento é pouco resistente e frágil em tração, consequência da sua microestrutura. Porém outras características são amplamente positivas, como por exemplo, grande eficiência no amortecimento de energia vibracional e exibem uma elevada resistência ao desgaste. Outro ponto positivo é que em seu estado fundido, eles têm alta fluidez na temperatura de fundição, o que permite a fundição de peças complexas, e a contração do fundido é baixa (PRISCO, 2001).

O ferro fundido cinzento é utilizado na indústria de forma significativa, como por exemplo na indústria automotiva: fabricação de discos de freios, blocos e cabeçotes de motores; na indústria de construção: fabricação grades, tampas de bueiros e componentes de drenagem; indústria de máquinas e ferramentas: bases de máquinas e ferramentas, engrenagens e mancais.

A soldagem do ferro fundido e suas ligas, teve um avanço tecnológico no Brasil a partir da década de 60, sendo uma época que já tínhamos de material de adição de qualidade que garantia a performance de um ferro fundido com solda. Uma barreira na época era que, muitos achavam que soldar ferro fundido com “níquel”, era um processo de colagem, não havendo interação metalúrgica entre o metal de base e o metal de adição (PRISCO, 2001).

O estudo tem por finalidade avaliar a soldabilidade do ferro fundido cinzento.

1.1 Justificativa

A soldabilidade de ferro fundido cinzento é um tema de relevância, devido às suas propriedades singulares e aos desafios técnicos associados desde a fabricação ao reparo. Este material é utilizado em diversos setores, como de máquinas industriais, construção civil e automotivo e possui características mecânicas que tornam sua soldagem complexa, por sua estrutura metalúrgica e sua tendência em formar defeitos como poros e trincas.

É essencial compreender os fatores que influenciam a soldabilidade do ferro fundido cinzento para desenvolver métodos mais eficazes e economicamente viáveis de reparação e união desse material, visando promover a sustentabilidade, redução de desperdícios bem como aumentar a vida útil de componentes.

Por fim, o estudo da soldabilidade de ferro fundido cinzento se faz necessário pela busca em ultrapassar as barreiras técnicas, para garantir os requisitos econômicos e ambientais exigidos constantemente pela sociedade.

1.2 Objetivos

Avaliar a soldabilidade de ferro fundido cinzento, garantindo as características mecânicas mínimas exigidas do material, como por exemplo, amortecimento de energia vibracional e alta resistência ao desgaste.

1.3 Objetivos específicos

Analisar as propriedades metalúrgicas do ferro fundido cinzento que influenciam diretamente sua soldabilidade, como a microestrutura, composição química e comportamento térmico.

Identificar os principais desafios e limitações associados aos processos de soldagem do ferro fundido cinzento, como trincas, porosidades e tensões residuais.

Avaliar as técnicas de soldagem mais adequadas, considerando métodos como soldagem a arco elétrico e soldagem a gás.

Investigar os parâmetros de soldagem que podem otimizar os resultados, como temperatura de pré-aquecimento, taxa de resfriamento e escolha de consumíveis.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A soldagem é definida como um processo de união de duas partes metálicas por meio de uma fonte de calor, podendo ou não haver aplicação de pressão (BRANDI, 2005, p. 45).

Os processos de soldagem são amplamente utilizados em nossa sociedade, seja para fabricação de produtos e maquinários, veículos automotores, tubulações de transporte de água, produtos químicos, gases; itens domésticos, manutenções em geral etc. Segundo Houldcroft, os processos de soldagem devem atender os seguintes requisitos:

- Gerar uma quantidade de energia suficiente para unir dois materiais, similares ou não;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- Garantir um controle de transformação de fase, buscando as propriedades desejadas.
- Cada processo de soldagem tem suas vantagens e limitações, a partir dessas características será definido o melhor processo para atender o cenário apresentado.

2.1 Processos de soldagem

Os processos mais usuais a serem utilizados para a soldagem de ferro fundido são de eletrodo revestido -SMAW (Shield Metal Arc Welding) e o oxiacetilênico - OFW (Oxyfuel Welding).

2.1.1 Soldagem a arco com eletrodo revestido -SMAW

2.1.1.1 Definição

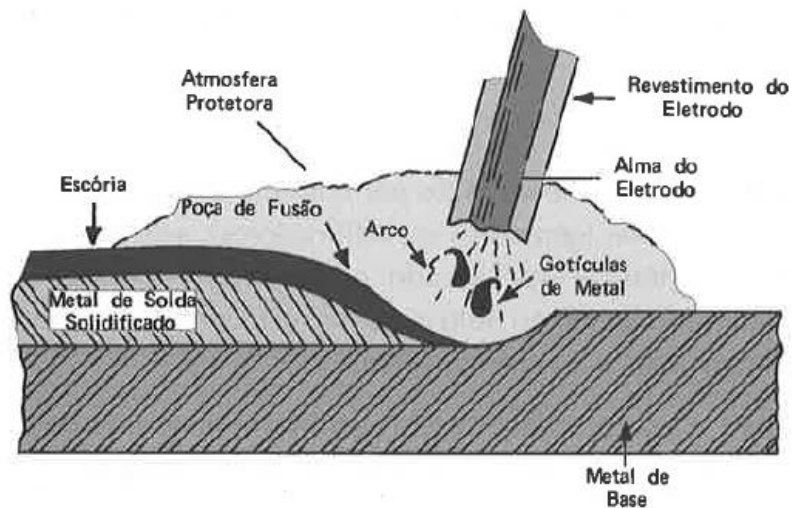
A soldagem a arco com eletrodo revestido é um processo que produz a união entre metais, pelo aquecimento e fusão destes com um arco elétrico entre a ponta do eletrodo revestido consumível e a superfície do metal de base (FBTS, 2001).

2.1.1.2 Fundamentos do processo

No processo, o metal fundido do eletrodo é transferido através do arco elétrico e se combina ao metal de base, também fundido na poça de fusão. Com a execução, ocorre a solidificação da poça, gerando o metal de solda.

Uma característica do processo é a geração de uma escória. A escória é formada a partir da reação química dos elementos presentes no revestimento do eletrodo bem como impurezas do metal de base, por ser menos densa, esta fica acima do metal líquido, protegendo a solda de contaminação atmosférica.

Figura 1. Esquema de soldagem por eletrodo revestido



Fonte: FBTS

2.1.1.3 Características

Para se ter êxito no processo de soldagem por eletrodo revestido, as diversas variáveis devem estar controladas, bem como:

- Compatibilidade entre os metais de bases a serem soldados;
- Especificações de consumíveis em conformidade com a peça;
- Corrente;
- Voltagem;
- Velocidade de soldagem;
- Técnica de deposição;
- Controle de temperatura;

- Taxa de deposição;
- Ângulo de soldagem.

O processo de soldagem por eletrodo revestido pode ser utilizado para soldar em todas as posições e em todos os tipos de juntas, proporciona a soldagem da maioria dos aços e alguns materiais não ferrosos como o alumínio, cobre, níquel e suas ligas. A faixa de espessura de peças a serem soldadas, varia de 2 a 200 mm, porém a taxa de deposição é pequena quando comparada a outros processos como por exemplo MIG/MAG (GMAW), variando de 1 a 5 kg/h.

2.1.1.4 Limpeza e preparação das juntas

Para ter êxito no processo de soldagem, a limpeza e preparação é essencial. As peças devem estar isentas de óleo, graxas, oxidações, tintas e outras contaminações, evitando o surgimento de descontinuidades/ defeitos.

2.1.2 Soldagem Oxiacetilênica

2.1.2.1 Definição

A soldagem oxiacetilênica, também conhecida como soldagem a gás é um processo que utiliza a combustão de oxigênio (O₂) e acetileno (C₂H₂) para gerar uma chama permitindo a união de peças metálicas.

2.1.2.2 Fundamentos do processo

O princípio de soldagem oxiacêtilênica ocorre quando os gases oxigênio e acetileno se misturam num maçarico e inflamados, gerando uma chama que pode atingir 3200 °C. Essa temperatura é suficiente para fundir a maioria dos metais, podendo ou não ser usado material de adição. Uma grande vantagem é não necessidade de corrente elétrica no processo, sendo uma boa opção para trabalhos em locais remotos.

Figura 2. Conjunto oxiacetilênico



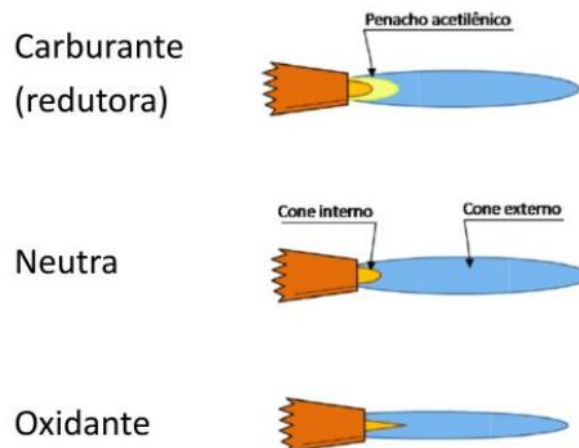
Fonte: Oxilapa (2025)

2.1.2.3 Tipos de chama

Possuem três regulagens de chamas, conforme proporção dos gases.

- Chama neutra _ mistura equilibrada de oxigênio e acetileno. Induz pouca oxidação e é ideal para soldagem de aço carbono e aço inoxidável.
- Chama oxidante – Mais oxigênio do que acetileno, produz uma solda dura e quebradiça, usada em metais como latão.
- Chama redutora – Mais acetileno do que oxigênio.

- Figura 3. Tipos de chama do oxiacetileno



Fonte: Prof Jorge Marques (2025)

2.2 Conceito de Ferro Fundido

“Ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita” (CHIAVERINI, 1990).

