

## **MANUFATURA ADITIVA APLICADA NA RECUPERAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE NA MINERADORA DE CARVÃO**

**Alexandre Herartt Bussolo<sup>1</sup>**

**Anderson Daleffe<sup>2</sup>**

**Resumo:** O carvão mineral é um combustível fóssil amplamente usado atualmente nas siderúrgicas e usinas termoeletricas para produção de energia. Para a extração, são utilizados mineradores projetados para cortar minérios "macios" em um processo chamado de contínuo, ou seja, eliminando a necessidade de perfuração e de explosão. Em sua extremidade, existem cerca de 83 ferramentas de corte, podem ser chamadas também de ferramentas de extração de minério, utilizados para fazerem força na escavação de rochas/minérios. Seus corpos são formados por aço SAE 1045 e possuem uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. Na ponta, existe uma pastilha de metal duro, a qual é soldada. A ferramenta quando perde a sua afiação apresenta desgaste na pastilha, trincas térmicas e até mesmo quebra da ferramenta. Quando isso ocorre, afeta o desempenho da máquina tanto na produção quanto no custo. A manufatura aditiva é definida como um grupo de tecnologias utilizado na adição de material. Hoje são mais conhecidas como "impressoras 3D". Neste estudo será feito a adição de metal com processo de fusão localizada usando o arco elétrico da máquina de soldagem. Nele será fundido o material de adição (arame). Sabe-se que em uma mineradora muitos dessas ferramentas de corte são simplesmente descartados e peças novas serão compradas. O objetivo principal do trabalho é estudar métodos para depositar metal em corpos de prova por meio de manufatura aditiva com uso do processo de fusão localizada e, futuramente, aplicar nas ferramentas de extração de minério do minerador contínuo. De acordo com análise prévia, observou-se a possibilidade de recuperação com uso da técnica de manufatura aditiva, com fusão localizada de metal para "reconstruir" o corpo da ferramenta, a qual foi desgastada pelo processo de mineração, após a perda ou desgaste da pastilha de metal duro. Foram realizados testes mecânicos de desgaste e caracterização do material depositado para avaliar as propriedades mecânicas, bem como teste em laboratório para comprovar a eficiência do processo.

**Palavras-Chave:** Ferramentas de corte; Manufatura Aditiva; Mineração; Soldagem.

### **1 INTRODUÇÃO**

O carvão mineral é um combustível fóssil amplamente usado atualmente nas siderúrgicas e usinas termoeletricas para produção de energia. Trata-se de

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: alexandrebussole@hotmail.com

<sup>1</sup> Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

um recurso natural não-renovável que é extraído tanto em minas a céu aberto quanto em minas subterrâneas.

Em Santa Catarina, as atividades de carvão começaram no final do século 19 por uma empresa britânica que construía ferrovias e explorava minas. Em 1885, foi inaugurado o primeiro trecho da Estrada de Ferro Dona Tereza Cristina, ligando Lauro Müller ao Porto de Laguna, que desembarcou em São José de Cristina em 1919. Por ser o carvão catarinense considerado de baixa qualidade, sua exploração não despertou muito interesse dos ingleses. Diante dessa situação, o Governo Federal transferiu a concessão para a Indústria do Rio de Janeiro, inicialmente com foco em Henrique Lage e posteriormente em Álvaro Catão e Sebastião Netto Campos (ABCM, 2021).

Com a queda na compra de carvão importado, os produtos catarinenses deram início à primeira exploração durante a Primeira Guerra Mundial, quando o ramal ferroviário no sul do estado foi ampliado e novas mineradoras foram instaladas. Em 1917, a Companhia Brasileira Carbonífera Araranguá (CBCA) iniciou suas operações e, em 1918, a Companhia Carbonífera Urussanga (CCU) iniciou suas operações. Nos dez anos seguintes, 1921, foram fundadas Companhia Carbonífera róspera e a Companhia Carbonífera Ítalo-Brasileira. Em 1922 foi fundada a Companhia Nacional Mineração Barro Branco (ABCM, 2021).

