

Comparativo entre soldagem GTAW e SMAW na soldagem de ferro fundido

Comparative study between GTAW and SMAW welding processes in cast iron welding

CLANDERSON HENRIQUE DA SILVA

Discente de Engenharia Mecânica (UNIPAM)
clandersonhenrique@unipam.edu.br

JANAÍNA APARECIDA PEREIRA

Professora orientadora (UNIPAM)
janainaap@unipam.edu.br

Resumo: Este trabalho realiza uma comparação entre técnicas de soldagem aplicadas ao ferro fundido, com ênfase nos processos GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), utilizando metal de adição, e SMAW (Shielded Metal Arc Welding), com eletrodo revestido. O objetivo é identificar qual técnica apresenta melhor aplicabilidade e qualidade em peças de ferro fundido nodular, material caracterizado por sua elevada resistência mecânica. Após uma revisão teórica sobre as propriedades do ferro fundido, o estudo analisa a soldabilidade do material, considerando dificuldades recorrentes, como trincas e porosidades. A metodologia envolveu a execução de soldagens em amostras sob condições controladas de temperatura, corrente elétrica e atmosfera de proteção gasosa. As juntas soldadas foram avaliadas por meio de inspeção visual, análise micrográfica e ensaios mecânicos. Os resultados indicam que a escolha do processo de soldagem é determinante para a integridade estrutural da peça: o processo GTAW proporciona melhor acabamento superficial, enquanto o SMAW apresenta desempenho superior em termos de resistência mecânica.

Palavras-chave: soldagem; manutenção; TIG; eletrodo revestido; engenharia mecânica.

Abstract: This study presents a comparison between welding techniques applied to cast iron, with an emphasis on the GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) process, using filler metal, and SMAW (Shielded Metal Arc Welding), using covered electrodes. The objective is to identify which technique offers better applicability and quality in ductile cast iron components—a material known for its high mechanical strength. After a theoretical review of the properties of cast iron, the study analyzes the weldability of the material, taking into account common issues such as cracking and porosity. The methodology involved performing welds on samples under controlled conditions of temperature, electrical current, and shielding gas atmosphere. The welded joints were evaluated through visual inspection, micrographic analysis, and mechanical testing. The results indicate that the choice of welding process is crucial for the structural integrity of the component: the GTAW process provides a superior surface finish, while the SMAW process delivers better performance in terms of mechanical strength.

Keywords: welding; maintenance; TIG; shielded electrode; mechanical engineering.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Pereira, L. (2021), a soldagem é uma das técnicas fundamentais na indústria, desempenhando um papel crucial na união de diferentes materiais metálicos. Entre esses materiais, destaca-se o ferro fundido, cuja presença é notável devido às suas características particulares de resistência, durabilidade e versatilidade em diversas aplicações industriais.

Segundo Souza (2021), o ferro fundido é definido como uma liga metálica composta por ferro (Fe) e carbono (C), com teor de carbono superior a 2%. Considerando a influência do silício (Si) em sua estrutura, o ferro fundido é geralmente classificado como uma liga ternária Fe-C-Si, uma vez que o teor de silício costuma ser superior ao de carbono.

Conforme Li *et al.* (2018), o ferro fundido nodular desempenha um papel relevante em diversos setores industriais, como motores navais, máquinas-ferramenta, tubulações de pressão e válvulas industriais. Essa classe de ferro fundido é composta predominantemente por grafita, perlita e ferrita. Os nódulos de grafita, característicos desse material, são geralmente circundados por ferrita, formando uma estrutura esferoidal que confere ao material suas propriedades mecânicas específicas.

A indústria brasileira de ferros fundidos registra, em média, uma produção anual de aproximadamente 3.000.000 de toneladas, posicionando o Brasil na décima colocação no ranking mundial. Esse setor é responsável por cerca de 55.000 empregos diretos e apresenta um crescimento médio anual de aproximadamente 0,1% (ABIFA, 2019).

A soldagem do ferro fundido impõe desafios técnicos específicos, decorrentes de sua natureza frágil e da elevada suscetibilidade à formação de trincas durante o processo de soldagem. Diante disso, torna-se imprescindível investigar técnicas que proporcionem a melhor combinação entre desempenho mecânico, resistência estrutural e confiabilidade na união de componentes de ferro fundido (Pereira, L. 2021).

Além do mercado consolidado, as perspectivas futuras para a indústria e a aplicação do ferro fundido concentram-se nas novas possibilidades de uso. Conforme destacado por Feres [201?], a substituição do aço carbono por barras de ferro fundido nodular tem se mostrado uma alternativa vantajosa, contribuindo para a redução dos custos de fabricação e para o aumento da produtividade.

No decorrer deste estudo, busca-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de soldagem de ferro fundido, fornecendo informações relevantes para engenheiros, fabricantes e demais profissionais da indústria interessados em alcançar soldagens de alta qualidade e eficiência em componentes fabricados com esse material.

Dessa forma, o objetivo geral desta pesquisa é avaliar, entre as técnicas de soldagem TIG e a soldagem com eletrodo revestido, qual apresenta melhor aplicabilidade em peças confeccionadas em ferro fundido nodular.

Para atingir tal objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão da literatura científica e técnica relacionada à soldagem de ferro fundido;
- Selecionar e preparar amostras representativas de ferro fundido a serem utilizadas nos experimentos de soldagem;

- Executar os procedimentos de soldagem utilizando as técnicas TIG e eletrodo revestido, sob condições pré estabelecidas;
- Avaliar a qualidade das juntas soldadas por meio de inspeção visual e ensaios metalográficos (micrografia);
- Analisar as propriedades mecânicas das juntas soldadas por meio de ensaios de tração e impacto.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 TIPOS DE FERRO FUNDIDO MAIS COMUNS

Modenesi (2008) classifica os ferros fundidos em três principais tipos: branco, cinzento e nodular. O ferro fundido branco é caracterizado pela ausência de grafita em sua estrutura microestrutural e por apresentar alto teor de cromo, o que lhe confere elevada resistência ao desgaste. Por essa razão, é empregado em componentes que exigem resistência à abrasão e demandam mínima usinagem após a fundição (Vidal, 2013).

