

# Avaliação da Influência do Magnetismo Residual na Soldagem GTAW de Peças Inspeccionadas pelo Método de Partículas Magnéticas

Fagner Guilherme Ferreira Coelho<sup>1</sup> , Lucas Pereira Marinho<sup>1</sup> , Ariel Rodriguez Arias<sup>1</sup> , Adriano Schimer Silva<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Metalchek, Bragança Paulista, SP, Brasil.

**Como citar:** Coelho FGF, Marinho LP, Rodriguez Arias A, Silva AS. Avaliação da influência do magnetismo residual na soldagem GTAW de peças inspeccionadas pelo método de partículas magnéticas. Soldagem & Inspeção. 2024;29:e2906. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI29.06>

**Resumo:** O ensaio não-destrutivo por partículas magnéticas é uma técnica amplamente utilizada na indústria para identificação de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos, tanto nas etapas de fabricação (peças semiacabadas) quanto em condições de serviço. As peças precisam ser submetidas a um campo magnético, o qual possibilita a movimentação das partículas magnéticas e o acúmulo em regiões com descontinuidades. Todavia, o magnetismo residual pode ocasionar problemas em etapas de processamento, como a soldagem e usinagem. Nesse sentido, o presente trabalho se propôs a investigar o comportamento de peças que são submetidas a inspeção magnética e as possíveis consequências do magnetismo residual. As peças de diferentes composições químicas foram submetidas ao ensaio e tiveram os valores de intensidade de campo magnético medidos e passaram por etapas de soldagem (GTAW). Foi possível identificar a ocorrência, em baixa intensidade, do fenômeno de sopro magnético durante a soldagem. Por não representar um risco elevado ao resultado da solda, pôde-se concluir que, para esse caso especificamente e sob as condições estabelecidas para os experimentos, a desmagnetização após o ensaio é facultativa. A desmagnetização após os processos de soldagem pode ser explicada pelo aumento da temperatura acima do ponto de Curie.

**Palavras-chave:** Ensaio não-destrutivo; Partículas magnéticas; Magnetismo residual; Desmagnetização; Soldagem.

## Evaluation of the Influence of Residual Magnetism on GTAW Welding of Parts Inspected by the Magnetic Particle Method

**Abstract:** Non-destructive magnetic particle testing is a technique widely used in industry to identify surface and subsurface discontinuities in ferromagnetic materials, both in the manufacturing stages (semi-finished parts) and in service conditions. The parts need to be subjected to a magnetic field, which allows magnetic particles to move and accumulate in areas with discontinuities. However, residual magnetism can cause problems in processing stages such as welding and machining. With this in mind, this study set out to investigate the behavior of parts subjected to magnetic inspection and the possible consequences of residual magnetism. Parts of different chemical compositions were subjected to the test and had the magnetic field strength values measured and underwent welding steps (GTAW). It was possible to identify the low-intensity occurrence of the phenomenon of magnetic blowing during welding. As it does not represent a high risk to the result of the weld, it can be concluded that, for this specific case and under the conditions established for the experiments, demagnetization after the test is optional. Demagnetization after the welding processes can be explained by the increase in temperature above the Curie point.

**Key-words:** Non-destructive testing; Magnetic particles; Residual magnetism; Demagnetization; Welding.

### 1. Introdução

Ensaio mecânico são amplamente utilizados na indústria de transformação para diferentes finalidades, como caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais, simular condições de operação de componentes, investigar a integridade de peças, prevenir contra ocorrência de falhas, auxiliar no controle de qualidade, entre outras. Tais ensaios podem ser classificados como destrutivos e não-destrutivos [1]. O primeiro diz respeito a técnicas nas quais ocorre o rompimento ou deformação de amostras do material a ser analisado, o que, normalmente, inutiliza seu uso posterior. O segundo contempla os procedimentos adotados para detecção de descontinuidades, os quais não afetam ou causam prejuízos ao funcionamento posterior da peça.

Recebido: 14 Jun., 2023. Aceito: 20 Fev., 2024.

E-mails: fgfcoelho@yahoo.com.br (FGFC), lucasparmarinho87@gmail.com (LPM), ariela2506@gmail.com (ARA), adriano@metalchek.com.br (ASS)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Os ensaios não-destrutivos (END's) compreendem diferentes técnicas utilizadas para inspecionar, avaliar, testar e monitorar componentes mecânicos no que diz respeito à existência de descontinuidades ou à ocorrência de variações das propriedades estruturais, as quais podem gerar perda de resistência e culminar na falha do material. Tais ensaios também permitem monitorar as condições operacionais de máquinas, garantir integridade e medir características físicas e geométricas [2,3]. Os END's possuem um papel fundamental no controle de qualidade durante todos os estágios do processo produtivo, tanto de produtos acabados quanto semiacabados [4].

A escolha pelo método de ensaio para cada situação está relacionada a fatores como o tipo de material a ser inspecionado, o custo de realização do ensaio, o tipo de propriedade a ser verificada, a disponibilidade de mão de obra especializada, escolha e capacidade de detecção de descontinuidades de cada técnica e a velocidade de execução, uma vez que a automatização do processo pode ser requerida em determinados casos [3]. A Figura 1 relaciona algumas descontinuidades superficiais e subsuperficiais aos diferentes métodos de END, com destaque do uso de energia eletromagnética.

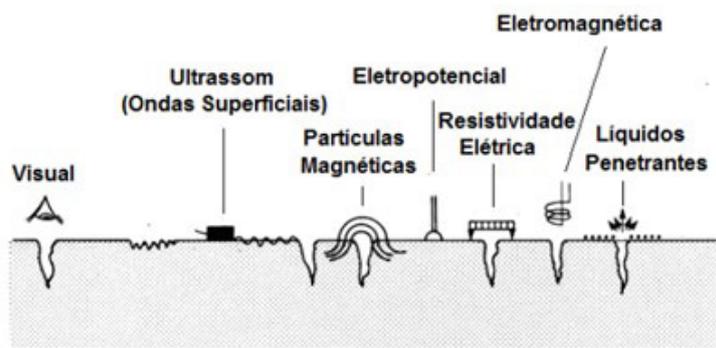


Figura 1. Descontinuidades superficiais e subsuperficiais e seus métodos de detecção [4].