2.3 Elementos básicos do Ferro Fundido

Os elementos básicos que compõem as diversas classificações do ferro fundido são: o Ferro (Fe) e o carbono (C). O ferro é um elemento metálico, com ponto de fusão 1530 °C e aparência branca acinzentada. É um metal dúctil, maleável, magnético. Os minérios de ferro, fundidos em alto forno, produzem o “ferro gusa”, contendo de 3 a 5% de Carbono (C), além de Enxofre (S), Fósforo (P), Silício (Si) e Manganês (Mn). Na segunda fundição do ferro gusa, se originam os ferros fundidos industriais como a presença de 2,06 a 4,5 e com um percentual relevante de silício.

O tipo de resfriamento em que será submetido, o processo de fundição utilizado e a adição de outros elementos, como o Cério (Ce), Magnésio (Mg), Cromo (Cr), Níquel (Ni), cobre (Cu), e Molibdênio (Mo), podem ser produzidos outros tipos de ferro fundido, sem ser os mais convencionais como o ferro fundido cinzento e o ferro fundido branco. (PRISCO, 2001).

2.3.1 Causa e efeito dos elementos que compõe as ligas de ferro fundido

Fe - elemento básico;

C - Abaixa o ponto de fusão. A porcentagem de C, livre ou combinado (Fe_3C), e sua distribuição, determinam a usinabilidade e características mecânicas;

Si – Controla a solubilidade do C na microestrutura;

Mn – Desoxidante básico – Desulfurizante;

Cr – aumenta a resistência a corrosão e a dureza;

Ni – Aumenta a resistência à corrosão e a tenacidade e reduz o resfriamento;

Al – desoxidante e promove a grafitização;

Ce – promove a grafitização nodular;

Mg- - promove a grafitização nodular;

S – Impureza nos processos de soldagem, promove o endurecimento e a fragilidade;
Cu – É um agente grafitizante, refina a Perlita, aumenta a resistência à corrosão atmosférica e a resistência à tração, bem como o aumento da dureza;
Mo – refina a formação perlítica, aumentando a resistência à tração, à fadiga, altas temperaturas e ao impacto.

2.4 Tipos de ferro fundidos

2.4.1 Ferro fundido cinzento

Este tipo de ferro fundido contém um teor de Silício superior a 1,5%, obrigando o carbono a se espalhar como finas lamelas pela estrutura. Por isso, uma fratura apresenta-se com uma cor acinzentada, caracterizando o seu tipo.

Figura 4. Microestrutura do ferro fundido cinzento.



Fonte: Chiaverini (1996, p. 480)

O ferro fundido cinzento é o mais usual e utilizado na indústria, como em blocos de motores, carcaças de máquinas industriais, tampas etc., por ser de fácil moldagem e econômico em relação aos outros ferros fundidos. Suas características são: fácil fusão e moldagem; boa resistência mecânica; excelente usinabilidade; boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento.

A capacidade de amortecimento é uma habilidade de um metal absorver vibrações, resultantes de tensões cíclicas, por fricção, transformando energia mecânica em calor. A elevada capacidade de amortecimento do ferro fundido

cinzento, em comparação aos aços comuns, deve-se à presença de lamelas de grafita, que geram espaços vazios na estrutura, facilitando a dissipação de energia por deformação plástica, permitindo uma deformação plástica do material ao entorno das lamelas.

A usinabilidade é a capacidade do material passar pelo processo de usinagem. A excelente usinabilidade do ferro fundido cinzento é influenciada pelas lamelas de grafita, que atua como lubrificante natural e garante a quebra de cavacos, facilitando a usinagem e gerando um bom acabamento superficial (CHIAVERINI, 1996; COLPAERT, 2006).

Tabela 1 - Composição química do ferro fundido cinzento:

Elemento	Porcentagem (%)
C	2,5 a 3,5
Mn	0,6 a 1,2
Fe	Predominante
Si	1,5 a 2,4
P	0,25

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1996).

2.4.2 Ferro fundido ligado cinzento

O ferro fundido cinzento é o mais utilizado na indústria, mas ainda sim suas aplicações são limitadas em consequência da sua baixa resistência a tração, ao calor e ao desgaste. Para melhorar essas características, são adicionados elementos de liga com funções e aplicações específicas. Podem ser adicionados elementos químicos como o níquel, cromo, molibdênio entre outros.

A adição de até 4% de níquel na microestrutura, causa uniformidade do grão, maior dureza e maior resistência em peças de grandes espessuras ou complexas. O níquel pode ser adicionado juntamente como o cromo e molibdênio, melhorando a usinabilidade, a textura, a dureza, a densidade e a resistência ao desgaste, ao calor e à corrosão.

O cromo adicionado entre 0,4 a 1%, aumenta a dureza e a resistência ao desgaste. O uso de cromo em peças com espessuras maiores, forma uma estrutura mais uniforme e tende a eliminar porosidades. Os ferros fundidos cinzentos ligados,

compostos por níquel-cromo tem relação de 2,5% para 1%. São adicionados juntos para refinar a estrutura e reforçar a estrutura sem diminuir a usinabilidade.

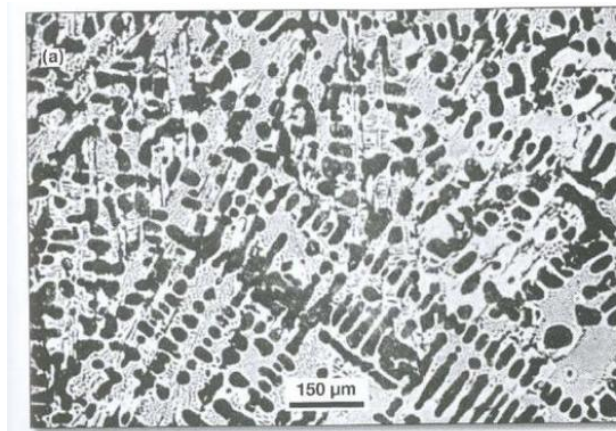
O molibdênio é adicionado entre 0,25 e 1,25%, com o propósito de aumentar a resistência a tração, resistência transversal e dureza.

Vale ressaltar que a adição de outros elementos torna o processo de obtenção mais caro.

2.4.3 Ferro fundido branco

O ferro fundido branco é reconhecido pela sua fratura se apresentar de forma branca prateada, por causa da participação do carbono em forma de cementita (Fe_3C). O baixo teor de Si (menor que 0,8%) e o seu resfriamento lento, impedem a formação do grafite livre, tornando o ferro fundido branco com dureza elevada e quebradiço.

Figura 5. Microestrutura do ferro fundido branco.

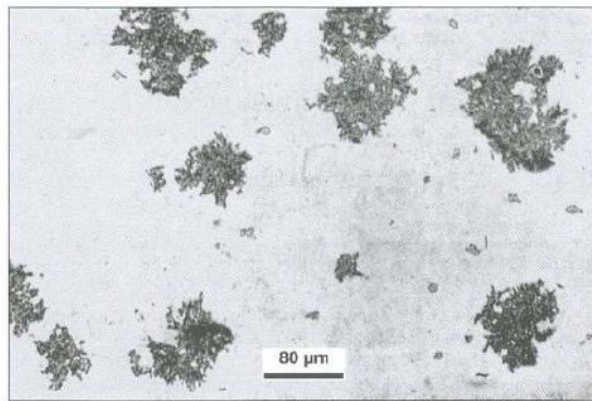


Fonte: Colpaerte, (2008, p.561)

2.4.4 Ferro fundido maleável

É o ferro fundido gerado pelo tratamento térmico de recozimento do ferro fundido branco, com composição química definida com as seguintes características mecânicas: ductilidade, tenacidade com boas propriedades de resistência a tração, dureza, resistência a fadiga, ao desgaste e boa usinabilidade.

Figura 6. Microestrutura do ferro fundido maleável.

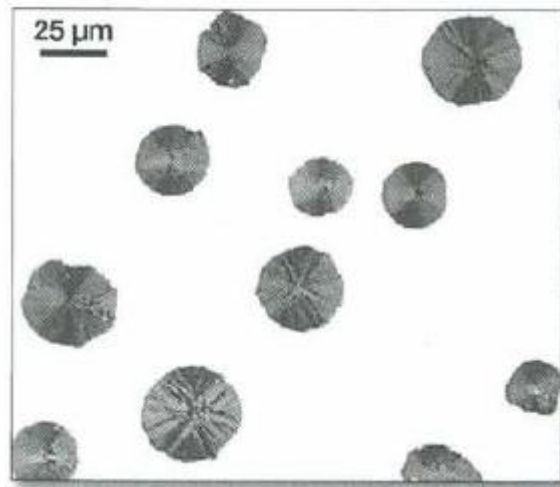


Fonte: Colpaert (2008, p. 614)

2.4.5 Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular apresenta grafita em forma de bolinhas ou esferas, diferente da forma de agulhas como apresenta no ferro fundido cinzento. A grafita no formato de esferoides, dá a este metal alta ductilidade e alongamento. As fábricas de equipamentos agrícola, equipamentos pesados e de máquinas operatrizes, estão trocando as fundições de ferro fundido cinzento por fundições de ferro fundido nodular.

Figura 7. Microestrutura do ferro fundido nodular.



Fonte: Colpaert (2008, p.597)

2.5 Procedimento de soldagem

A soldagem do ferro fundido historicamente foi considerada desafiadora devido à sua estrutura metalúrgica, alta fragilidade e possibilidade de formação de trincas. Quando comparada à soldagem de aços, há dificuldades adicionais relacionadas à absorção de carbono e formação de martensita na ZTA (SILVA et al., 2018), porém quando se entende suas peculiaridades e características, esse grau de dificuldade pode ser diminuído consideravelmente.

Por que os ferros fundidos são difíceis de serem soldados? Por causa de dois motivos: o alto teor de carbono e a baixa ductilidade. A difusão do carbono das grafitas, ocasionada no processo de soldagem podem gerar:

A formação de martensita na ZTA (zona termicamente afetada) e no metal de solda, gerada pelo aquecimento do material na região austenítica e o rápido resfriamento, uma característica comum dos processos de soldagem (BRACARENSE et al., 2015).