De acordo com Reis (2021), o ferro fundido cinzento apresenta grafita livre em sua microestrutura, o que proporciona boa usinabilidade, alta fluidez, baixo custo de produção e facilidade de fabricação. Trata-se de um material amplamente utilizado nas indústrias de máquinas, automotiva, ferroviária e naval.

Por sua vez, o ferro fundido nodular, conforme descrito Souza (2021), apresenta o carbono na forma de grafita esferoidal, em uma matriz metálica que pode ser ferrítica, perlítica ou mista. Esse tipo de ferro fundido destaca-se por sua elevada ductilidade, resistência mecânica, alto módulo de elasticidade, boa usinabilidade, resistência à corrosão e facilidade de fundição.

No quadro 1 encontram-se as propriedades de resistências mecânicas dos ferros fundidos.

Quadro 1: Relação tipos de ferro fundido e suas propriedades mecânicas

Tipo	Microestrutura da matriz	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)
Cinzento	Ferrítica-perlítica	-	125	-
Cinzento	Perlítica	-	275	-
Maleável	Ferrítica	225	345	10
Maleável	Perlítica	350	480	5
Nodular	Ferrítica	275	415	18
Nodular	Perlítica	380	550	6

Fonte: Silva *et al.*, 2015.

Os ferros fundidos apresentam propriedades mecânicas comparáveis às dos aços estruturais, embora possuam um teor de carbono significativamente mais elevado, o que dificulta sua soldabilidade (Silva *et al.*, 2015). No Quadro 2, os autores referenciados apresentam a composição química típica dos diferentes tipos de ferro fundido.

Quadro 2: Composição química (% em peso) de ferros fundidos não ligados

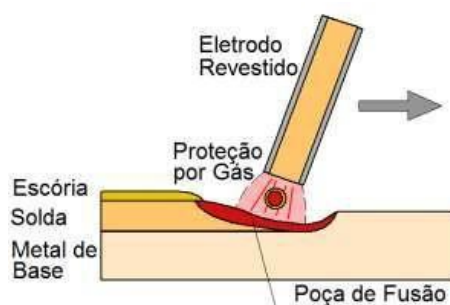
Tipos	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06 -0.2
Maleável	2,2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2
Cinzento	2,5 a 4	1,0 a 3,0	0,20 a 1, 0	0,2 a 0,25	0.02-1.0
Nodular	3,0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
Vermicular	2,5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1

Fonte: Silva *et al.*, 2015.

Segundo Silva *et al.* (2015), a classificação do ferro fundido pode ser determinada a partir da análise de sua estrutura metalúrgica e do teor de carbono presente na liga. Com base nessas informações, torna-se possível selecionar o processo de soldagem mais adequado, bem como definir os procedimentos complementares necessários, tais como o preaquecimento e o tratamento térmico para alívio de tensões residuais.

2.2 SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS

O eletrodo utilizado na soldagem apresenta um núcleo metálico, chamado "alma", responsável pela condução da corrente elétrica e pelo fornecimento do metal de adição. O revestimento do eletrodo tem a função de gerar escória e gases de proteção, que estabilizam o arco elétrico e evitam a contaminação da poça de fusão. Além disso, esse revestimento pode influenciar diretamente a composição química e as propriedades mecânicas da junta soldada (Modenesi; Marques; Santos, 2012).

Figura 1: Soldagem com eletrodo revestido

Fonte: Modenesi, Marques e Santos, 2012.

Segundo Tigre Júnior e Folha (2020), a soldagem com eletrodo revestido, também conhecida como processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding), utiliza um arco elétrico para fundir o eletrodo, formando o cordão de solda e, simultaneamente, promovendo a proteção da poça de fusão contra contaminações atmosféricas por meio

da geração de escória e gases oriundos do revestimento. A especificação dos eletrodos empregados na soldagem de ferro fundido é regulamentada pela norma AWS A5.15-69, a qual também estabelece as faixas recomendadas de corrente elétrica para aplicação, conforme ilustrado no Quadro 3.

Quadro 3: Processos de soldagem para ferro fundido

AWS Classe	Tamanho do eletrodo (in)			Polaridade
	1/8	5/32	3/16	
ECI	150 – 175 A		175 – 200 A	DCRP ou AC
Est	80 – 100 A			DCRP ou AC
Eni- CI	60 – 110 A	100 – 135 A		DCRP
	65 – 120 A	110 – 150 A		AC
EcuSn-c	50 - 125 A	70 - 170 A	90 - 220 A	DCRP

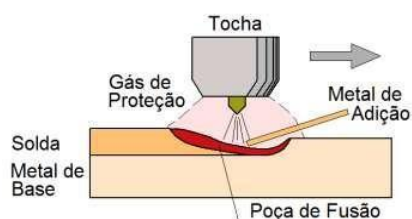
Fonte: Bueno, 2016.

Segundo Bueno (2016), os eletrodos listados no Quadro 3 dividem-se em grupos conforme sua aplicação específica. O grupo ECI oferece soldas semelhantes ao metal base, mas exige alto pré-aquecimento. O grupo EST é ideal para baixo custo e alta resistência, embora as soldas não sejam usináveis. Já o grupo ENI produz soldas usináveis e dúcteis, mas com menor resistência na zona de fusão e custo elevado devido ao níquel.