O uso do ensaio por partículas magnéticas requer cuidado e atenção, uma vez que campo residual pode permanecer na peça após o processo, caso a desmagnetização não seja realizada. A necessidade dessa etapa secundária depende do material do componente inspecionado, da sua retentividade magnética e da sua aplicação e, nos casos em que elas são negligenciadas, o magnetismo residual pode provocar efeitos adversos em etapas subsequentes de processamento, como a usinagem e a soldagem.

## 2. Magnetismo nos Materiais

De modo geral, o campo magnético pode ser entendido como uma região do espaço onde as cargas elétricas em movimento estão sujeitas à ação de uma força capaz de alterar suas trajetórias. Sua visualização é possível, por exemplo, quando partículas ferromagnéticas são pulverizadas sobre um ímã e se alinham na direção do campo magnético, indicando, assim, as chamadas linhas de indução ou linhas de fluxo [1].

O vetor de indução magnética  $\vec{B}$ , representado na Figura 2, caracteriza a ação exercida por um ímã em cada ponto do campo magnético, de modo a indicar a concentração das linhas de indução em uma pequena região que contém o ponto considerado.

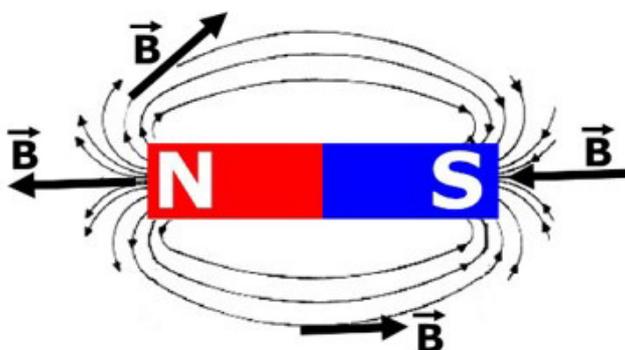


Figura 2. Representação das linhas de indução [1].

A intensidade do campo magnético no sistema internacional (SI) é o tesla (T), porém pode-se também utilizar o Gauss (G), que obedece à seguinte relação apresentada na Equação 1.

$$1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss} = 1 \frac{\text{newton}}{\left(\frac{\text{coulomb}}{\text{segundo}}\right)(\text{metro})} = 1 \frac{N}{A \cdot m}. \text{ A} \quad (1)$$

A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) define a facilidade com que um material pode ser magnetizado. Ela consiste na relação entre a condutividade magnética do material e a condutividade magnética do ar. Quando  $\mu > 1$ , os materiais são ferromagnéticos, ou seja, são fortemente atraídos por um ímã, a exemplo dos aços. Para  $\mu = 1$ , os materiais são paramagnéticos e são levemente atraídos por um ímã, a exemplo do alumínio. Por fim, quando  $\mu < 1$ , os materiais são chamados diamagnéticos e são levemente repelidos por um ímã, a exemplo do cobre [1].

Além da permeabilidade, há ainda dois termos que são utilizados quando se trata da magnetização, que são: retentividade, que diz respeito à capacidade de um material reter uma parte do campo magnético após a interrupção da força magnetizante. Já a força coercitiva está relacionada à magnetização inversa que, quando aplicada ao material, é capaz de anular o campo residual [5]. A tendência apresentada por materiais ferromagnéticos de conservar a magnetização adquirida mediante a aplicação de um campo magnético externo é denominada histerese, e a Figura 3 demonstra um aumento gradual e obtém-se a curva de magnetização.

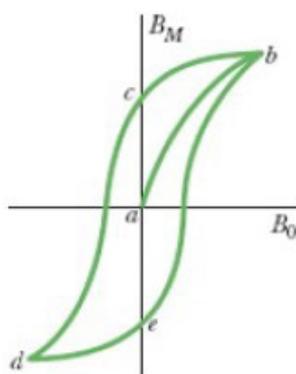


Figura 3. Curva de magnetização [6].

A curva de magnetização ( $ab$ ) de um material ferromagnético e o laço de histerese associado ( $bcdeb$ ) não se repete quando o campo magnético  $B_0$  é aumentado e, em seguida, reduzido, como ilustrada na Figura 4,  $B_M$ , por sua vez, representa um campo magnético induzido no interior no material. O laço de histerese caracterizado pela curva  $bcdeb$  demonstra a falta de repetitividade do processo. Pode-se perceber que, nos pontos  $c$  e  $e$ , há um magnetismo residual. Isso é explicado pelo fato de que o campo magnético externo ( $B_0$ ) faz com que os domínios magnéticos alinhem os dipolos magnéticos dos átomos com o campo magnético externo. O alinhamento desses pequenos domínios magnéticos produz um campo magnético resultante não nulo, induzido no interior do material ( $B_M$ ). Portanto, quando o campo magnético  $B_0$  é aumentado e depois reduzido novamente ao valor inicial, os domínios não voltam à configuração original, mas guardam certa “memória” do alinhamento que adquiriram após o aumento inicial.

A complexidade da desmagnetização depende, basicamente, do tipo do material e da geometria da peça. O processo consiste em submeter a peça magnetizada a um campo magnético continuamente reversivo e que tem sua força reduzida gradualmente. Mesmo que a peça continue com um certo resíduo, o campo pode ser reduzido a níveis de intensidade considerados aceitáveis. O princípio da técnica é explicado pela curva de histerese ilustrada na Figura 4, na qual a corrente inversa aparece em formato de onda na parte de baixo do gráfico e o formato de onda do lado direito representa o fluxo magnético na peça. À medida que o valor da corrente diminui em cada reversão, o *loop* de histerese encolhe e traça um caminho menor. Vale citar que as duas curvas estão em função do tempo e, quando a corrente é zerada, o campo residual na peça o acompanha [7].

Todos os materiais ferromagnéticos retêm algum magnetismo residual, cujo valor depende da sua retentividade, embora o magnetismo residual não afete as propriedades mecânicas da peça, ele pode provocar a adesão de cavacos e partículas na superfície do material, o que afeta etapas posteriores de usinagem, soldagem, eletrodeposição e pintura, por exemplo. Além disso, pode influenciar na leitura de instrumentos sensíveis. Por isso, recomenda-se a desmagnetização das peças ensaiadas em determinados casos [8]. Nesse sentido, abaixo são apresentadas algumas diferentes situações quanto a desmagnetização de peça:

Desmagnetização da peça se faz necessária [9]:

- Pintura;
- Outra etapa de magnetização a níveis menores;
- Usinagem;
- Processo de Soldagem a arco elétrico;

Utilizada em aeronaves com instrumentos sensíveis a campos magnéticos.  
Desmagnetização da peça não se faz necessária [10]:

- Constituída de aço baixo carbono e baixa retentividade;
- Componente estrutural a base de ferro fundido;
- Tratamento térmico com temperatura acima de 770°C;
- Retífica com base magnética.