Em termos de matriz energética mundial, representada pelo conjunto de fontes de energia disponíveis para movimentar os carros, preparar a comida no fogão e gerar eletricidade, em 2018, representou 26,9% originado do carvão. E também por 38% da matriz elétrica mundial, formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo (EPE, 2020).

Para a extração do carvão, são utilizados mineradores projetados para cortar minérios " macios" em um processo chamado de contínuo, ou seja, eliminando a necessidade de perfuração e de explosão, torna-se um processo mais ágil e seguro e se torna também mais barato. O minerador contínuo Sandvik MC470 possui 83 ferramentas de corte, localizados na ponta do minerador, que é utilizado para fazer força na escavação de rochas/minérios, são as peças fundamentais para o processo de extração do material mineral.

Existem vários tipos de ferramentas no mercado para diferentes aplicações, deve-se levar em conta o material a ser cortado, a largura do corte, a classe do metal utilizado e a intensidade do processo. Todos esses são elementos essenciais para que se tenha o maior desempenho com o menor custo possível. Os fornecedores fazem essa ferramenta com o mais alto custo-benefício e, dentre as propriedades levantadas, estão: aumentar a utilização delas; maximizar o desempenho; evitar falhas, entre outros.

As ferramentas de corte são formadas por aço SAE 1045, temperado em seu corpo; o número 10 representa a classe do aço carbono e o número 45 representa o percentual médio de carbono, de aproximadamente 0,45% em sua composição, já o processo de têmpera possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. A ponta do seu corpo existe um composto de carboneto de tungstênio, formado por uma liga de carbeto de tungstênio e um metal ligante, normalmente cobalto ou níquel (SULCROMO, 2020).

O efeito dessa ferramenta em um minerador contínuo é catastrófico, pois ela perde a sua afiação, apresenta desgaste, trincas térmicas e até a quebra. Afeta o desempenho da máquina, tanto na produção quanto no custo.

A manufatura aditiva é definida como um grupo de tecnologias utilizado na adição de material. Hoje são mais conhecidas como “impressoras 3D”, é construída por um material de adição a qual se forma camada por camada, até que a peça seja finalizada (MONTEIRO, 2015).

Sabendo que em uma mineradora muitos dessas ferramentas são simplesmente descartados e que novas peças são compradas, pode-se realizar um estudo para recuperação. Tendo o corpo de prova, a manufatura aditiva com processo de soldagem tem o propósito de “reconstruir” a ferramenta que foi afetada pelo processo de mineração.

Pode ocorrer através de diferentes processos de soldagem a arco, entre eles estão PTA (Plasma de arco transferido), TIG (Tungsten Inert Gas, traduzido como Gás Inerte de Tungstênio) e MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas, traduzido como Metal Inativo/ativo gás) (FORTES; VAZ, 2005).

Também deve-se mapear o parâmetro de deposição na soldagem, pois camadas são sobrepostas e é muito importante levar em consideração o melhor

mapeamento para que não haja empecilhos, por exemplo: trincas de reaquecimento, porosidade e oxidação nas camadas.

Realizar estudo para obter os parâmetros de processo para se aplicar corpos de prova, utilizando manufatura aditiva com fusão localizada a arco elétrico e para um trabalho futuro aplicar nas ferramentas de extração de minério do minerador contínuo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentadas algumas considerações relacionadas à compreensão do trabalho. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre manufatura aditiva com processo de soldagem para recuperação de ferramentas de corte da mineradora de carvão.

### 2.1 MINERADOR CONTÍNUO

Segundo Sandvik (2021), o minerador contínuo MC470 é um minerador ideal para ser aplicado na mineração. O minerador tem diversas tecnologias que fazem com que ele ofereça altas taxas de benefícios em condições de minerações difíceis e em espaço restrito, como é o caso de uma mineradora de carvão subterrânea. A máquina é mostrada na Fig. 1.

Figura 1: Minerador contínuo Sandvik MC470.



Fonte: Sandvik (2021)

Possui várias ferramentas de corte em suas extremidades, as quais são compostos por aço SAE 1045, juntamente com uma liga de carboneto de tungstênio na extremidade da ferramenta.