2.3 SOLDAGEM TIG

De acordo com Tigre Júnior e Folha (2020), o processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível para estabelecer o arco elétrico, gerando o calor necessário para fundir e unir os metais, inclusive o ferro fundido. No entanto, devido à elevada fragilidade dessa liga, as soldas obtidas por esse processo são suscetíveis à formação de fissuras, o que demanda cuidados específicos para obter bons resultados.

Figura 2: Processo de soldagem TIG



Fonte: Marques *et al.*, 2012.

Conforme destaca Tigre Júnior e Folha (2020), na soldagem de ferro fundido devem ser utilizadas varetas de ligas à base de níquel, devido à sua similaridade de coeficiente de dilatação térmica em relação ao metal base, o que contribui para a redução

das tensões residuais e da ocorrência de trincas. No processo de soldagem a quente, recomenda-se o aquecimento das peças entre 400 °C e 500 °C, seguido de um resfriamento lento e uniforme, a fim de evitar a formação de trincas por choque térmico. Segundo Silva (2017), o aumento brusco da temperatura em seções delgadas pode ocasionar a formação de ferro fundido branco, uma microestrutura indesejável em que a cementita não se decompõe em grafita. O processo de soldagem deve seguir normas técnicas específicas, como a NBR 14842:2016, que trata da qualificação de procedimentos de soldagem, e a NBR ISO 3834, referente aos requisitos de sistemas de gestão da qualidade para processos de soldagem. Além disso, as normas ISO 15614-2 e ASTM A159 estabelecem critérios e métodos para a realização de ensaios e a verificação de requisitos técnicos aplicáveis à soldagem e às fundições em ferro fundido.

2.4 DEFEITOS DE SOLDAGEM EM FERRO FUNDIDO

A descontinuidade na solda é definida como uma interrupção na estrutura esperada de uma junta soldada, comprometendo sua integridade e desempenho. Tais imperfeições podem ser provocadas por diversos fatores, como a falta de homogeneidade do material base, as propriedades metalúrgicas da liga e as condições do processo de soldagem. No caso do ferro fundido, as soldas apresentam elevada suscetibilidade a defeitos, sendo os mais recorrentes: trincas, porosidades, inclusões de escória e falta de fusão (Modenesi, 2008).

2.5 TRINCAS

As trincas a quente ocorrem durante o resfriamento do metal fundido após a soldagem, causadas pela contração do material. Para evitá-las, é essencial utilizar técnicas de pré-aquecimento e pós-aquecimento controlados. Trincas a frio podem se desenvolver após a soldagem, mesmo que a peça pareça estar em boas condições inicialmente. Elas surgem devido a tensões residuais e podem aparecer horas ou dias depois. Para sua prevenção, recomenda-se a elaboração de um planejamento adequado do procedimento de soldagem, associado a um resfriamento gradual e uniforme da peça (Souza, 2018).

2.6 POROSIDADE

A porosidade ocorre quando bolhas de gás ficam presas no metal solidificado, pode ser causado por contaminantes como umidade, óleo, sujeira ou oxidação, a limpeza adequada das superfícies, o uso de materiais de adição limpos e a proteção adequada do arco de soldagem podem minimizar a porosidade (Mol; Silva, 2016).

2.7 INCLUSÕES DE ESCÓRIA OU MATERIAL NÃO FUNDIDO

De acordo com Tigre Júnior (2020), inclusões de escória ou de materiais não fundidos podem ser incorporadas à zona fundida durante o processo de soldagem, caracterizando descontinuidades que comprometem as propriedades mecânicas da junta

soldada. A ocorrência desse tipo de defeito pode ser minimizada por meio da limpeza adequada das superfícies, bem como da correta seleção dos parâmetros de soldagem e dos sistemas de proteção do arco.

2.8 FALTA DE FUSÃO OU PENETRAÇÃO INADEQUADA

Segundo Souza (2018), a falta de fusão ocorre quando o material de adição ou o metal base não se fundem adequadamente, resultando em ligações frágeis ou descontínuas. Para evitar esse tipo de descontinuidade, é necessário ajustar corretamente parâmetros como a corrente de soldagem, a velocidade de avanço e o ângulo do eletrodo. Modenesi (2001) complementa que, devido à elevada suscetibilidade do ferro fundido à formação de trincas, é imprescindível adotar técnicas de controle térmico, como a soldagem em etapas e o resfriamento lento, além de contar com a atuação de profissionais qualificados para assegurar a integridade da junta soldada.

2.9 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

De acordo com Lopes *et al.* (2023), os ensaios não destrutivos (END) permitem identificar descontinuidades em materiais sem alterar suas propriedades. Andreucci (2010) destaca que esses ensaios são ferramentas essenciais na engenharia para controlar a qualidade de materiais e produtos, garantindo maior confiabilidade nos processos.

2.10. LÍQUIDOS PENETRANTES

O ensaio por líquidos penetrantes é usado para detectar descontinuidades superficiais abertas na superfície do material, baseando-se no princípio da capilaridade. Essa técnica, sensível a pequenos defeitos, identifica problemas como trincas, costuras, laminações, sobreposições e falhas causadas por fadiga ou corrosão sob tensão (Andreucci, 2012).

A aplicação do ensaio por líquido penetrante deve seguir uma sequência específica: inicialmente, utiliza-se o limpador ou removedor; em seguida, aplica-se o líquido penetrante; e, por fim, o revelador. Este método é restrito à detecção de descontinuidades abertas na superfície do material, uma vez que o líquido precisa penetrar nas falhas para que possam ser reveladas adequadamente.