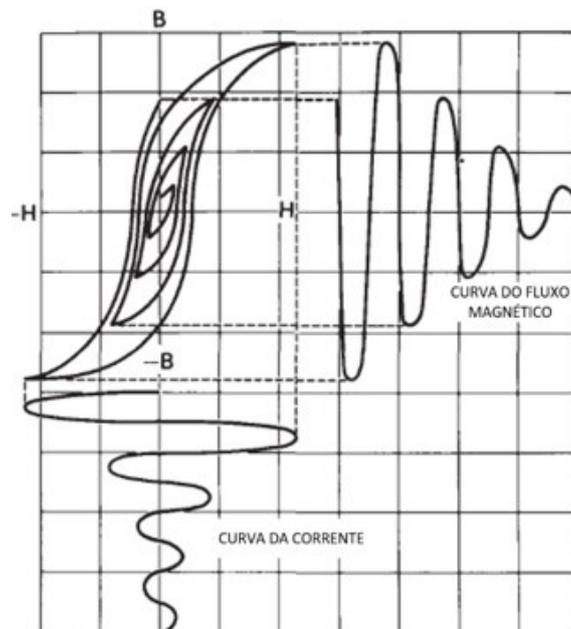


Figura 4. Curva de histerese durante desmagnetização [7].

A soldagem de materiais ferromagnéticos é muitas vezes acompanhada pela deflexão, instabilidade e até extinção do arco elétrico, devido a um fenômeno indesejável denominado sopro magnético. Como consequência, obtém-se um cordão não uniforme, além da ocorrência de problemas como inclusão de escória e porosidade. Tal fenômeno está associado à existência de campos magnéticos, os quais se formam ao redor do arco elétrico e de qualquer outro condutor de corrente [11]. Estudos apontam que densidades de fluxo iguais ou superiores a 4 mT são suficientes para promover distúrbios ao arco elétrico [11]. Ademais, na ocorrência do sopro magnético, pode-se optar pela técnica de inclinar o eletrodo no intuito de contrabalancear a deflexão do arco. É válido citar, ainda, que a solda com corrente alternada é menos propensa à ocorrência do sopro, já que são induzidas correntes parasitas na junta que reduzem o efeito de um campo magnético externo [7].

### 3. Sopro Magnético

Quando a corrente elétrica passa por um condutor, é criado um campo à volta deste, no qual se formam forças magnéticas. Este campo magnético pode ser revelado com o uso de uma agulha magnética ou um pó de ferro que se orienta em torno do condutor. Este tipo de campos magnéticos ocorre também na soldagem por arco elétrico, ocorre em torno do eletrodo, do arco e do percurso da corrente na peça de trabalho. Devido à sua disposição, os campos magnéticos afetam o arco em movimento, que começa então a deslocar o arco. A interação entre o campo elétrico e o campo eletromagnético promove, o que é chamado de sopro do arco pode afetar a estabilidade do arco elétrico e promove sua deflexão. O sopro só é relevante para valores de corrente elevados (como regra geral, se a intensidade do campo magnético for superior a  $50 \times 10^{-4}$  tesla pode ocorrer um sopro de arco) [12,13].

A ocorrência do sopro magnético é proveniente de: geometria da peça de trabalho; presença de folga excessiva na junta; grande massa ferromagnética; deslocamento do fluxo de gás devido ação de correntes de ar; comprimento excessivo do arco; corrente de soldagem elevada; polaridade (CC); preparação incorreta da superfície; velocidade de deslocação inadequada.

Os modos de se evitar a ocorrência do sopro magnético: uso de múltiplas ligações do terra; adotar extensões de separadores de materiais ferro magnéticos nas extremidades do cordão de solda; utilizar CA de modo que as correntes “parasitas” induzidas, geram um campo magnético induzido oposto ao original, resultando na eliminação do sopro magnético, mesmo para correntes elevadas.

#### 4. Materiais e Métodos

A avaliação dos efeitos causados pelo magnetismo residual se deu por meio de partículas magnéticas, via seca em corpos de prova de diferentes materiais, os quais foram submetidos posteriormente ao processo de soldagem TIG autógena.

Para magnetização das peças no ensaio de partículas magnéticas, utilizou-se o *yoke* eletromagnético manual de corrente alternada, conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5. Yoke manual.

Principais características, segundo dados do fabricante e do certificado de calibração:

- Distância entre polos: 164 mm;
- Força magnetizante: 17 A/cm a 65 A/cm;
- Tensão de alimentação: 220V;
- Corrente de entrada: 1,8 A.

De modo a obter um maior valor do campo magnético, um equipamento estacionário que promove a passagem de corrente elétrica, resulta na geração de um campo magnético circular. Esta máquina é composta por 3 módulos, como ilustra a Figura 6: a primeira parte, à esquerda (A), é uma bobina para desmagnetização; na parte central (B), um sistema pneumático acionado por pedal permite a fixação da peça e ocorre a passagem de corrente; a terceira parte, à direita (C), consiste em uma cabine com luz ultravioleta na qual a peça já magnetizada é colocada para avaliação da existência de descontinuidades.

A máquina dispõe, ainda, de uma chave seletora para ajuste do respectivo valor de corrente de acordo com o diâmetro da peça a ser magnetizada, como apresentado os valores na Tabela 1.

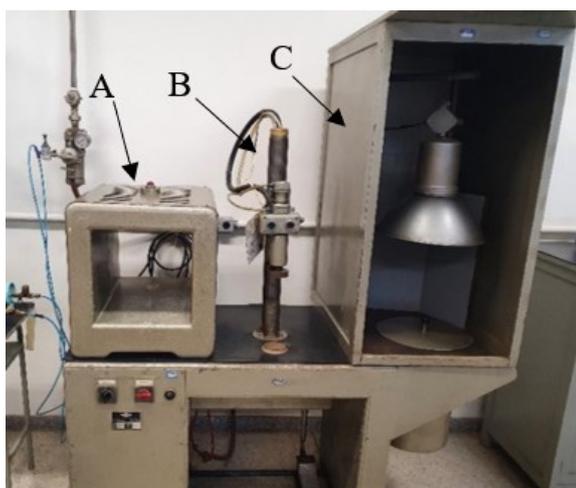


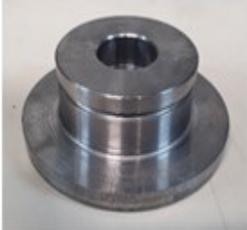
Figura 6. Máquina estacionária DEUTROFLUX para magnetização circular.