O surgimento destas estruturas é tendencioso sempre que um ferro fundido é soldado, porém o quantitativo de martensita e carbonetos depende da composição química do metal de solda e do ciclo térmico no processo de soldagem. A melhoria destas variáveis, proporcionará uma melhor soldabilidade dos ferros fundidos.

A formação de martensita e carboneto na ZTA e zona fundida são danosas ao ferro fundido, por deixar as regiões com uma alta dureza e fragilidade, afetando por exemplo, a usinabilidade do material.

A baixa ductilidade do ferro fundido cinzento dificulta a soldagem destes materiais, pois as tensões não são absorvidas pelo material fora da ZTA, sendo assim, a probabilidade de aparecer trincas após a soldagem é alta. Segundo o autor, este problema pode ser reduzido por um aquecimento a uma temperatura na qual a deformação plástica pode ocorrer durante a soldagem. Um tratamento de pós aquecimento é uma ótima opção para aliviar as tensões residuais e reverter a estrutura martensítica na ZTA, além de facilitar a difusão do H₂.

Os procedimentos de soldagem são definidos pelo tamanho da peça, formato da peça, condições de serviço da peça, se a peça trincou ou desgastou, equipamentos disponíveis, soldadores qualificados, estado geral que se encontra a peça (PRISCO, 2001).

Com exceção ao ferro fundido branco, que é insoldável, todos os outros tipos de ferro fundidos podem ser soldados por todos os processos convencionais – Arco elétrico ou oxiacetileno. Deve-se determinar o processo de soldagem pelas seguintes características: tamanho, formato, limpeza, uso da peça, local a ser soldado, se sofrerá usinagem após a soldagem, resistência necessária na região soldada.

Na soldagem pelo arco elétrico, os eletrodos recomendados, conforme a norma AWS A5.15, são os tipos a base de níquel como:

AWS-E-Ni Ci – recomendado para espessuras menores, de preferência em peças novas ou limpas, onde se requer resistência à tração igual ao do ferro fundido cinzento.

AWS-E Ni Fe Ci – indicado para soldagem de maiores espessuras, para ferros fundidos, nodular e maleável, por tender a gerar menos trincas.

AWS-E-St – utilizando em soldagem de ferro fundido “muito sujo”, união entre ferro fundido e aço, é recomendado para função de impermeabilização ou descontaminação de peças muito sujas.

2.5.1.1 Aspectos físicos

O ferro fundido é uma liga ferrosa com baixa porcentagem de alongamento, o que dificulta sua soldagem, explicando o motivo pelo qual surgem as trincas durante

o processo de soldagem, pelo fato da dilatação e contração do ferro fundido não acompanharem a variação da temperatura. A temperatura durante a soldagem deve ser mantida: caso esteja soldando a “frio”, manter a peça o mais frio possível ou se for soldando a quente, controlar a temperatura (PRISCO, 2001).

A soldagem a quente deve ser evitada caso a geometria da peça seja complexa, uma vez que se pode criar tensões e trincas. É importante o resfriamento ser lento e uniforme, em forno ou cal, quando se fala de soldagem a quente.

2.5.2 Procedimento de soldagem para ferros fundidos

- Soldagem a quente – processo oxiacetileno.
- Soldagem a meio quente – processo arco elétrico – SMAW (eletrodo revestido)
- Soldagem à frio – processo arco elétrico.

2.5.3 Soldagem a quente – oxiacetileno

O processo de soldagem oxiacetilênica é recomendado para peças pequenas, em que a soldagem por arco elétrico é mais demorada, principalmente em peças que serão usinadas posteriormente. No processo é recomendado o uso de fornos para atingir a temperatura de pré-aquecimento, mantendo um bom controle de temperatura.

2.5.3.1 Procedimento de soldagem

2.5.3.1.1 Limpeza e preparação da peça

Para se ter êxito na soldagem de peças de ferro fundido, a limpeza é um ponto crítico, pois a maioria das peças de ferro fundido, possuem incrustações de área (processo de fabricação), impregnadas com contaminantes como, óleos, graxas e outros produtos químicos, em virtude da sua aplicabilidade. As incrustações de areia devem ser removidas por limpeza mecânica e as impurezas que advém de óleos e graxas devem ser removidas com solventes. O ferro fundido é um material com estrutura porosa, por isso, peças em contato com contaminantes podem serem penetradas por estes na estrutura. Na composição química de óleo e graxas, é encontrado alguns elementos prejudiciais para o processo de soldagem, como:

enxofre, hidrogênio, fósforo, carbono etc. Para eliminar essa contaminação na estrutura é recomendado pré-aquecer a peça até 150 °C e processo estará no fim após toda fumaça típica de queima de óleos e graxas terminar.

2.5.3.1.2 Identificação do metal de base

Um fator primordial na soldagem é reconhecer qual tipo de material se busca soldar para determinar qual o metal de base e o procedimento corretos. Podendo se tratar de peças antigas e possivelmente sem o desenho arquivado no setor de documentação técnica, entretanto sabendo a aplicabilidade da peça é possível deduzir qual tipo de ferro fundido ela é feita, mas o método mais confiável é através análise metalográfica ou química.

Na maioria dos casos, não há essas análises disponíveis, então uma análise prática e de vivência profissional dos manutentores e soldadores, são 80% assertivas.

Quando falamos de ferro fundido cinzento, por apresentar uma estrutura lamelar com grafite livre, sua fatura é porosa de cor acinzentada, que ao passar um papel branco, mancha de cinza, caracterizando o grafite. Também o ferro fundido cinzento se destaca pela sua estrutura porosa, diferente dos demais, que apresentam uma estrutura parecida com o aço. Outra maneira prática de se identificar é realizando uma furação com broca próximo da região a ser soldada, caso o cavaco saia em forma de pó, similar ao grafite, indica que é ferro fundido cinzento, se o cavaco sair em formato espiral, temos ferro fundido nodular ou maleável.

Devido à semelhança nas propriedades mecânicas, a distinção entre ferro fundido nodular e maleável pode ser difícil por métodos práticos, mas sua identificação se torna não tão necessária por ser utilizado a mesma técnica de soldagem para ambos.

O ferro fundido branco é observado sua cor prateada e pela dureza elevada, através de uma lima.

Tratando-se dos ferros fundidos ligados, por serem de aplicação específica, o setor de manutenção ou engenharia provavelmente terá a especificação da peça.

2.5.3.1.3 Preparação do chanfro

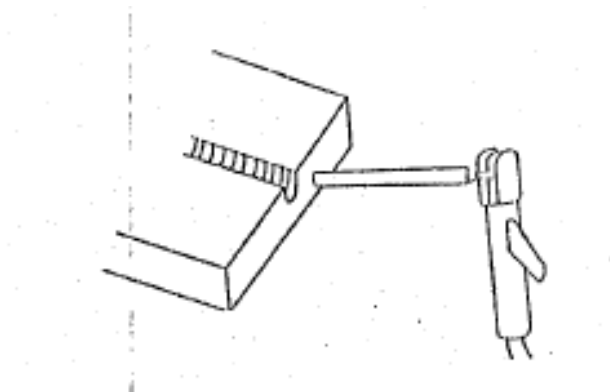
Quando falamos em soldagem, temos que realizar a preparação do local para receber o material de adição, denominado chanfro. Essa preparação dependerá da espessura da peça, sendo assim, peças até 4 mm de espessura são isentas de chanfros; peças com espessuras de 4 a 13 mm, deve-se utilizar o chanfro “U”, com os cantos arredondados. Para espessuras acima de 13 mm, é recomendado utilizar o chanfro “duplo U”. A preparação dos chanfros pode ser feita por rebolo, esmerilhadeira, plaina, eletrodo de carvão e revestido.

A preparação por ação mecânica deve ser executada com precauções e por um profissional habilidoso, pois no ato de execução, pode se aplicar mais tensões ou até mesmo gerar/ aumentar as trincas.

O uso de eletrodo de carvão tem algumas negatividades, principalmente por seu uso depositar carbono na região chanfrada, criando regiões duras, não tendo boa performance quando utilizado em ferro fundido.

A melhor opção para preparar chanfros em ferro fundido é através de eletrodos revestidos, por não apresentar os problemas do eletrodo de carvão e já proporcionar a região pré-aquecida, facilitando a diluição da soldagem.

Figura 8. Operação de chanfro com eletrodos



Fonte: Prisco (2001)

2.5.3.1.4 Pré-aquecimento

O pré-aquecimento para a soldagem à quente do ferro fundido é recomendado entre 550 e 650 °C com a utilização de forno para uma melhor uniformidade da temperatura na peça e se recomenda manter esta temperatura durante a soldagem,

com o auxílio de lápis térmico ou termômetro e evitar o contato da peça com corrente de ar.

2.5.3.1.5 Operação de soldagem

Utilizando o processo oxiacetilênico, a chama é neutra à oxidante e vareta de ferro fundido AWS R-CI, compatível com o ferro fundido a ser soldado. O tipo fusão é o utilizado na operação, com o auxílio de fluxo. As varetas de ferro fundido podem ser redondas ou quadradas revestidas ou não com fluxo. É recomendado o uso de varetas nuas.

Figura 9. Vareta para soldagem oxiacetilênica



Fonte: Folheto técnico – Castolin Eutectic (2025)

Pelo fato do processo oxiacetilênico exigir uma alta temperatura de pré-aquecimento, a vareta chega a ficar com a ponta incandescente (900°C), e quando ela mergulhar no fluxo para trazer o material para a soldagem, o fluxo se funde em contato com a ponta, dificultando a operação. Para evitar este problema, é utilizado o fluxo com alto ponto de fusão ou aguardar a queda da temperatura da vareta para mergulhar no fluxo.