Figura 3: Ensaio não destrutivo por Líquido Penetrante



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

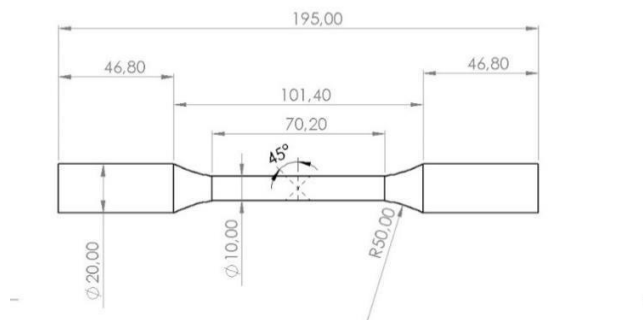
2.11 ENSAIOS DESTRUTIVOS

De acordo com Coroa (2023), os ensaios mecânicos destrutivos são caracterizados por deixarem marcas ou danos permanentes nos materiais após sua realização, sendo amplamente utilizados na indústria para a análise de falhas e verificação do comportamento mecânico dos materiais. Entre os tipos mais comuns, destacam-se os ensaios de tração, dobramento e cisalhamento. Zolin (2011) ressalta que, mesmo quando os danos aparentes são mínimos, como ocorre no ensaio de dureza, o material torna-se inutilizável, uma vez que as marcas geradas podem atuar como concentradores de tensões, favorecendo o surgimento de falhas estruturais.

2.11.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração tem como objetivo avaliar a resistência mecânica e a ductilidade da junta soldada. Em geral, para juntas de baixa espessura, o corpo de prova é retirado transversalmente ao cordão de solda (Madeira; Modenesi, 2010), conforme ilustrado na Figura 5. O procedimento consiste em submeter o metal base (MB) a um esforço uniaxial de tração progressiva até o ponto de ruptura.

Figura 5: Desenho técnico para confecção de corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: adaptado da norma ISO 6892-1:2013.

Segundo Castro *et al.* (2017), a ruptura do corpo de prova pode ocorrer tanto no metal base (MB) quanto no metal de solda (MS), sendo analisados, para fins de avaliação da viabilidade da solda, o limite de resistência (LR) e o alongamento (AL). Quando a ruptura ocorre no MB, a junta soldada não é submetida ao seu limite máximo de resistência, o que inviabiliza comparações precisas entre as propriedades mecânicas da solda e do material de base. Por outro lado, quando a fratura ocorre na junta, os resultados obtidos sofrem influência direta da deformação do MB.

2.11.2 Ensaio de impacto (Charpy)

Pereira, B. (2020) explica que o ensaio de impacto do tipo Charpy tem como objetivo avaliar a tenacidade dos materiais ao submetê-los a um golpe de pêndulo em um corpo de prova entalhado, sendo a energia absorvida determinada com base no movimento residual do pêndulo após o impacto. Realizado em diferentes temperaturas,

o teste permite distinguir rupturas frágeis das dúcteis, sendo amplamente utilizado na certificação de aços e em aplicações industriais que exigem segurança estrutural. Segundo Guesser (2009), conforme estabelecido pela norma ISO 1083/JS350-22RT/S, a resistência ao impacto do ferro fundido nodular à temperatura ambiente apresenta, em média, um valor de 17 J, conforme demonstrado no Quadro 4.

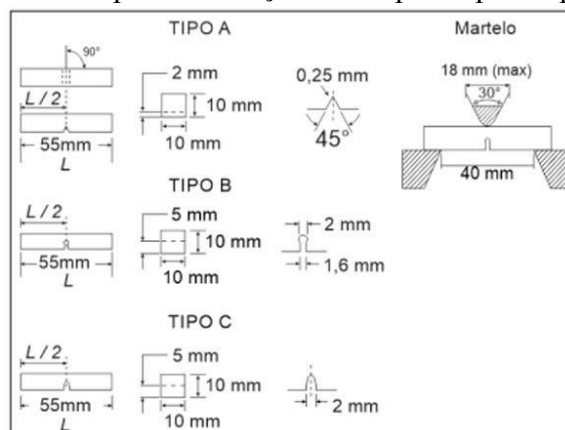
Quadro 4: Resistência ao impacto

	Valores mínimos de resistência ao impacto, em Joules					
	À temperatura ambiente 18-28°C		a -20°C		a -40°C	
	média de 3 ensaio	Valor mínimo	média de 3 ensaio	Valor mínimo	média de 3 ensaio	Valor mínimo
ISO1083/JS/350-22-IT/S	-	-	-	-	12	9
ISO1083/JS/350-22-RT/S	17	14	-	-	-	-
ISO1083/JS/400-18-IT/S	-	-	12	9	-	-
ISO1083/JS/400-18-RT/S	14	11	-	-	-	-

Fonte: Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos, Guesser, 2009.

De acordo com a norma ASTM E-23, conforme descrito por Cardoso (2023), os corpos de prova utilizados no ensaio de impacto do tipo Charpy são classificados em três categorias, com base no formato do entalhe: o tipo A apresenta um entalhe em "V", com ângulo de 45° e profundidade de 2 mm; o tipo B possui um entalhe cilíndrico em forma de "chave de fechadura"; e o tipo C apresenta um entalhe em "U", com 2 mm de diâmetro na extremidade e 5 mm de profundidade. Neste estudo, foi adotado o corpo de prova tipo A, considerado adequado para materiais de menor resistência mecânica, conforme a recomendação do autor.

Figura 6: Desenho técnico para confecção do corpo de prova para ensaio Charpy



Fonte: Medidas recomendadas pela ASMT E-23, Cardoso, 2023.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa, de natureza experimental e bibliográfica, conduziu as etapas de usinagem, pré-aquecimento, soldagem, ensaios de resistência mecânica e análises micrográficas foram realizadas nos Laboratórios de Processos de Fabricação,

Resistência dos Materiais e Ciência e Tecnologia dos Materiais do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), situado no Bloco I, no município de Patos de Minas, MG.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O Quadro 5 apresenta a quantidade de amostras confeccionadas, a partir de uma barra de ferro fundido nodular fornecida pelo UNIPAM. Esse tipo de ferro fundido é amplamente utilizado na fabricação de peças e componentes de diversos equipamentos e máquinas, em função de suas propriedades mecânicas favoráveis.