Foram utilizados 10 corpos de prova de diferentes materiais e dimensões nos ensaios, os quais serão apresentados na Tabela 2. As peças tiveram suas classificações comprovadas mediante os certificados que acompanharam os mesmos nas respectivas aquisições.

**Tabela 1.** Valor de corrente de acordo com dimensão da peça [Adaptado DEUTROFLUX].

Posição da chave seletora	Diâmetro da peça (mm)	Corrente (A)
1	até 25	500
2	25 – 30	1000
3	50 – 75	2000
4	Acima de 75	4000

**Tabela 2.** Corpos de provas utilizados.

Corpo de prova	Imagem	Material	Características magnéticas
1		VC 131	É um aço-ferramenta, com alto teor de carbono, que apresenta alta resistência mecânica e ao desgaste abrasivo. Possui baixa permeabilidade magnética, alta retentividade e baixa soldabilidade.
2		SAE 8620	É uma liga que apresenta boa temperabilidade, forjabilidade e soldabilidade [14]. Possui permeabilidade e retentividade intermediárias.
3		ASTM A106 com revestimento de Inconel 625	Tubo sem costura apresenta alta resistência à corrosão e à oxidação. Devido à alta porcentagem de níquel (ferromagnético) e de cromo (não-magnético) do Inconel, pode-se afirmar que as características de permeabilidade e retentividade se encontra em níveis intermediários quando comparadas a aços de baixa e de alta resistência [15].
4		SAF 2507	Tubo sem costura de aço inoxidável super-duplex (austenítico-ferrítico), apresenta elevada resistência a corrosão, resistência mecânica e excelente soldabilidade [15]. Devido à presença das fases de ferrita (ferromagnética) e austenita (não-magnética), além da alta porcentagem de cromo (não-magnético), o CP 4 é levemente ferromagnético, com alta permeabilidade magnética e baixa retentividade.
5			
6		SAE 1020	Aço baixo-carbono, com bom custo-benefício e que apresenta excelente conformabilidade e soldabilidade. Possui alta permeabilidade magnética e baixa retentividade [16-17].
9			

**Tabela 2.** Continuação...

Corpo de prova	Imagem	Material	Características magnéticas
7		SAE 4340	Aço-liga com elevada temperabilidade e baixa soldabilidade. Apresenta elevada resistência, porém baixa permeabilidade magnética e alta retentividade.
8		SAE 4140	Aço-liga com temperabilidade média e baixa soldabilidade. Apresenta boa combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Possui baixa permeabilidade magnética e alta retentividade.
10		ASTM A36	Aço baixo-carbono que apresenta boa conformabilidade e excelente soldabilidade, possui alta permeabilidade magnética e baixa retentividade.

Com o intuito de obter resultados conclusivos, diferentes experimentos e etapas foram conduzidos para elaboração do presente trabalho

- Etapa 1: ensaio por partículas magnéticas e avaliação do campo residual;
- Etapa 2: desmagnetização e avaliação qualitativa da retentividade;
- Etapa 3: magnetização e soldagem;
- Etapa 4: magnetização circular.

Inicialmente, todas as peças receberam uma limpeza mecânica por meio de uma escova de aço, de modo que sujeiras e resíduos capazes de atrapalhar a movimentação das partículas fossem removidos. Em seguida, em cada peça, o pó magnético foi aplicado manualmente e o *yoke* foi posicionado e acionado por cerca de 10 segundos. Com o auxílio do teslâmetro, que possui 3 faixas de medição (0-20 mT; 0-200 mT e 0-2000 mT), cada peça teve o campo magnético medido e registrado, após a remoção do *yoke*, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3.** Magnetização dos corpos de provas.

Corpo de prova	Imagem	Intensidade do campo magnético (mT)
1 (VC - 131)		-4,20
2 (SAE 8620)		0,64
3 (ASTM A106 + inc.)		0,94

**Tabela 3.** Continuação...

Corpo de prova	Imagem	Intensidade do campo magnético (mT)
4 (SAF 2507)		-1,67
5 (SAE 1020)		-1,03
6 (SAE 1020)		0,15
7 (SAE 4340)		2,58
8 (SAE 4140)		-2,64
9 (SAE 1020)		-2,38
10 (ASTM A36)		0,33

Os valores contidos na Tabela 3, foram obtidos a partir da estabilização da medição. Com o intuito de se realizar uma avaliação qualitativa das características de retentividade, todas as amostras foram desmagnetizadas conforme a técnica com o *yoke* apresentada

anteriormente, para que o campo residual não influenciasse no teste posterior. Então, com valores de campo magnético próximos de zero, as peças foram novamente magnetizadas seguindo os passos da etapa 1 e deixadas em repouso sobre uma bancada emborrachada, com um espaçamento que não fosse possível haver influência entre os campos. O objetivo era avaliar uma eventual redução do campo magnético com o tempo e, por isso, após 6 dias, novas medições foram feitas com o teslâmetro. Este prazo foi estabelecido de forma aleatória, devido ao tempo necessário para adequação da célula de soldagem para os experimentos.

Tendo-se em vista que o objetivo da presente etapa é avaliar a estabilidade do arco magnético durante a soldagem (sopro magnético) na presença de campo magnético residual, todas as peças foram levadas para uma cabine de soldagem GTAW, como ilustra a Figura 7. Para as soldagens no processo GTAW, empregou-se uma fonte inversora com capacidade de até 200 A AC/DC, com gás de proteção argônio puro e a tocha de soldagem foi montada para trabalhar com eletrodo de Tungstênio puro com 2,4 mm de diâmetro. O deslocamento da tocha ocorreu com um sistema mecanizado. Estabeleceu-se o arco elétrico entre o eletrodo de Tungstênio e cada uma das amostras com uma distância de 10 mm e, de forma síncrona, registros fotográficos foram efetuados com uso de uma câmera de alta velocidade Miro Lab 110 da Phantom. A câmera esteve fixa e posicionada a 950 mm de distância do processo, o uso de uma lente Infinity permitiu adotar tal posição para todos os experimentos. Por fim, foram medidos e anotados os valores do campo magnético em cada peça após a etapa da soldagem autógena. Os parâmetros utilizados para a soldagem foram os seguintes:

- Corrente: 120 A
- Vazão de gás: 15 L/min
- Polaridade: DC –
- Velocidade de deslocamento: 2 cm/min



Figura 7. Montagem experimental para soldagem TIG.