2.5.3.1.6 Pós aquecimento – alívio de tensões

Após realização da soldagem, é necessário realizar um pós-aquecimento para alívio de tensões, de preferência em um forno em temperatura de 750 °C.

2.5.3.1.7 Resfriamento lento

Após realização do alívio de tensões, o resfriamento deve ser feito no próprio forno, com porta fechada até 100 °C, e depois resfriar ao ambiente. Caso o pré e pós aquecimento forem feitos com o uso de maçarico, usar a cal como meio de resfriamento. Após o resfriamento completo da peça, realizar ensaio de líquido penetrante.

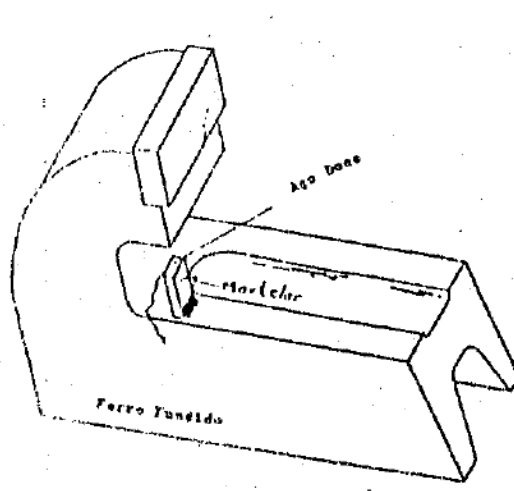
2.5.4 Soldagem a meio quente – processo arco elétrico

2.5.4.1 Procedimento de soldagem

Para a soldagem a meio quente, pelo processo a arco elétrico, os cuidados de limpeza, preparação, identificação do metal de base, cuidados com o chanfro são mantidos igualmente ao processo oxiacetilênico. O pré-aquecimento deve obedecer entre 300 e 400 °C. Usar no processo de soldagem, eletrodo a base de níquel. É recomendado aplicar o seguinte teste de soldabilidade:

1. Soldar uma chapa de aço carbono de 100x50x3mm de espessura, na posição vertical e realizar a soldagem entre o aço e o ferro fundido. Observar se o cordão de solda está isento de poros, trincas e com boa penetração em ambos os materiais;
2. Após a soldagem, deixar resfriar ao ambiente e martelar a chapa de aço, até esta dobrar.

Figura 10. Esquema de teste de soldabilidade



Fonte: PRISCO (2001)

Geralmente a solda será arrancada do ferro fundido e a chapa de aço continuará com a solda. Verificar se na raiz, houve o arrancamento de ferro fundido, indicando que a soldagem entre os dois materiais foi aprovada, confirmando a escolha correta do eletrodo utilizado.

2.5.4.2 Recomendações

Recomenda-se soldar cordões estreitos, sem nenhuma oscilação ou até mesmo cordões largos, utilizar os parâmetros de soldagem já definidos anteriormente por testes, manter as temperaturas de pré e pós aquecimento, conforme procedimento, evitar locais que possuam corrente de ar, soldagem com eletrodos de níquel puro utilizar a polaridade direta (CC-) e para o tipo níquel e Ferro usar a polaridade inversa (CC+)

2.5.4.3 Pós-aquecimento

O pós-aquecimento deverá ser feito 50 °C acima da temperatura de pré-aquecimento, utilizando forno com a porta fechada, aguardar o aquecimento uniforme e resfriar no forno fechado até 100°C e depois ao ambiente (ar).

2.5.5 Soldagem à frio – arco elétrico

Quando falamos em soldagem de ferro fundido, a soldagem à frio por arco elétrico é a mais utilizada, por ser mais rápida, mais econômico e indicada para peças robustas e/ou de geometria complexas. Como o processo é a frio, não há a necessidade de pré e pós-aquecimento, gerando um ganho enorme de produtividade. O que é exigido como os demais processos de soldagem de ferro fundido é a habilidade que não são exigidas na soldagem de outros materiais.

2.5.5.1 Procedimento de soldagem

A limpeza, preparação, identificação do metal de base e preparação do chanfro mantém os cuidados do processo de soldagem à meio quente por arco elétrico. A necessidade de pré e pós aquecimento é nula.

2.5.5.2 Técnica de soldagem a frio

Usar o diâmetro do eletrodo menor do que a espessura da peça, gerando um menor *heat-input*.

Qualificar a amperagem e o eletrodo – amperagem baixa.

A distância do arco deve ser a menor possível, diminuindo o calor gerado e a voltagem.

Os cordões devem ser no máximo dez vezes o diâmetro do eletrodo, exemplo: usando um eletrodo de diâmetro de 2,5 mm, o cordão deve ter no máximo 25mm. Soldar passe estreito, evitando oscilações.

Realizar cordões com posições alternadas para evitar a concentração de calor em uma área e possíveis tensões;

Realizar cordões retrocesso – passe a ré, os cordões se encontram em posições contrárias, mas terminam em um mesmo ponto, neutralizando as forças contrárias (PRISCO, 2001).

Imediatamente após depositar o cordão, martelas usando martelo bola com golpes firmes, na crista do cordão, aliviando tensões internas, corrigir deformações e melhorar as propriedades mecânicas. Logo após o martelamento, escovar o cordão para remoção total da escória.

O calor é uma variável a ser controlada, é permitido a continuidade na execução quando possível tocar com a mão a uma distância de 15 cm do cordão de solda.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- 01 unidade de disco de freio do Jeep Compass – ferro fundido cinzento;
- Eletrodo revestido ENiCi, diâmetro de 2,5 mm;
- Líquido penetrante metal check VP-30;
- Removedor – metal check E-59
- Revelador – metal check D-70
- Acetona;

3.2 Equipamentos

3.2.1 Equipamentos de soldagem

- Inversora de soldagem Balmer Maxxi 200P AC/DC

3.2.2 Equipamento auxiliares

- Lixadeira;
- Escova de aço;
- Picadeira de solda;
- Politriz lixadeira metalográfica – PL02E

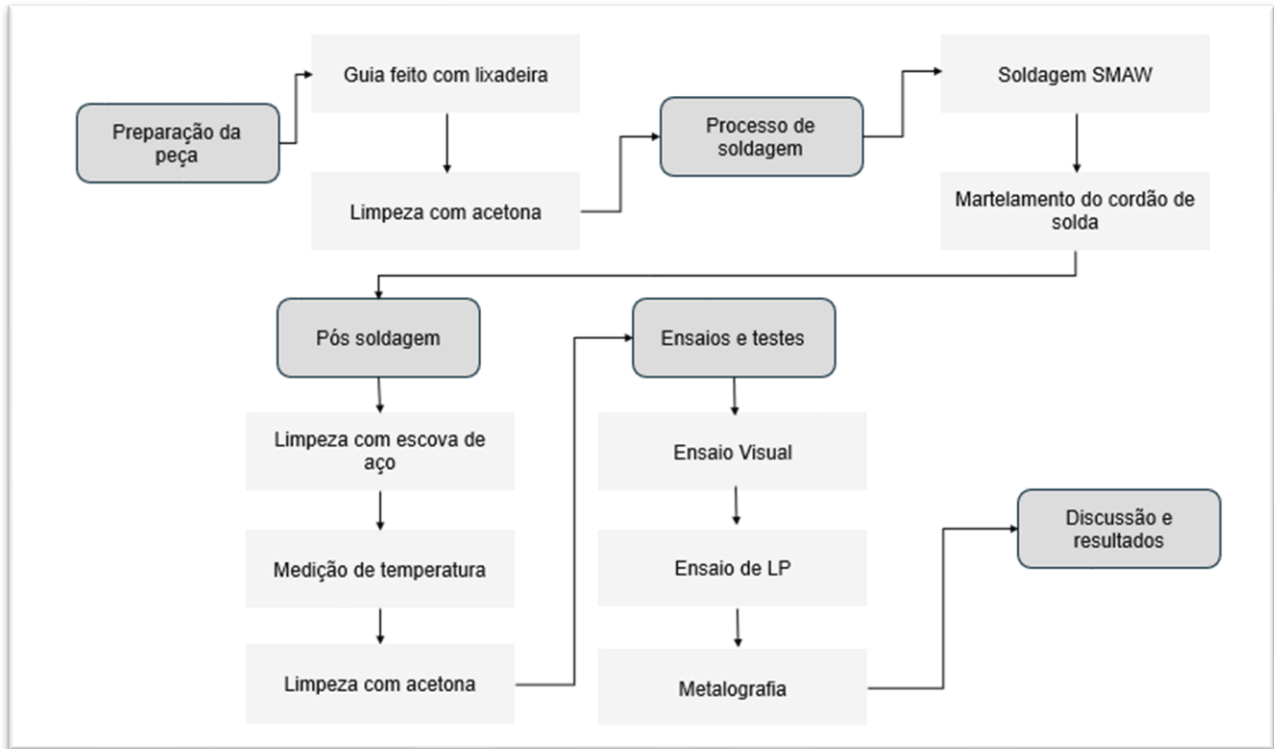
3.2.3 Equipamento de medição

- Pirômetro
- Microscópio Óptico.

3.3 Métodos

A metodologia adotada neste estudo segue o fluxograma apresentado abaixo.

Figura 11. Fluxograma esquemático do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3.1 Procedimento experimental

3.3.1.1 Preparação e limpeza da peça

A limpeza do disco de freio de ferro fundido foi feita utilizando acetona para remover óleos, sujeiras e poeira em sua superfície. Após a limpeza foi realizado um guia em uma extremidade do disco com o auxílio de uma lixadeira com disco de corte. Este guia foi feito para direcionar o cordão de solda.