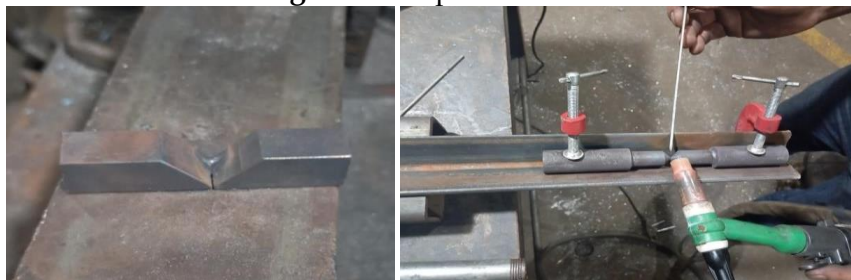
Quadro 5: Quantidade de amostras confeccionadas

Tração	Quantidade	Charpy	Quantidade
Eletrodo	3	Eletrodo	3
TIG	3	TIG	3

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com os desenhos técnicos apresentados nas Figuras 5 e 6, correspondentes, respectivamente, aos ensaios de tração e de impacto Charpy. A usinagem foi realizada utilizando uma fresadora KONE, modelo KFU2 (Apêndice – Figura 1A), para os corpos de prova destinados ao ensaio Charpy, e um torno mecânico Clever L-1640 (Apêndice – Figura 1B) para os corpos de prova do ensaio de tração, em conformidade com as normas técnicas aplicáveis. Os chanfros para a soldagem foram executados com ângulos de 45°, conforme padrão técnico. A Figura 7 apresenta os corpos de prova prontos para o processo de soldagem.

Figura 7: Corpos de Prova



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após o processo de usinagem, as amostras foram submetidas ao pré-aquecimento em um forno tipo mufla, conforme ilustrado na Figura 8. As amostras permaneceram a uma temperatura de 500 °C por 20 minutos. Tal procedimento segue a recomendação de Júnior Tigre e Folha (2020), segundo a qual, na soldagem a quente, as peças devem ser aquecidas entre 400 °C e 500 °C, sendo imprescindível um resfriamento uniforme e lento após a soldagem. Essa etapa é fundamental para evitar contrações térmicas abruptas que podem ocasionar fissuras no material.

Figura 8: Mufla ou forno mufla

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após o aquecimento, as amostras foram soldadas utilizando a fonte de soldagem multiprocessos ESAB EMP 215ic, pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação do UNIPAM, conforme ilustrado na Figura 9. Todas as amostras foram soldadas imediatamente após a retirada do forno, de modo a preservar a temperatura adequada para o procedimento de soldagem a quente.

Figura 9: Fonte de solda ESAB EMP 215ic

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Metade das amostras foi soldada pelo processo SMAW, utilizando eletrodo revestido com alma de níquel puro ($2,5 \times 210$ mm) e três faixas de corrente: 70 A, 80 A e 90 A. A outra metade foi submetida ao processo TIG (GTAW), empregando varetas de níquel puro com as mesmas dimensões e faixas de corrente. A seleção dessas intensidades de corrente baseou-se em testes preliminares, que permitiram determinar os limites operacionais aceitáveis para este estudo.

Figura 10: Eletrodo com alma de níquel puro, OK 92.18



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após a soldagem, iniciaram-se os testes e análises da resistência das juntas soldadas, com a aplicação preliminar de ensaios não destrutivos. A primeira etapa consistiu na inspeção visual das regiões soldadas, com o objetivo de descartar quaisquer amostras que apresentassem descontinuidades ou trincas visíveis a olho nu, conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11: Corpos e prova soldados, análise visual



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Todos os corpos de prova foram confeccionados com sobremetal, de modo a permitir nova usinagem após a soldagem, garantindo uniformidade nas dimensões de diâmetro e comprimento, conforme ilustrado na Figura 2 do Apêndice. Após essa etapa e a realização da inspeção visual, aplicou-se o ensaio por líquido penetrante, com o uso de revelador específico, a fim de identificar fraturas ou trincas não detectadas na análise inicial, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12: Análise com líquido penetrante

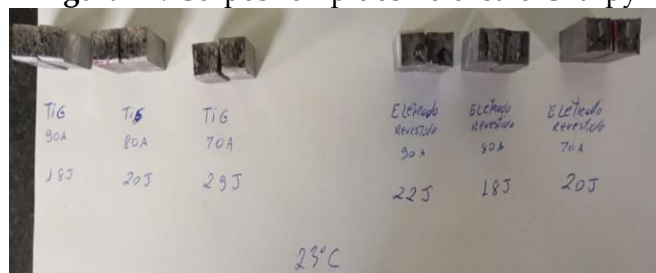
Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Com as amostras devidamente inspecionadas, iniciaram-se os ensaios mecânicos destrutivos, sendo o primeiro o ensaio de tração. Para esse procedimento, foi utilizada uma máquina universal de ensaios do modelo EMIC, conforme ilustrado na Figura 3(A) do Apêndice. A Figura 13 apresenta os corpos de prova após a fratura provocada pelo ensaio.