Visando à obtenção de uma intensidade de campo magnético superior à encontrada nos experimentos com o *Yoke*, as amostras foram levadas na máquina estacionária, na qual o valor da corrente utilizada foi de 1000 A, que circulou durante 3 segundos, tempo esse para evitar o aquecimento das extremidades da peça, e, em seguida, foram medidos com o teslâmetro os valores de campo magnético residual.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Etapa 1

No que tange à existência de magnetismo residual, todas as amostras foram inspeccionadas em 3 pontos com o teslâmetro e os valores de intensidade de campo magnético são apresentados na Tabela 4. Nesta etapa, dois pontos foram estabelecidos nos locais de contato das pernas do *yoke* e o terceiro em uma região interna e equidistante das pernas. Percebeu-se que, em todas as peças, o valor do campo magnético entre as pernas do *yoke* é consideravelmente menor que o valor dos outros dois pontos. Tal fato ocorre porque, ao magnetizar a peça, formam-se polos magnéticos com maior concentração de linhas de indução nas regiões onde existe o contato direto do *yoke*. Ademais, pôde-se perceber que as arestas são pontos com alta intensidade de campo magnético, devido à formação de campos de fuga.

A partir do experimento inicial, confirmou-se a hipótese apresentada anteriormente de que aços alto-carbono ou ligados possuem alta retentividade, enquanto aços baixo-carbono possuem baixa retentividade. Os corpos de prova 1, 7 e 8 – constituídos por materiais mais nobres – apresentaram as maiores intensidades de campo magnético residual, como era esperado. Os corpos de prova 2, 3, 4, 5, 6 e 10 permaneceram com níveis baixos/intermediários de magnetismo, como também já era esperado devido às composições químicas. Já o corpo de prova 9 exibiu um resultado inesperado, uma vez que se trata de um aço baixo-carbono e o magnetismo residual obtido se equipara ao dos materiais mais nobres. Ademais, devido à inexistência de um registro do histórico do material, não se pode descartar a possibilidade de a peça ter passado por algum processo de tratamento superficial, como o de cementação, comumente utilizado no aço SAE 1020 para aumentar a dureza superficial e a resistência à corrosão, no qual a concentração de carbono na superfície é elevada.

**Tabela 4.** Valores de intensidade de campo magnéticos obtidos na etapa 1.

Corpo de prova	Intensidade do campo magnético (mT)			
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Desvio Padrão
1 (VC - 131)	4,20	0,17	4,75	2,04
2 (SAE 8620)	0,64	0,22	0,65	0,20
3 (ASTM A106 + inc.)	0,94	0,08	0,64	0,36
4 (SAF 2507)	1,67	0,73	1,62	0,43
5 (SAE 1020)	1,03	0,02	1,06	0,48
6 (SAE 1020)	0,15	0,04	0,40	0,15
7 (SAE 4340)	2,58	0,06	2,68	1,21
8 (SAE 4140)	2,64	0,07	2,59	1,20
9 (SAE 1020)	2,38	0,02	3,24	1,36
10 (ASTM A36)	0,33	0,08	0,31	0,11

## 5.2. Etapa 2

Na etapa 2, todas as amostras foram inicialmente desmagnetizadas. A técnica de desmagnetização com o *yoke* se mostrou efetiva e foi capaz de reduzir a intensidade de campo magnético a valores muito próximos de zero em todas as peças. As Figuras 8, 9 e 10 comprovam a eficiência do processo de desmagnetização, o qual foi aplicado nos demais corpos de prova. Vale citar que o valor negativo no teslâmetro diz respeito ao sentido do campo magnético que passa pela sonda de efeito Hall. Assim como os valores que se apresentam diferentes dos apresentados na Tabela 4, devido ao fato de que todas as respectivas peças foram magnetizadas novamente, e devido a oscilação dos valores, no instante do registro fotográfico, os dados podem apresentar divergentes dos tabelados.



**Figura 8.** Sequência de desmagnetização do corpo de prova 1.



**Figura 9.** Sequência de desmagnetização do corpo de prova 2.

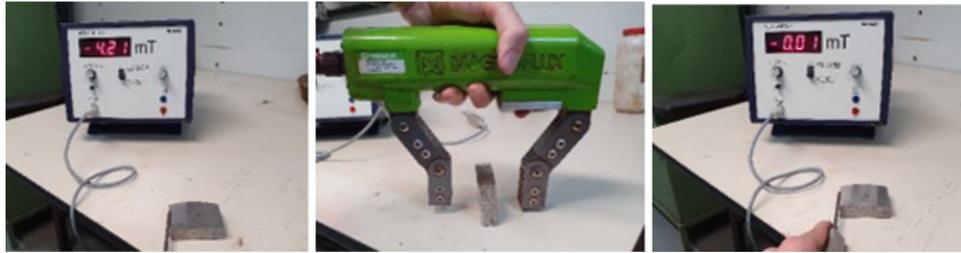


Figura 10. Sequência de desmagnetização do corpo de prova 7.

Com valores praticamente zerados de magnetismo residual, as peças foram novamente magnetizadas e deixadas em repouso por 6 dias. Os valores de intensidade de campo magnético antes e depois do período de repouso são apresentados na Tabela 5, bem como a variação percentual média dos três pontos em cada peça. Deve-se ressaltar que, diferentemente da etapa 1, os três pontos foram estabelecidos em locais aleatórios das peças, nos quais foram feitas marcações (Figura 11). Tal medida teve como objetivo aumentar a confiabilidade dos resultados, já que, após os 6 dias, as medições foram feitas nesses mesmos pontos, o que permitiu avaliar o comportamento do campo magnético.

Tabela 5. Intensidade de campo magnético antes e depois de 6 dias de repouso.