Figura 12. Preparação do disco



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

(A) Disco antes da limpeza

(B) Acetona utilizada

Figura 13. Disco em processo de limpeza



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3.1.2 Processo de soldagem

Foram adotados os seguintes parâmetros de soldagem, conforme tabela 2:

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem aplicados com eletrodo E-Ni CI

Processo	Corrente (A)	Velocidade aprox. (mm/s)	Material de adição
SMAW (Eletrodo revestido)	85	2-4	Eletrodo E Ni-CI Ø 2,5 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A composição química do eletrodo E-NiCi é dada pela norma “AWS A5.15 - SPECIFICATION FOR WELDING ELECTRODES AND RODS FOR CAST IRON”. Percebe-se que é requisitado que o eletrodo tenha no mínimo 85% de níquel em sua composição.

Tabela 3 - Requisitos de composição química para metal de solda não diluído para eletrodos revestidos e com núcleo fluxado de soldagem a arco elétrico

TABLE 1A ⁽¹⁾ CHEMICAL COMPOSITION REQUIREMENTS FOR UNDILUTED WELD METAL FOR SHIELDED METAL ARC AND FLUX CORED ARC WELDING ELECTRODES												
Weight Percent ^{(1) (2) (3)}												Other Elements, Total
AWS Classification ⁽⁴⁾	UNS Number ⁽⁵⁾	C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni ⁽⁶⁾	Mo	Cu ⁽⁷⁾	Al	
Shielded Metal Arc Welding Electrodes												
E-Ni-CI	W82001	2.0	2.5	4.0	...	0.03	8.0	85 min.	...	2.5	1.0	1.0
ENi-CI-A	W82003	2.0	2.5	4.0	...	0.03	8.0	85 min.	...	2.5	1.0-3.0	1.0
ENiFe-CI	W82002	2.0	2.5	4.0	...	0.03	Rem.	45-60	...	2.5	1.0	1.0
ENiFe-CI-A	W82004	2.0	2.5	4.0	...	0.03	Rem.	45-60	...	2.5	1.0-3.0	1.0
ENiFeMn-CI	W82006	2.0	10-14	1.0	...	0.03	Rem.	35-45	...	2.5	1.0	1.0
ENiCu-A	W84001	0.35-0.55	2.3	0.75	...	0.025	3.0-6.0	50-60	...	35-45	...	1.0
ENiCu-B	W84002	0.35-0.55	2.3	0.75	...	0.025	3.0-6.0	60-70	...	25-35	...	1.0

(Tabela em inglês conforme o original da norma)

Fonte: AWS A5.15 (2021)

Os discos de freio de ferro fundido cinzento são geralmente fabricados seguindo a composição química evidenciada na tabela 4.

Tabela 4. Composição química do ferro fundido cinzento do disco de freio

Elemento	Composição (%)
Carbono (C)	3,0 - 3,5
Silício (Si)	1,8 - 2,5
Manganês (Mn)	0,5 - 1,0
Enxofre (S)	0,08 - 0,15
Fósforo (P)	≤ 0,1
Molibdênio (Mo)	0 - 0,5
Cobre (Cu)	0 - 1,0
Cromo (Cr)	0 - 0,2
Ferro (Fe)	92 - 95

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1996)

A soldagem foi realizada seguindo as seguintes etapas:

1. A inversora de solda foi ligada e configurada com corrente elétrica (A) de 85 amperes;
2. O eletrodo E-NiCi foi conectado no porta eletrodo;
3. Foi realizado o cordão de solda de aproximadamente 100 mm, sem oscilação;
4. Imediatamente após o término do cordão de solda, este foi martelado com o auxílio de uma picadeira de solda, para dar o alívio de tensões;

5. Após o martelamento, foi realizada a limpeza do cordão de solda e da área adjacente com o auxílio de uma escova de aço.
6. A peça foi resfriada naturalmente até atingir 24,5°C, conforme medição pelo pirômetro, antes da continuidade da soldagem.
7. Foi realizada uma segunda limpeza com acetona na área determinada para realização do segundo cordão de solda;
8. Após a limpeza foi iniciado o segundo cordão de solda;
9. Imediatamente após fim do segundo cordão, foi realizado o martelamento seguindo o mesmo processo anterior.
10. Após o martelamento foi realizada a limpeza do cordão de solda com o auxílio da escova de aço;

Figura 14. Inversora regulada em 85A e soldagem em processo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 15. Martelamento do cordão e escovamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 16. Medição de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 17. Limpeza da superfície e 2º cordão de solda



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 18. Limpeza com escova de aço



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3.1.3 Ensaios e testes

Após a soldagem, o disco de freio foi submetido a testes para avaliação da solda.

3.3.1.3.1 Ensaio não destrutivo (END)

Visual de soldagem: tem como objetivo identificar descontinuidades através dos olhos humanos

Líquido penetrante: tem como objetivo identificar descontinuidades/defeitos superficiais através da aplicação de um líquido penetrante na peça.

Ensaio metalográfico: O ensaio metalográfico tem como objetivo analisar a microestrutura dos materiais metálicos, avaliando sua composição, fases presentes, defeitos e características do processo de fabricação.

3.3.1.3.2 Visual de soldagem

Após a limpeza dos cordões de solda, foi realizado o ensaio visual.

3.3.1.3.3 Líquido penetrante

As etapas foram seguidas baseadas em procedimento qualificado de ensaio por líquido penetrante:

1. Foi verificado com o pirômetro a temperatura da superfície e conforme procedimento, a temperatura superficial deve estar abaixo de 52 °C e acima de 10 °C. A temperatura liberada para iniciar o ensaio foi de 41,5 °C de uma extremidade e de 38,5°C de outra.
2. Foi realizada a limpeza superficial com o removedor Metal Check E-59 e papel toalha;
3. Após a limpeza foi aguardado 5 minutos para evaporação do removedor;
4. Foi aplicado o líquido penetrante Metal Check VP-30 na peça;
5. Após aplicação, foi aguardado 10 minutos para o produto agir;
6. Após os 10 minutos, foi realizada a limpeza com água abundante, removendo todo produto aparente;
7. Após a lavagem foi realizada a secagem com papel toalha;
8. Após a secagem foi aplicado o revelador Metal Check D70, pulverizando totalmente a superfície;
9. Imediatamente o revelador foi indicando e foi aguardado 10 minutos para análise;

10. Foi verificado que a presença dos entalhes deixados pelo martelamento, ficaram com resíduos de líquido penetrante em alguns pontos dos cordões, portanto foi realizado a limpeza novamente destes pontos com papel toalha e aplicado novamente o revelador;

Figura 19. Removedor E59 e Líquido penetrante VP30



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 20. Revelador D70 e Temperatura pós soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 21. Temperatura pós soldagem e limpeza para o END de LP



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 22.– LP aplicado e Pisseta utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 23. Remoção do LP e secagem da peça



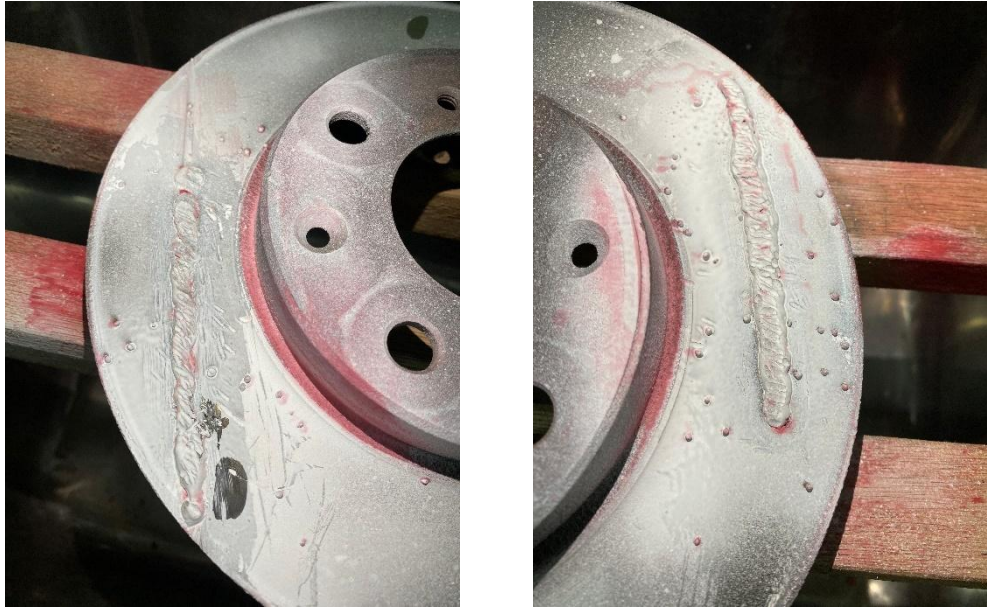
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 24. Aplicação do revelador D70 e Peça para realizar análise



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 25. Peça pronta para análise



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3.1.3.4 Ensaio metalográfico:

O ensaio metalográfico foi realizado com o objetivo de analisar a microestrutura dos cordões de solda e sua zona termicamente afetada (ZTA), a fim de avaliar a qualidade da soldagem do ferro fundido cinzento com eletrodo revestido E-NiCi. Para isso, foram seguidas as seguintes etapas:

1. Corte das Amostras:

Os cordões de solda foram removidos da peça (“A” e “B”) e cortados transversalmente para análise da seção soldada.

2. Preparação das Amostras:

Foi selecionada uma amostra de cada cordão de solda. As superfícies foram regularizadas inicialmente com lima manual

3. Incorporação das Amostras em Resina:

As amostras foram inseridas em moldes e embutidas em resina termofixa, utilizando a proporção de 2g de pó para 1g de catalisador. Após 24 horas, as amostras estavam completamente solidificadas e prontas para o lixamento e polimento.

4. Lixamento e Polimento:

O lixamento foi realizado em sequência crescente de granulometria, utilizando lixas d'água nos seguintes estágios: 220, 400, 600, 800 e 1000. Após o lixamento, foi realizado o polimento final com óxido de alumínio (Al_2O_3 – alumina), garantindo uma superfície livre de riscos para observação microscópica.