Figura 13: Corpos de prova tracionados

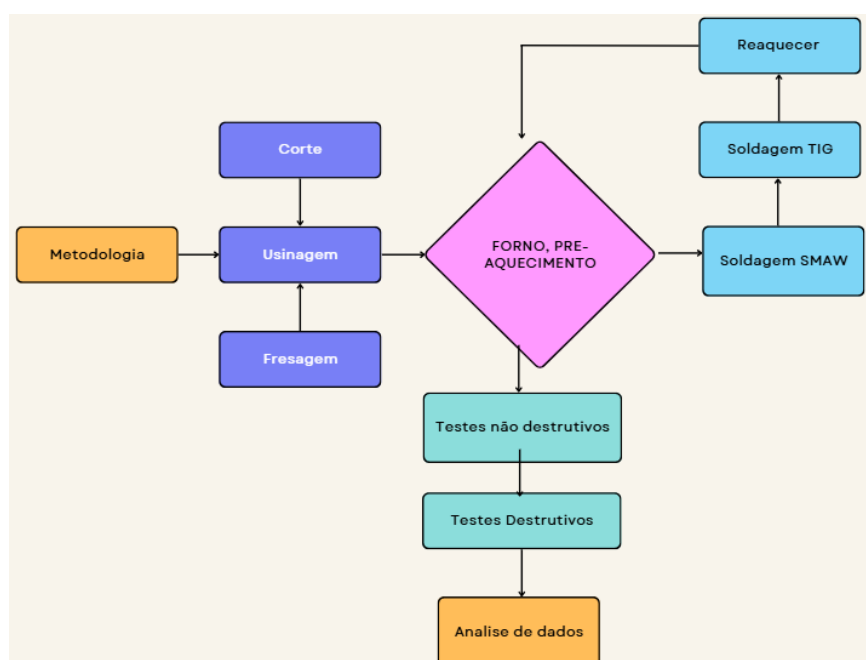
Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Após os ensaios de tração, foram realizados os ensaios de resistência ao impacto, utilizando o equipamento Pêndulo de Impacto Penamatec ATMI, conforme apresentado na Figura 3(B) do Apêndice. O ensaio foi conduzido com um martelo capaz de aplicar uma energia de impacto de até 300 Joules. A Figura 14 mostra os corpos de prova fraturados em decorrência do ensaio Charpy.

Figura 14: Corpos rompidos no ensaio Charpy

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

A Figura 15 apresenta o fluxograma da metodologia empregada, conforme descrito anteriormente.

Figura 15: Fluxograma da metodologia

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram que, durante os ensaios, o processo de soldagem TIG apresentou superioridade no acabamento dos cordões, demonstrando boa qualidade visual e ausência de defeitos aparentes. Em contrapartida, as juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido (SMAW) apresentaram irregularidades, como respingos, presença de escória, falta de fusão e porosidade — defeitos mais recorrentes nas amostras soldadas com corrente de 70 A. Tais falhas foram confirmadas por meio dos ensaios com líquido penetrante e observação das fraturas.

Observou-se, ainda, que o tratamento térmico adequado, especialmente o pré-aquecimento e o resfriamento controlado, foi determinante para o sucesso dos processos de soldagem, uma vez que nenhuma das amostras apresentou trincas ou descontinuidades nas juntas soldadas ou nas zonas termicamente afetadas (ZTA).

O Quadro 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração e impacto (Charpy). De acordo com a norma ISO 15614-1, a tensão de ruptura das juntas soldadas não deve ser inferior ao limite mínimo de resistência à tração do material base, que, no caso do ferro fundido nodular, é de 380 MPa. Quanto à resistência ao impacto, segundo a norma ISO 1083/JS350-22RT/S, o valor médio aceitável, à temperatura ambiente, é de 17 J.

Quadro 6: Resultados dos ensaios destrutivos

Número das amostras e corrente de soldagem (A)	Tipos de Soldagem	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Energia Absorvida (Charpy) [J]
(1) 90A	TIG	281,64	279,48	18
(2) 80A	TIG	339,95	280,88	20
(3) 70A	TIG	346,07	306,47	29
(1) 90A	ELETRODO	351,29	326,33	22
(2) 80A	ELETRODO	213,39	205,37	18
(3) 70A	ELETRODO	91,38	33,75	20
Média total dos ensaios Chapy				21

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Os dados apresentados no Quadro 6 indicam que o processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW) demonstrou-se mais vantajoso quando aplicado com corrente elétrica adequada. A amostra 1, soldada com 90 A, obteve um valor de 351,29 MPa no ensaio de tração, aproximando-se do limite mínimo estabelecido pela norma para o ferro fundido nodular (380 MPa). Esse processo mostrou-se eficiente para aplicações em áreas extensas, dada sua maior rapidez de execução. No entanto, em regiões de menor dimensão, observou-se dificuldade na remoção da escória e de impurezas, principalmente quando utilizadas correntes mais baixas, o que resultou em inclusões de escória e falhas de fusão.

Por sua vez, o processo de soldagem TIG (GTAW), apesar de mais lento, proporcionou cordões de solda mais limpos, com ausência de escória e menor incidência de defeitos de fusão. Nos ensaios de tração, a amostra soldada com corrente de 70 A apresentou o melhor desempenho. As amostras soldadas com 80 A e 90 A, contudo, mostraram queda de resistência, atribuída à formação de zonas de aquecimento excessivo. Conforme evidenciado na revisão bibliográfica, esse superaquecimento pode promover a transformação da estrutura do ferro fundido nodular em ferro fundido branco, reduzindo significativamente sua resistência à tração do material.

Os ensaios de resistência à tração apresentaram resultados inferiores aos limites estabelecidos pelas normas de referência. Contudo, os ensaios de impacto Charpy demonstraram desempenho satisfatório, com média de 21 J. Destacou-se, nesse contexto, a amostra soldada pelo processo TIG com corrente de 70 A, que apresentou os melhores

resultados de tenacidade. As Figuras 5, 6 e 7 do apêndice ilustram os gráficos de tensão versus deformação obtidos nos ensaios de tração.