Corpo de prova	Antes/depois	Intensidade do campo magnético (mT)			Variação média
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	
1 (VC - 131)	A	3,98	2,07	1,76	-9,72%
	D	3,77	1,74	1,62	
2 (SAE 8620)	A	0,83	0,29	0,15	-0,51%
	D	0,76	0,31	0,18	
3 (ASTM A106 + inc.)	A	1,47	1,12	0,53	-2,39%
	D	1,42	1,12	0,51	
4 (SAF 2507)	A	2,09	0,48	1,75	-2,58%
	D	1,94	0,48	1,74	
5 (SAE 1020)	A	0,89	1,29	1,86	-5,56%
	D	0,8	1,24	1,81	
6 (SAE 1020)	A	1,2	0,86	0,53	-34,37%
	D	0,78	0,55	0,36	
7 (SAE 4340)	A	2,78	5,4	1,43	-6,00%
	D	2,48	5,35	1,34	
8 (SAE 4140)	A	3,46	3,79	3,45	-2,92%
	D	3,22	3,82	3,36	
9 (SAE 1020)	A	2,24	1,09	2,08	-1,59%
	D	2,22	1,1	1,98	
10 (ASTM A36)	A	0,39	0,09	1,42	-5,30%
	D	0,35	0,04	1,34	

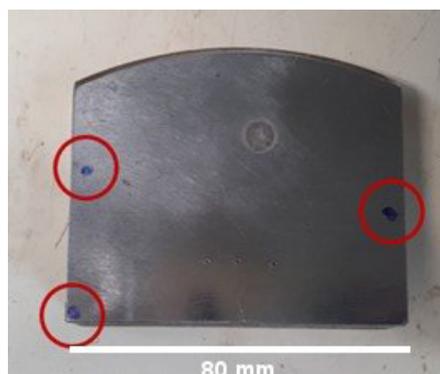


Figura 11. Pontos de medição do campo magnético no corpo de prova 7.

Frente aos dados obtidos, pôde-se perceber que todas as peças tiveram uma leve redução nos valores da intensidade de campo magnético após os 6 dias de repouso. A peça com redução percentual mais significativa foi a de número 6, mas os valores antes e depois são considerados baixos e pouco expressivos.. Desse modo, em uma linha de produção real, por exemplo, não seria correto considerar que tais peças estariam naturalmente desmagnetizadas 6 dias após o ensaio não-destrutivo de partículas magnéticas e, caso necessário, deveriam ser submetidas a alguma das técnicas de desmagnetização previamente abordadas.

### 5.3 Etapa 3

Na etapa 3, as peças foram magnetizadas e submetidas à soldagem TIG. Os valores de intensidade de campo magnético antes e depois do processo de soldagem foram registrados e são apresentados na Tabela 6.

As subseções seguintes abordam individualmente cada um dos corpos de prova e trazem análises acerca da estabilidade do arco elétrico durante a soldagem e da variação dos valores de campo magnético medidos.

**Tabela 6.** Intensidade de campo magnético antes e depois do processo de soldagem.

Corpo de prova	Antes/Depois	Intensidade do campo magnético (mT)			Variação média
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	
1 (VC - 131)	A	4,02	2,01	1,78	-75,68%
	D	0,35	0,58	0,63	
2 (SAE 8620)	A	0,92	0,31	0,17	-56,94%
	D	0,12	0,05	0,03	
3 (ASTM A106 + inc.)	A	1,55	1,07	0,46	-54,17%
	D	0,52	0,74	0,16	
4 (SAF 2507)	A	2,31	0,61	1,87	-84,59%
	D	0,27	0,09	0,37	
5 (SAE 1020)	A	0,99	1,24	1,95	-48,14%
	D	0,98	0,46	0,38	
6 (SAE 1020)	A	1,07	0,75	0,54	-52,80%
	D	0,22	0,13	0,56	
7 (SAE 4340)	A	2,86	5,37	1,49	-73,19%
	D	0,33	0,24	0,96	
8 (SAE 4140)	A	3,57	3,45	3,29	-78,06%
	D	0,56	0,44	1,23	
9 (SAE 1020)	A	2,29	1,21	2,01	-85,68%
	D	0,34	0,25	0,15	
10 (ASTM A36)	A	0,43	0,06	1,37	-49,78%
	D	0,13	0,16	0,28	

Em todos os corpos de prova, a redução dos valores de intensidade de campo magnético foi consideravelmente alta após o processo de soldagem – em certos casos, o magnetismo residual foi praticamente extinguido. Nesse contexto, considera-se que alguns pontos da peça atingiram temperaturas acima do ponto de fusão dos materiais.

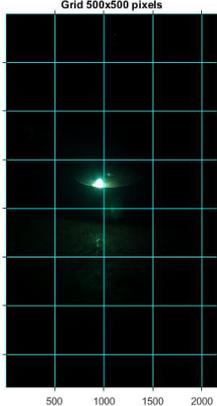
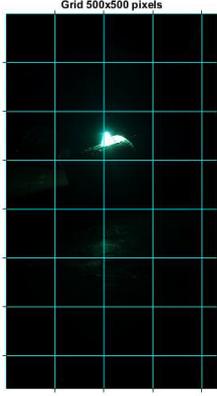
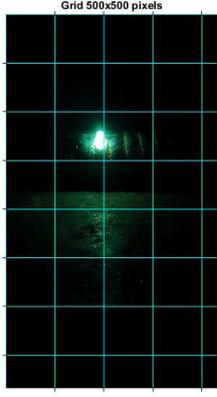
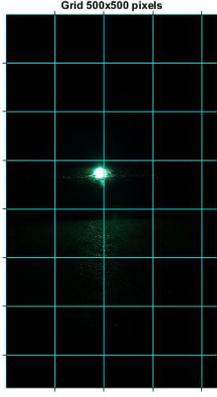
Conforme citado anteriormente, quando os aços são submetidos a temperaturas que ultrapassam o ponto de Curie (em torno de 770 °C), tornam-se não-magnéticos e, ao resfriarem, ficam desmagnetizados. Dessa forma, pode-se entender que, devido ao calor localizado da soldagem, algumas regiões das peças foram desmagnetizadas. O conjunto dessas regiões com as outras ainda magnetizadas originou os resultados de intensidade de campo magnético apresentados na Tabela 6, os quais são baixos, mas não totalmente zerados. A Tabela 7 apresenta um compilado do comportamento de cada corpo de prova.