5. Análise Microscópica Inicial:

As amostras foram analisadas em microscópio óptico metalográfico, utilizando objetiva de 100x e 400x, sem ataque químico, para observar a estrutura da solda e possíveis descontinuidades.

6. Ataque Químico:

Para evidenciar a microestrutura, as amostras foram submetidas a ataque químico com reagente nital.

7. Análise Microscópica Pós-Ataque:

As amostras foram novamente analisadas no microscópio óptico, utilizando ampliações de 100x e 400x, permitindo a identificação da microestrutura resultante do processo de soldagem.

8. Registro Fotográfico:

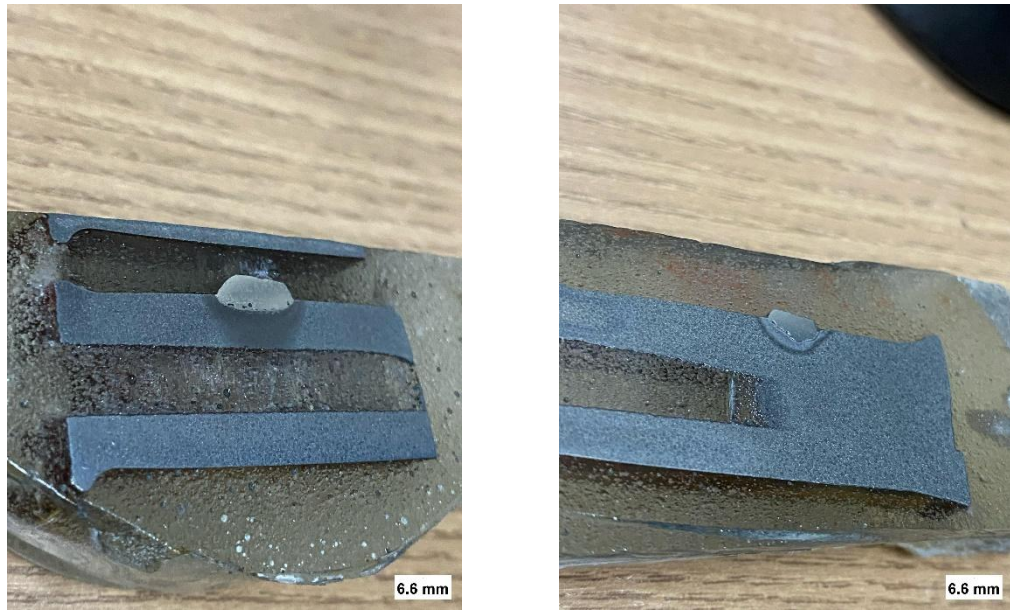
Foram capturadas imagens representativas das regiões analisadas para compor a documentação técnica e apoiar a interpretação dos resultados.

Figura 26. Politriz lixadeira metalográfica – PL02E e Microscópio óptico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 27. Amostra 3A após ataque nital 2% e Amostra 5B após ataque nital 2%



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

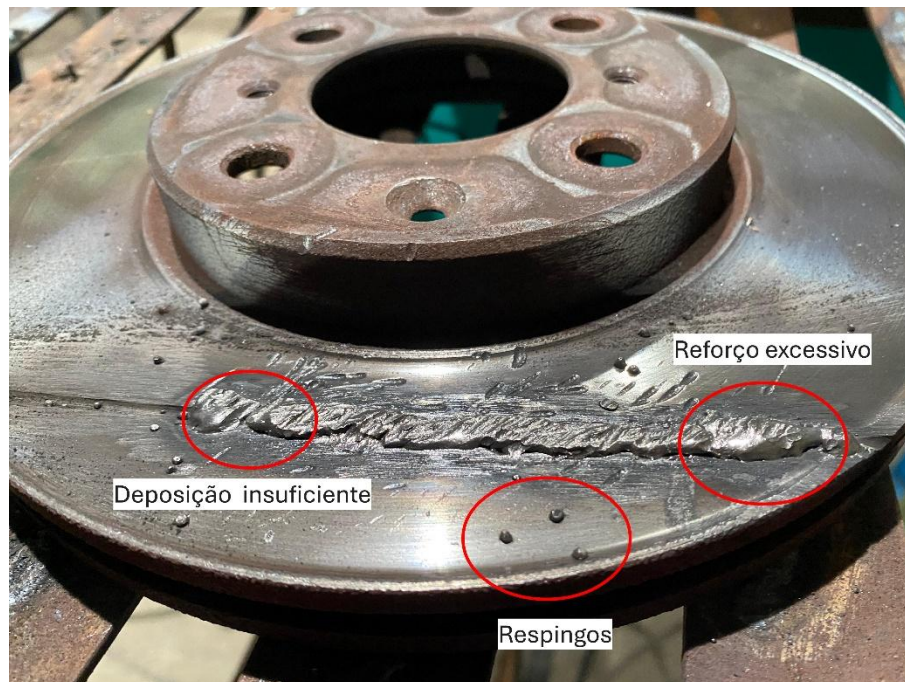
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio Visual de solda

4.1.1 Cordão de solda B

Após a limpeza do cordão B, foi realizado o ensaio de visual. Foi constatado a presença de respingos em torno do cordão, um reforço excessivo no início, possivelmente causado por uma baixa velocidade de avanço e uma deposição insuficiente, causada por um aumento na velocidade de avanço momentânea.

Figura 28. Descontinuidades encontradas no cordão B

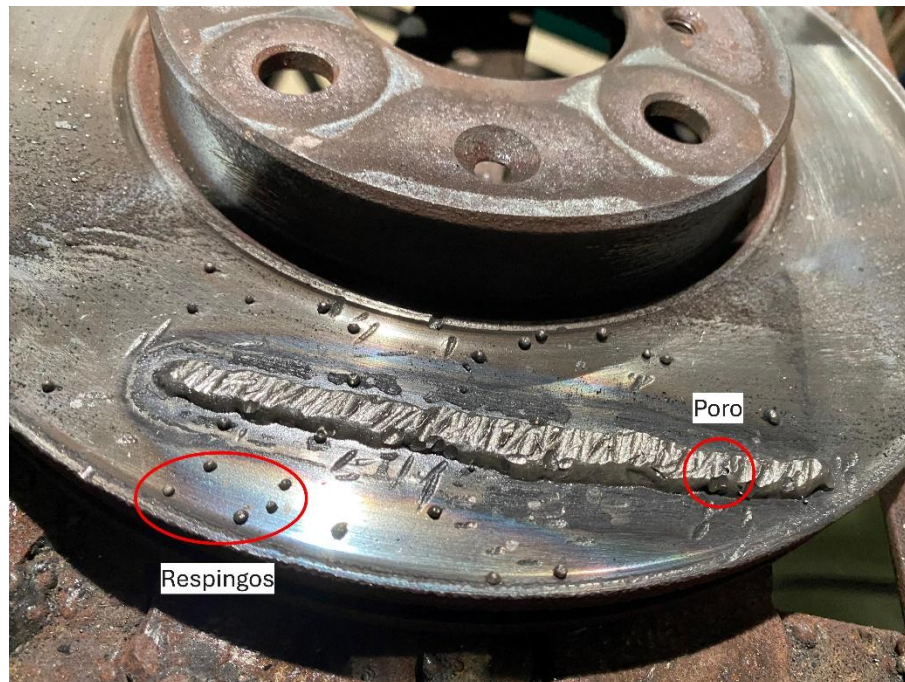


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.1.2 Cordão de solda A

Após a limpeza do cordão A, foi realizado o ensaio de visual. Foi identificado a presença de um poro e respingos. Possivelmente o poro foi causado pelo fato de o eletrodo estar úmido, pois este não foi tratado.

Figura 29.Descontinuidades encontradas no cordão A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.2 Ensaio por líquido penetrante

Foi realizado o ensaio por líquido penetrante, conforme item 3.3.1.3.3.

4.2.1 Cordão B

Foi observada uma indicação do cordão B, sendo uma trinca superficial, onde foi indicado uma deposição insuficiente no ensaio visual.

Figura 30.Descontinuidade encontrada no ensaio por LP do cordão B

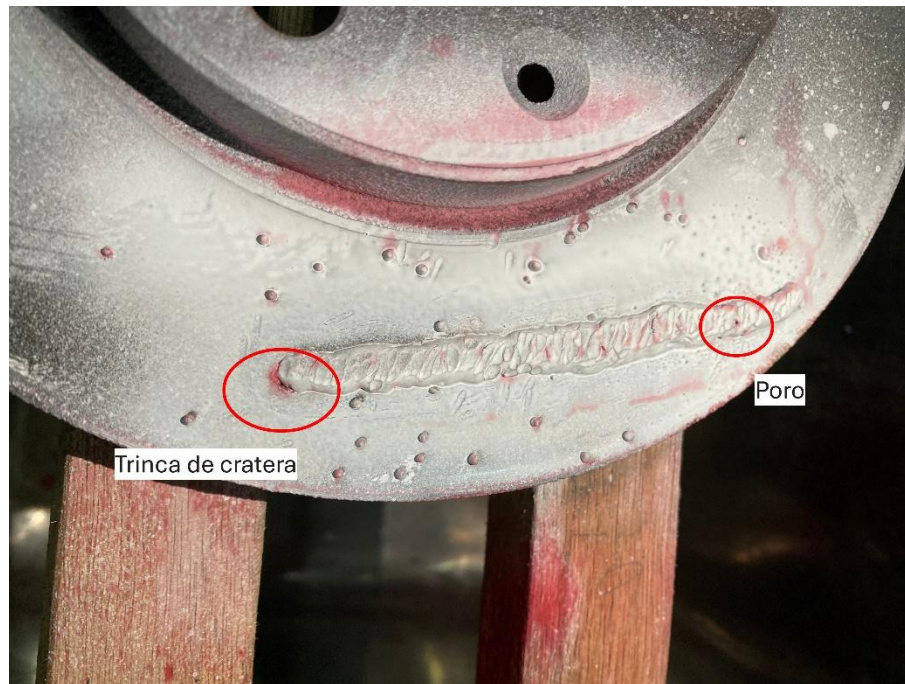


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.2.2 Cordão A

Foram observadas duas indicações no cordão A, sendo um poro e uma trinca de cratera no final do cordão. Essa trinca de cratera possivelmente foi causada pela interrupção brusca da soldagem.