Dessa forma, conclui-se que, sob condições controladas de pré-aquecimento, soldagem e resfriamento, ambas as técnicas analisadas (SMAW e TIG) apresentam aplicabilidade mínima aceitável para intervenções de manutenção ou recuperação de componentes fabricados em ferro fundido nodular.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que ambas as técnicas de soldagem analisadas – TIG (GTAW) e eletrodo revestido (SMAW) – apresentaram características relevantes e aplicabilidades distintas, a depender das condições operacionais e do objetivo do processo. O processo TIG, embora mais lento e com custos elevados devido ao uso de gás inerte e à necessidade de maior qualificação técnica, demonstrou ser adequado para aplicações de menor escala, nas quais se exige melhor acabamento superficial e maior controle da qualidade da solda, evidenciado pela ausência de defeitos como inclusões de escória ou falta de fusão.

Por outro lado, o processo de soldagem com eletrodo revestido apresentou-se mais vantajoso para aplicações de maior porte, especialmente quando operado em faixas de corrente adequadas. Sua simplicidade operacional, menor custo e maior produtividade fazem dele uma alternativa economicamente viável, sobretudo quando se considera a necessidade de recuperação ou manutenção de peças em ferro fundido nodular.

Embora os resultados dos ensaios de tração tenham se mostrado abaixo dos limites estabelecidos pelas normas de referência para ambas as técnicas, o processo de eletrodo revestido obteve desempenho superior, sobretudo em termos de custo-benefício e resistência mecânica relativa. Assim, com base nos parâmetros experimentais adotados neste estudo, a soldagem de ferro fundido nodular utilizando eletrodo revestido demonstrou ligeira vantagem em relação ao processo TIG.

REFERÊNCIAS

ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Relatório de desempenho do setor de fundição** — dezembro/ 2020. Disponível em: <https://www.abifa.org.br>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A159**: Standard Specification for Automotive Gray Iron Castings. Pennsylvania: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-G E190-92**. Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds. American Society for testing and Materials. West Conshohocken, 2008.

ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos penetrantes**. ABENDI, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13187**: requisitos da qualidade para soldagem por fusão de materiais metálicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13187**: tratamentos térmico e termoquímico de ferro fundido – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 14842**: soldagem - critérios para a qualificação e certificação de inspetores para o setor de petróleo e gás, petroquímico, fertilizante (exceto nucleares). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR ISO 6892-1**: materiais metálicos-ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. 2013.

BUENO, Alex Fabiano. **Utilização de insertos com agregado sólido de lubrificantes confeccionados por metalurgia do pó convencional**. 2016. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/134921>.

CARDOSO, Vinicius Sales. **Análise por elementos finitos de um corpo de prova Charpy-V de um aço API 5CT N80Q**. 2023. 72 p. TCC (Graduação Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/242500>.

CASTRO, Nara Linhares B. *et al.* Ensaios para determinação de resistência em juntas soldadas. **Revista Construindo**, v. 09, n. 02, p. 57, dez. 2017. Disponível em: <https://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/5759>.

COROA, Edgar Bergo. **Ensaios destrutivos e não destrutivos em cordão de solda a gás inerte com eletrodo de tungstênio na fabricação de tanques de aquecedor solar com espessura de chapa reduzida**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/19700>.

FERES, Fernanda. Ferro fundido nodular pode substituir o aço carbono: utilização de barras de ferro fundido nodular na fabricação de componentes originalmente produzidos com aço resulta em redução de custos. **O mundo da usinagem**, Online, n. 65, p. 34-35, 2017. Disponível em: https://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/omu65_15_03_10.pdf.

GUESSER, Wilson Luiz. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF NORMALIZATION. **ISO 15614-2:**

Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 2: Arc welding of cast iron. Londres: ISO, 2005.

LI, Yongjian *et al.* Surface remanufacturing of ductile cast iron by laser cladding Ni-Cu alloy coatings. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 347, p. 20-28, ago. 2018.

Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.065>.

LOPES, Francisco Luiz Campos *et al.* Diagnóstico da durabilidade e capacidade mecânica de uma viga portuária em concreto armado através de ensaios não destrutivos, semi destrutivos, destrutivos e laboratoriais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS*, 14., 2023, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. CBPE, 2024. p. 1-10.

MADEIRA, Rodrigo Pereira; MODENESI, Paulo J. Utilização do ensaio erichsen para a avaliação do desempenho de juntas soldadas. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 1, p. 22-30, mar. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242010000100004>.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, v. 26, 2008.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MOL, Natália Sodré da Silveira; SILVA, Charles Luís da. Comparação do desempenho dos processos TIG e eletrodo revestido na soldagem do ferro fundido vermicular. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 004-006, 27 nov. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl2iss4pp004-006>.

PEREIRA, Bruno Domingues. **Inspeção de Juntas Soldadas**: estudo da influência da entrega térmica. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2020.

PEREIRA, Lucas Andrade Guerra. **Inspeção visual e avaliação de juntas soldadas da estrutura metálica de um prédio por meio do ensaio não destrutivo de líquido penetrante**. 2021. 71 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

REIS, Alcione dos. **Fresamento frontal de ferros fundidos de alta resistência**. 2019. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2543>.

REIS, Bárbara Cristina Mendanha. **Influência da adição de nióbio sobre a usinabilidade de ferro fundido cinzento perlítico na operação de torneamento**. 2021. 200 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, ENG - Departamento de Engenharia Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/35884>.

SILVA, Joélson Vieira da. **Estudo da influência do tratamento térmico de austenitização seguida de resfriamento ao ar forçado na resistência ao desgaste abrasivo do ferro fundido branco ASTM A532 II D**. 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/170956>.

SILVA, Mário Lucas Santana *et al.* Soldabilidade em ferro fundido. **Perspectivas Online**: Exatas & Engenharias, [S. l], v. 4, n. 10, p. 26-34, 2015. Disponível em: https://www.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia/article/view/454.

SOUZA, Alan Douglas Silva e. **Estudo sobre o ferro fundido nodular**. 2021. 15 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica), Faculdade Anhanguera, Pindamonhangaba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/handle/123456789/50223>.