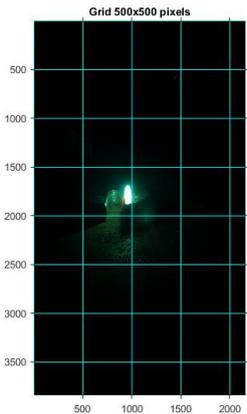
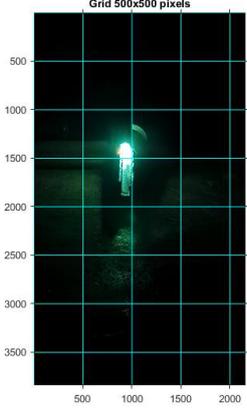
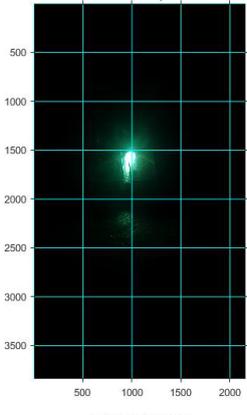
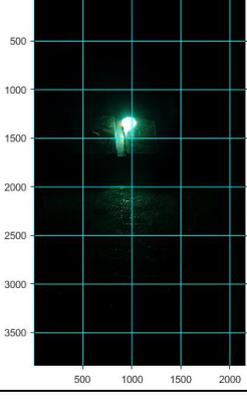
De modo a entender a influência da geometria da peça ou magnetismo residual, as peças foram submetidas ao ensaio de soldagem com e sem a geração do campo magnético, o que foi possível avaliar a distinção entre a origem da variação do arco elétrico, o qual apresentou uma deflexão maior quando a geometria estava sob a influência também do magnetismo.

Os aços pertencem a um grupo de materiais que podem ser facilmente magnetizados, o que pode promover também um efeito no arco voltaico de forma muito pronunciada. Normalmente não é possível prever onde e em que medida os campos magnéticos irão ocorrer. O arco é sempre detectado devido alteração na direção em que o eletrodo está posicionado, o que faz com que as linhas de força sejam concentradas e que o arco é empurrado na direção da inclinação do eletrodo.

Quando o sopro do arco encurtou e alongou alternadamente o comprimento do arco, promoveu a falta de fusão do metal de base, o que resultou em efeitos de escoriações, inclusões de escória e salpicos, reduzindo assim a qualidade do cordão.

**Tabela 7.** Análise do comportamento do arco elétrico.

Corpo de prova	Imagem	Análise
<p>Corpo de prova 1 – VC131</p>		<p>Para os parâmetros adotados no experimento, percebeu-se que o VC131, com intensidade de campo magnético máxima de 4 mT, teria poucas consequências negativas causadas pelo magnetismo residual em um processo real de soldagem, promovendo uma leve deflexão no arco elétrico</p>
<p>Corpo de prova 2 – SAE 8620</p>		<p>Assim como previsto, devido aos baixos valores de campo magnético residual, não foi identificado o sopro magnético durante a soldagem da peça constituída de SAE 8620 sob as condições adotadas no ensaio. A figura ilustra o arco elétrico estável formado durante o processo, o que indica a não ocorrência de sopro magnético.</p>
<p>Corpo de prova 3 – ASTM A106 + Inconel</p>		<p>Neste corpo de prova foi detectada uma leve deflexão no arco elétrico, o que comprova, em baixa intensidade, o fenômeno de sopro magnético. Para os parâmetros adotados no experimento, percebeu-se que o ASTM A106 com revestimento de Inconel 625, com intensidade de campo magnético máxima de 1,55 mT, teria poucas consequências negativas causadas pelo magnetismo residual em um processo real de soldagem.</p>
<p>Corpo de prova 4 – SAF 2507</p>		<p>Na amostra constituída de SAF 2507, o arco elétrico apresentou, porém, durante o deslocamento uma instabilidade foi percebida, o que está associada a geometria da peça. Não ocasionando deflexão por efeitos magnéticos.</p>

Corpo de prova	Imagem	Análise
Corpo de prova 5 – SAE 1020		Neste corpo de prova, foi detectada uma leve deflexão no arco elétrico, o que comprova, em baixa intensidade, o fenômeno de sopro magnético. Para os parâmetros adotados no experimento, percebeu-se que o SAE 1020, com intensidade de campo magnético máxima de 1,95 mT, teria poucas consequências negativas causadas pelo magnetismo residual em um processo real de soldagem.
Corpo de prova 6 – SAE 1020		Assim como previsto, devido aos baixos valores de campo magnético residual, não foi identificado o sopro magnético durante a soldagem. A figura ilustra o arco elétrico estável formado durante o processo, o que indica a não ocorrência de tal fenômeno. Nesse contexto, é válido citar que o formato do arco da imagem é justificado pela circularidade da peça, e que ele se manteve ao longo de todo o comprimento.
Corpo de prova 7 – SAE 4340		Apesar dos valores elevados de campo magnético residual, não foi possível identificar o sopro magnético durante a soldagem da peça constituída de SAE 4340 sob as condições adotadas no ensaio. A figura apresenta o arco elétrico estável formado durante o processo, o que indica a não ocorrência de sopro magnético.
Corpo de prova 8 – SAE 4140		Neste corpo de prova foi detectada uma leve deflexão no arco elétrico, o que comprova, em baixa intensidade, o fenômeno de sopro magnético. Para os parâmetros adotados no experimento, percebeu-se que o SAE 4140, com intensidade de campo magnético máxima de 3,57 mT, teria poucas consequências negativas causadas pelo magnetismo residual em um processo real de soldagem.

Corpo de prova	Imagem	Análise
Corpo de prova 9 – SAE 1020		<p>Foi detectada uma leve deflexão no arco elétrico, o que comprova, em baixa intensidade, o fenômeno de sopro magnético. Para os parâmetros adotados no experimento, percebeu-se que o SAE 1020, com intensidade de campo magnético máxima de 2,29 mT, teria poucas consequências negativas causadas pelo magnetismo residual em um processo real de soldagem.</p>
Corpo de prova 10 – ASTM A36		<p>Assim como esperado, devido aos baixos valores de campo magnético residual, não foi identificado o sopro magnético durante a soldagem do corpo de prova 10 constituído de ASTM A36 sob as condições adotadas no ensaio.</p>

#### 5.4. Etapa 4

Nesta etapa, as peças foram submetidas a uma tentativa de se obter maiores valores de campo magnético residual, utilizando a máquina estacionária. Embora todos os procedimentos do equipamento tenham sido corretamente seguidos, os valores de campo magnético obtidos foram inexpressivos e até inferiores aos obtidos com o *yoke*. Desse modo, após algumas pesquisas, uma hipótese se mostrou plausível, ou seja, a saturação magnética dos materiais. Desta forma, está relacionada ao estado alcançado por um material no qual o aumento da aplicação externa de um campo magnético não provoca aumento da sua magnetização, uma vez que ele já está totalmente magnetizado e os domínios magnéticos já estão alinhados.