Figura 31.Descontinuidade encontrada no ensaio por LP do cordão A



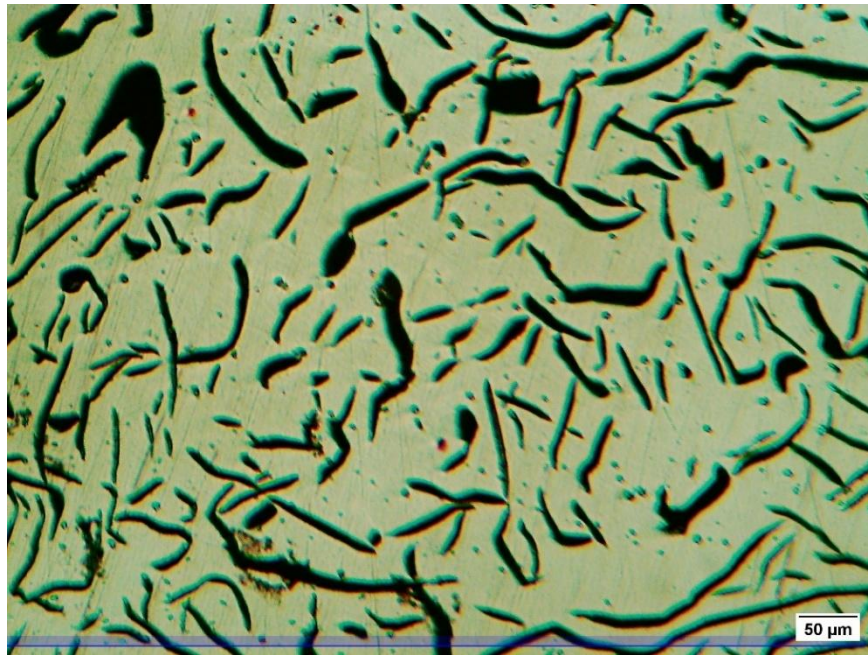
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3 Ensaio metalográfico

4.3.1 Imagens antes do ataque de Nital 2%

As observações iniciais foram feitas em microscópio óptico sem ataque químico. A amostra 5B, sob o aumento de 100x, evidencia a grafita em formas de lamelas, sendo essa, uma característica intrínseca do ferro fundido cinzento (COLPAERT, 2006). As lamelas de grafita estão presentes em uma matriz metálica não revelada, indicando uma estrutura preservada no metal de base.

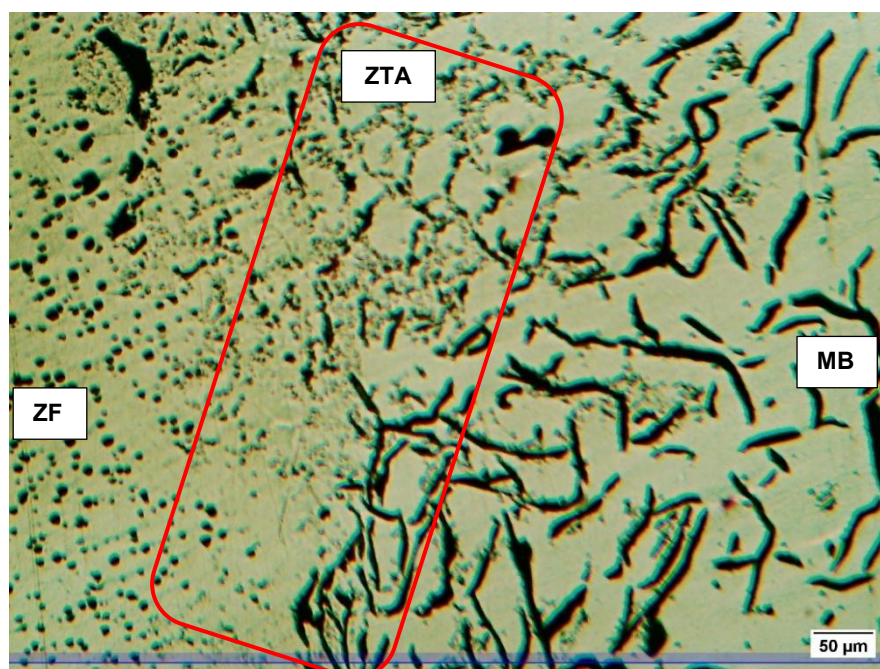
Figura 32. Lamelas do ferro fundido cinzento – aumento de 100x – amostra 5B



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A amostra 3A, sob aumento de 100x, é visível uma transição de zonas da solda, sendo identificado a Zona Termicamente Afetada, Zona fundida, e o Metal de Base. Percebe-se uma penetração térmica limitada, resultado da técnica de soldagem a frio, que dispensa pré-aquecimento (BRACARENSE, 2007).

Figura 33. Transição de zonas da amostra – aumento de 100x – amostra 3A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

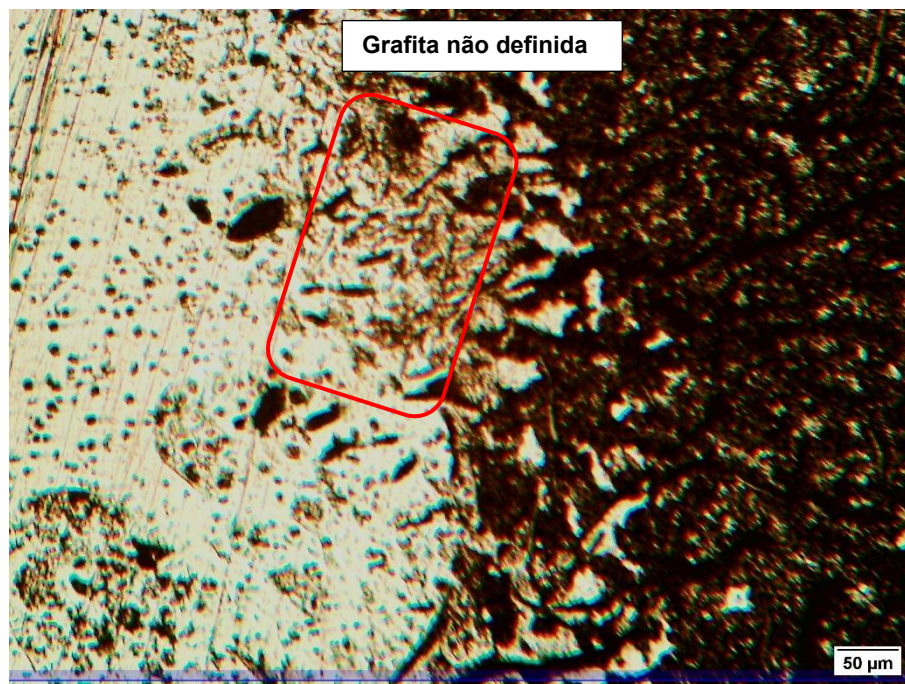
4.3.2 Imagens após ataque de Nital 2%

Com o ataque metalográfico utilizado (solução de nital 2%), foi possível identificar de forma mais clara as fases microestruturais.

A amostra 3A, apresenta uma região do metal de base com grafita em formato lamelar, distribuída numa matriz predominantemente perlítica. Na ZTA a grafita se apresenta com formato irregular, sem contornos bem definidos, comumente de regiões aquecidas de forma moderada e posteriormente resfriadas rápidas. Na zona fundida, a grafita possui um formato esferoidal, indicando uma solidificação diferenciada, possivelmente influenciada pela taxa de resfriamento e pela composição do eletrodo E-NiCi (COLPAERT, 2006).

Esse comportamento é coerente com o que é descrito na literatura: quando se solda com eletrodo de níquel, este tende a promover a grafitização na zona fundida e minimizar a formação de cementita (Fe_3C), porém, mesmo assim, a ZTA pode apresentar a formação de martensita, devido ao resfriamento rápido (BRACARENSE, 2007).

Figura 34. Transição de zonas da amostra – aumento de 100x – amostra 3A

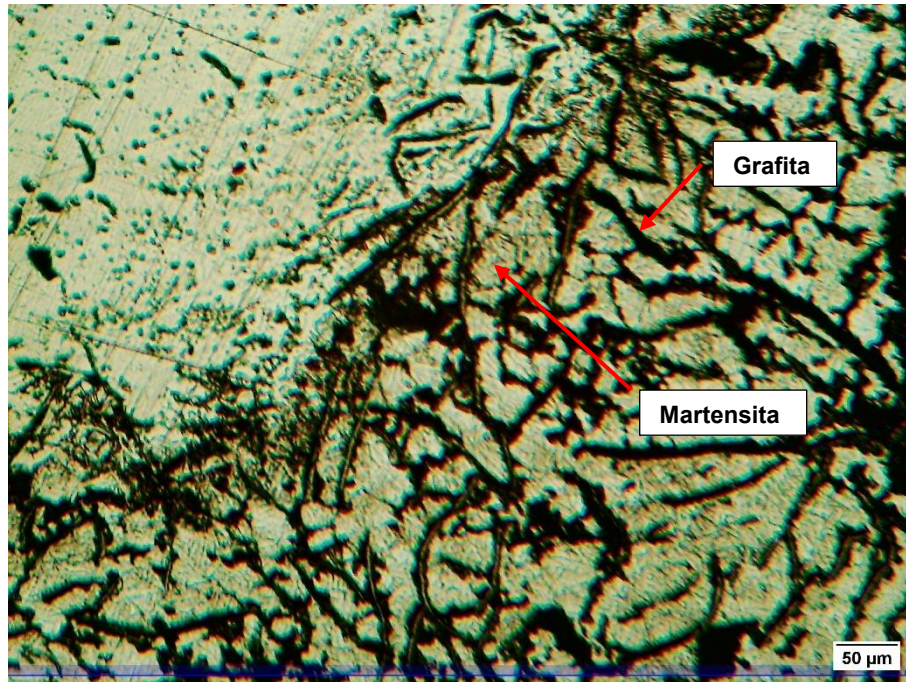


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A amostra 5B, sob um aumento de 100x, além da transição das grafitas, foi observada a presença de estruturas em forma de agulhas, compatíveis com

martensita, especialmente nas bordas da ZTA. Essa formação de martensita é crítica por ser extremamente frágil e dura, podendo comprometer a integridade da peça soldada.