SOUZA, Augusto César de. **Estudo da recuperação de peças de ferro fundido modular por processo de soldagem**. 2018. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/229>.

TIGRE JÚNIOR, Ademilson Garcia; FOLHA, Marlan dos Santos. **Análise de juntas soldadas por processos de soldagem tig e eletrodo revestido através de técnicas de inspeção não destrutivas**. 2020. 43 f. TCC (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica, Faculdade Vale do Cricaré, São Mateus, Espírito Santo, 2020.

VIDAL, Douglas Ferreira. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino**. 2013. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

ZOLIN, I. **Ensaaios mecânicos e análises de falhas**. 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria — Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

APÊNDICE

Figura 1: Máquinas para usinagem: (A) Fresadora Universal KFU 2 e (B) Torno Clever L – 1640



(A)

(B)

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 2: Corpos de prova soldados e com medidas finais



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

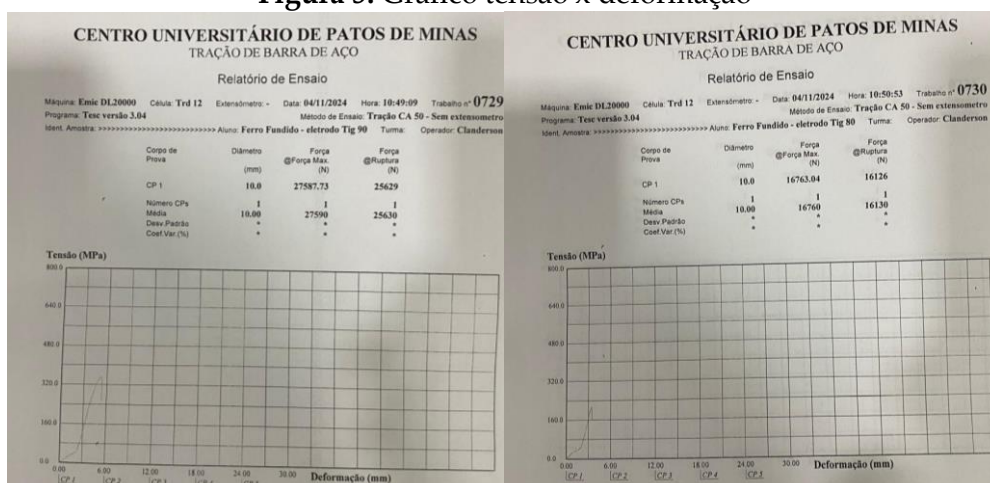
Figura 3: Equipamentos para ensaios mecânicos em materiais



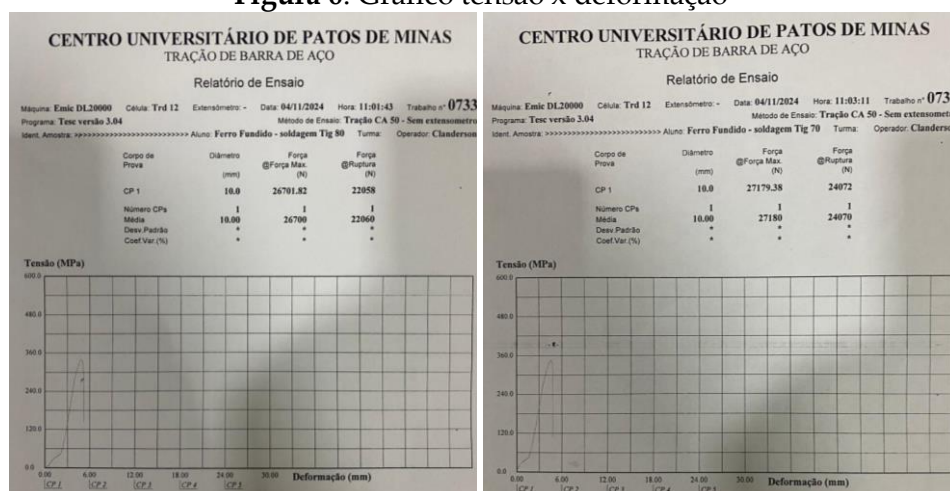
(A)

(B)

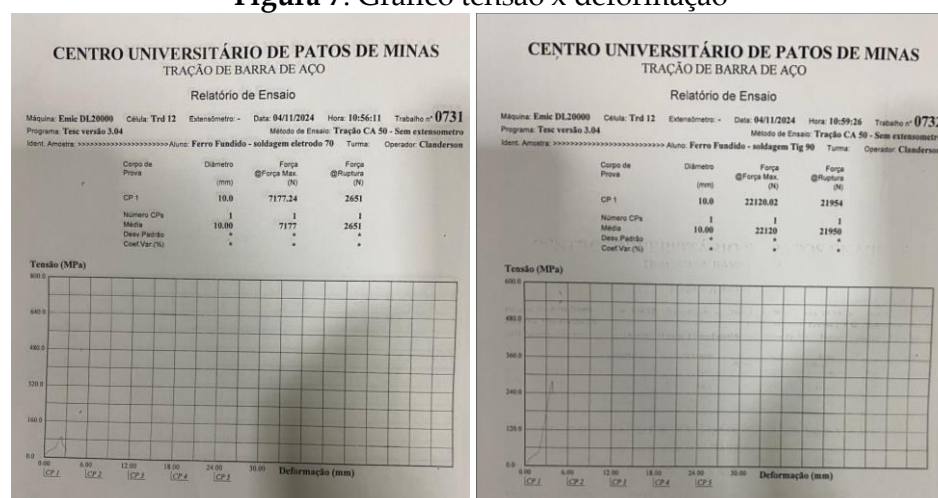
Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 5: Gráfico tensão x deformação

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 6: Gráfico tensão x deformação

Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 7: Gráfico tensão x deformação

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.