No entanto, no que se refere ao corpo de prova 4, constituído de SAF 2507, ficou comprovado que o magnetismo residual, em conjunto com rebarbas e resquícios de óleo, provenientes do processo de usinagem e com objetivo de avaliar a influência na operação, intensificando o efeito de encurtamento e alongamento do arco elétrico, o que causou sua desestabilização significativa, a qual certamente influenciaria no resultado da solda.

#### 6. Conclusões

A avaliação dos efeitos do magnetismo residual frente aos resultados alcançados a partir dos experimentos, permite considerar que:

Os corpos de prova passaram pelo ensaio por partículas magnéticas e não foram detectadas descontinuidades subsuperficiais e superficiais nas regiões ensaiadas. Foi possível perceber que, em todas as peças, o valor do campo magnético entre as pernas do *yoke* foi consideravelmente menor que o valor dos outros dois pontos, devido à formação de polos magnético nos locais de contato físico do *yoke*. Além disso, percebeu-se que as arestas são pontos com alta intensidade de campo magnético devido à formação de campos de fuga. Confirmou-se a premissa de que aços alto-carbono ou ligados possuem baixa permeabilidade e alta retentividade, enquanto aços baixo-carbono possuem alta permeabilidade e baixa retentividade.

O uso da técnica de desmagnetização com o *yoke* se mostrou eficiente e permitiu que a intensidade de campo magnético das peças atingisse valores próximos de zero.

Após o processo de soldagem foi verificado uma redução significativa dos valores de intensidade de campo magnético, o que pode ser justificado pela desmagnetização de algumas regiões das peças devido à elevação da temperatura a valores acima do ponto de Curie (cerca de 770 °C). Quanto ao sopro magnético, foi possível detectá-lo nos corpos de prova 1, 3, 4, 5, 8 e 9, mas com intensidade relativamente baixa. Portanto, pode-se concluir que o magnetismo residual com valores de até 5,37 mT

nos materiais utilizados, sob as condições especificadas para os experimentos, não representa um problema significativo para a soldagem e não traria prejuízos consideráveis. Por isso, a desmagnetização após ensaios não-destrutivos de partículas magnéticas não deve, obrigatoriamente, ser realizada nesse caso.

Quando se busca uma técnica de desmagnetização não-estacionária, o *yoke* aparece como uma das soluções mais utilizadas – tanto correntes alternadas quanto correntes contínuas reversivas podem ser usadas. A desmagnetização se dá pela passagem dos objetos pelos polos do *yoke*, seguida do afastamento das peças enquanto ele ainda é alimentado.

## Contribuição dos autores

Os autores dessa publicação contribuíram da seguinte forma: FGFC, LPM, ARA e ASS: revisão bibliográfica, definição da metodologia, realização de ensaios, análises laboratoriais, conclusão e na redação do artigo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Minas Gerais e em especial ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação do Departamento de Engenharia Mecânica, ao laboratório 153 do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais por permitirem o uso dos recursos e equipamentos para realização deste e as empresas SMS Group, Daumec Usinagem e Betel Usinagem e Caldeiraria, por disponibilizarem as peças, e por fim, porém não menos importante à Metalchek por disponibilizar os produtos para os ensaios.

## Referências

- [1] Andreucci R. Partículas magnéticas. São Paulo: Andreucci Assessoria e Serviços Técnicos LTDA; 2009.
- [2] Oliveira MJ. Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos [dissertação de mestrado]. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; 2014.
- [3] Afzal M, Cheong YM, Gimour RS, Habibullah M, Janjua SA, Khan AA, et al. Non-destructive testing: a guidebook for industrial management and quality control personnel (IAEA-TCS-9). Vienna: International Atomic Energy Agency; 1999.
- [4] Boyes W. Instrumentation reference book. 4th ed. Amsterdam: Butterwoth Heinemann; 2010.
- [5] Zolin I. Ensaios mecânicos e análises de falhas. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; 2011.
- [6] Halliday D, Resnick R, Walker J. Fundamentos de física: eletromagnetismo. Rio de Janeiro: LTC; 2016.
- [7] NDT Supply Inc. Magnetic particle inspection method [Internet]. 2022. Chapter 3 [acesso em 17 set. 2022]. Disponível em: <https://content.ndtsupply.com/media/Magnetic%20Partice-USAF-Tech-Manual-NR.pdf>
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM E709-08: standard guide for magnetic particle testing. West Conshohocken: ASTM; 2021.
- [9] Afzal M, Arif A, Berg HW, Dobrowolski M, Harding NG, Khan AA, et al. Liquid penetrant and magnetic particle testing at level 2. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2000.
- [10] Schmidt T, Skeie K, McIntire P. Nondestructive testing handbook: magnetic particle testing. Ohio: American Society for Nondestructive Testing; 1989.
- [11] Villares Metals. VC 131: aço para trabalho a frio [Internet]. 2021 [acesso em 17 set. 2022]. Disponível em: <https://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>
- [12] Clain FM, Teixeira PRDF, Araújo DB. Two heat source models to simulate welding processes with magnetic deflection. Soldagem e Inspeção. 2017;22(1):99-113. <http://doi.org/10.1590/0104-9224/si2201.10>
- [13] Reis RP, Souza D, Scotti A. Models to describe plasma jet, arc trajectory and arc blow formation in arc welding. Welding in the World. 2011;55(3-4):24-32.
- [14] Rijeza Metalurgia. Inconel: propriedades e aplicações na indústria [Internet]. 2022 [acesso em 17 set. 2022]. Disponível em: <https://rijeza.com.br/blog/inconel-propriedades-e-aplicacoes-na-industria/#:~:text=Inconel%20%C3%A9%20uma%20fam%C3%ADlia%20de,ambiente%20ao%20qual%20ser%C3%A1%20submetida>
- [15] Sandvik. Sandvik SAF 2507: tube and pipe, seamless [Internet]. 2016 [acesso em 17 set. 2022]. Disponível em: <https://astrup.no/content/download/8104/44372/version/1/file/datasheet-sandvik-saf-2507-en.pdf>
- [16] GGD Metals. Principais características GGD 1020 [Internet]. 2022 [acesso em 17 set. 2022]. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-1020/>
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM E709-08: standard guide for magnetic particle testing. West Conshohocken: ASTM; 2021.