Figura 35. Transição de zonas da amostra – aumento de 100x – amostra 5B

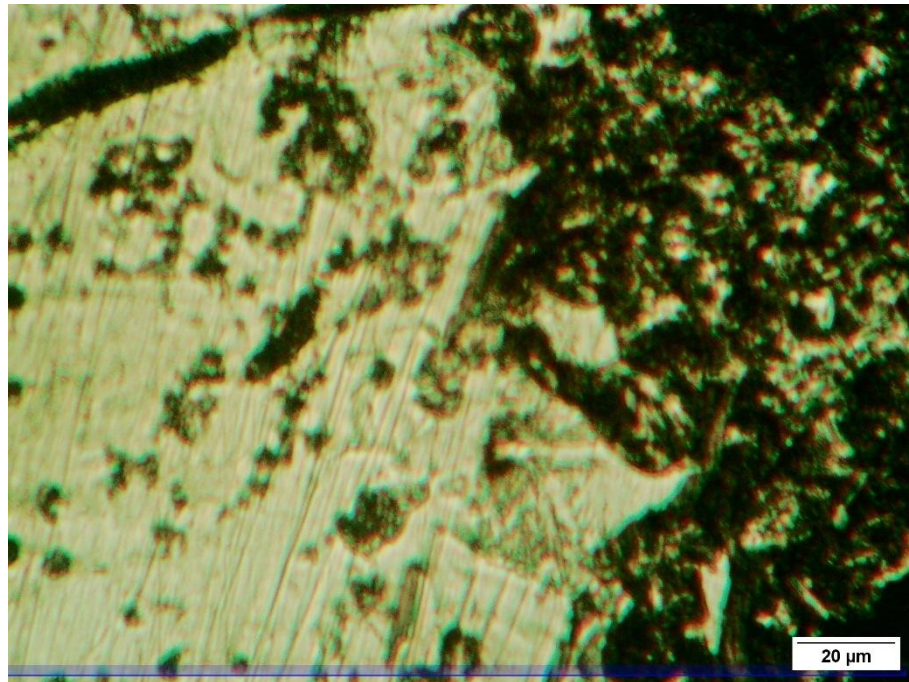


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As amostras 3A e 5B sob um aumento de 400x, proporciona a identificação mais precisa da morfologia das grafitas: grafita esferoidal na ZF, grafita irregular na ZTA e grafita lamelar no metal de base.

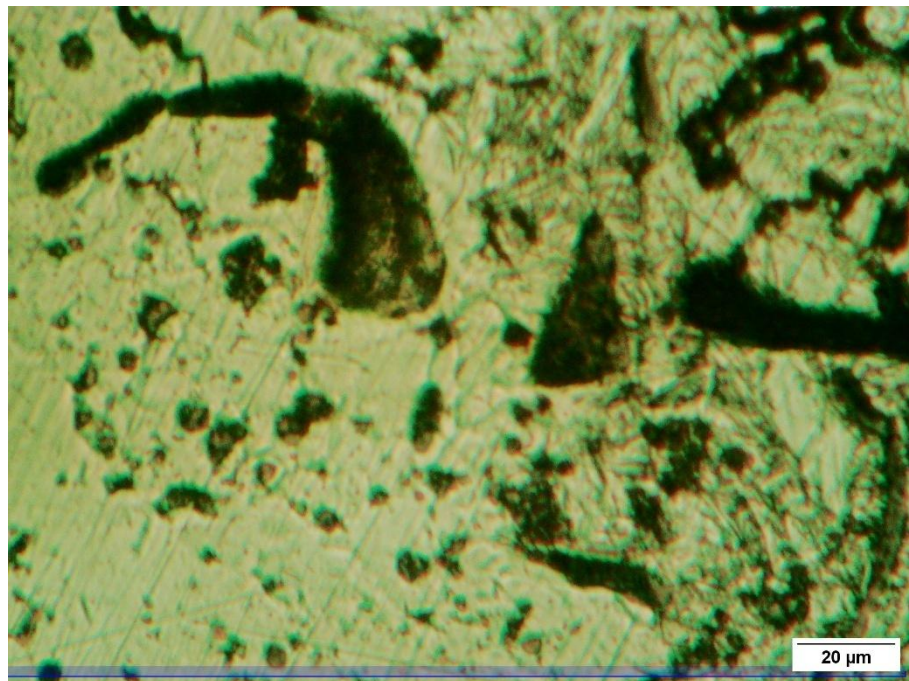
Essas observações demonstram a influência direta da composição química do eletrodo e do ciclo térmico sobre a microestrutura final. Segundo Colpaert (2006), alterações na morfologia da grafita e a presença de martensita são indicativos diretos das tensões térmicas envolvidas, e refletem a qualidade da soldagem e da técnica aplicada.

Figura 36. Transição de zonas da amostra – aumento de 400x – amostra 3A



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 37. Transição de zonas da amostra – aumento de 400x – amostra 5B



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5 CONCLUSÃO

A partir dos procedimentos experimentais realizados, das análises dos ensaios não destrutivos e metalográficos, e da revisão teórica, conclui-se que a soldabilidade do ferro fundido cinzento apresenta desafios consideráveis, especialmente pela formação de microestruturas frágeis na Zona Termicamente Afetada (ZTA), como a martensita, que comprometem a tenacidade da junta soldada. Tal comportamento está alinhado com a literatura técnica, a qual destaca a suscetibilidade desse material a trincas e porosidades em virtude da elevada concentração de carbono e da morfologia das grafitas.

A análise metalográfica demonstrou que a ausência de pré e pós-aquecimento favorece a formação de estruturas endurecidas na ZTA, o que ratifica a importância do controle térmico durante o processo. Nesse sentido, conforme Colpaert (2006), a morfologia da grafita e a presença de martensita são indicativos diretos das tensões térmicas impostas durante a soldagem.

O eletrodo E-NiCi se mostrou eficaz na soldagem a frio, por promover melhor compatibilidade com o ferro fundido cinzento e reduzir a formação de cementita (Fe_3C), favorecendo a grafitização na zona fundida, conforme observado também por Bracarense (2007). Tal constatação está de acordo com os princípios metalúrgicos discutidos por Villani et al. (2004), que ressaltam a importância da escolha do consumível e do controle dos parâmetros térmicos na prevenção de tensões residuais e distorções.

Por fim, este trabalho evidencia que a soldagem do ferro fundido cinzento pode ser tecnicamente viável, desde que sejam adotadas metodologias adequadas, incluindo a correta seleção do eletrodo, o controle preciso do ciclo térmico e a aplicação rigorosa de técnicas de soldagem. Tais práticas contribuem para a integridade das juntas soldadas, reduzem falhas estruturais e ampliam o potencial de aplicação do ferro fundido cinzento na indústria, em consonância com os objetivos de desempenho mecânico, viabilidade econômica e sustentabilidade.

6 REFERÊNCIAS

FBTS, ***Inspetor de Soldagem***, Fundacao Brasileira de Tecnologia da Soldagem, vol. 1, fasciculo 1,

Norma ***PETROBRAS N-1737***, Rio de Janeiro, 1983.

PRISCO, Prof. Moacir, Curso: Solda de Manutenção, São Paulo: MP solda e consultoria LTDA, 2001

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel. Miami, FL: AWS, 2020.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). AWS A5.15: Specification for Welding Electrodes for Cast Iron. Miami, FL: AWS, 2016

BRACARENSE, A. A.; MODENESE, C.; VILLANI, E. M. ***Soldagem: fundamentos e tecnologia***. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015.

CHIAVERINI, V. ***Aços e ferros fundidos***. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.

COLPAERT, J. P. ***Introdução à metalurgia dos materiais***. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006

Locação Conjunto de Solda ou Corte Oxi-Acetileno. Disponível em:

<<https://oxilapa.com.br/produto/locacao-conjunto-de-solda-ou-corte-oxi-acetileno/>>.

Acesso em: 11 fev. 2025.

Aula 25 Processos de soldagem Oxigás. Disponível em:

<<https://www.slideserve.com/burke/aula-25-processos-de-soldagem-oxig-s>>. Acesso

em: 11 fev. 2025.

GERAIS, F. **Vareta de Solda de Latão sem Revestimento 3,2mm para Oxi-**

Acetileno VE471HO4005074 - TM. Disponível em: <<https://www.fg.com.br/vareta-de-solda-de-latao-sem-revestimento-32mm-para-oxi-acetileno-ve471ho4005074---tm/p>>. Acesso em: 11 fev. 2025.

Soldabilidade dos ferros fundidos - Infosolda. Infosolda - O Portal Brasileiro de

Soldagem Infosolda, 15 fev. 2013. Disponível em: <[https://infosolda.com.br/136-](https://infosolda.com.br/136-soldabilidade-dos-ferros-fundidos/)

[soldabilidade-dos-ferros-fundidos/](https://infosolda.com.br/136-soldabilidade-dos-ferros-fundidos/)>. Acesso em: 11 fev. 2025