### 2.1.1 Ferramentas de corte para extração de carvão

O carboneto de tungstênio é utilizado em ambientes que requerem alta resistência abrasiva e desgaste mecânico. Sua composição é formada por uma liga com 70% a 97% de carbeto de tungstênio e um metal de liga, normalmente cobalto ou níquel, formando uma superfície de alta resistência (SULCROMO; 2020).

O material está presente na extremidade das ferramentas de corte. A Fig. 2 mostra a localização do composto na extremidade da ferramenta de corte.

Figura 2: Ferramentas de corte para extração de carvão.



Fonte: Adaptado Carbo Itália (2021)

As ferramentas também possuem aço SAE 1045 temperado em seu corpo. SAE 1045 é um aço para beneficiamento com temperabilidade baixa, ou seja, baixa penetração de dureza na seção transversal. Possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. (AÇOSPORTE, 2021). Pode-se obter uma dureza média dependente da temperatura e tempo de ensaio entre 46,4 e 48,5 HRC (FREITAS, 2016).

Possuem diversos formatos com suas devidas aplicações, a escolha da ferramenta certa faz com que aumente sua utilização; evita falhas, aumenta a produtividade e o custo da operação, conforme a Fig. 3 mostra alguns dos efeitos

ocasionados ao longo de sua utilização pelo processo, trincas, perdas de afiação e desgaste excessivo.

Figura 3: Desgaste ocasionado pela utilização.



Fonte: Kennametal (2014)

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

Encontra-se na literatura sobre manufatura aditiva e impressão 3D. Basicamente são iguais: ambas representam a técnica de fabricação baseada em camadas sobre camadas. Possui um propósito industrial para substituir outros processos de fabricação com a busca de eficiência e sustentabilidade (SILVA, 2017).

Na tabela 1, mostra vários processos de manufatura aditiva, dependendo da aplicabilidade. Diante de uma nova revolução industrial, esses termos se encontram cada vez mais na mídia.

Tabela 1: Tipos de processos de manufatura aditiva.

Processo	Descrição	Método AM	Material
Fotopolimerização	Um polímero fotocurável é curado seletivamente usando uma fonte de luz	Laser	Polímero fotocurável
Modelagem por extrusão	O material é depositado de forma seletiva através de um cabeçote extrusor.	Aquecimento por uma resistência elétrica	Polímeros, cerâmicas e metais
Fusão de pós pré-depositados	Um feixe eletrônico se funde seletivamente regiões de um leito com pó pré-depositado.	Laser e feixe de elétrons	Polímeros, cerâmicas e metais
Cladding 3D	O material de adição na forma de pós é injetado diretamente no feixe/poça	Laser e PTA	Metais e cerâmicas
Arco elétrico	Fonte de energia é um arco elétrico que funde o material de adição (pó/arame)	PTA, Plasma arame, TIG, MIG/MAG	Metais

Fonte: Gibson; Rosen; Stucker (2010)

### **2.2.1 Manufatura aditiva em peças metálicas**

A manufatura aditiva de metal está se evoluindo no mercado, existem diversas vantagens dessa tecnologia, algumas delas são: integração de partes, customização, redução de massa de componentes, menor desperdício de material e redução de tempo (JACOB, 2019).

A deposição de metais nessa tecnologia pode ocorrer através de diferentes processos de soldagem a arco (Plasma, MIG e TIG), *Laser cladding*, *Selective Laser Melting*, *Electro Beam Melting*, sinterização de pós e por variáveis desses mesmos processos (ALBERTI; DA SILVA; D'OLIVEIRA, 2014).

A seleção do processo a ser utilizado depende fortemente da geometria a ser fabricada, ao passo que para peças pequenas, com design complexo e baixas taxas de deposição, são usados os processos a laser e de feixe de elétrons. Já para o processamento de componentes de maiores dimensões - com maiores taxas de deposição -, são utilizados os processos a arco (ALBERTI; DA SILVA; D'OLIVEIRA, 2014).

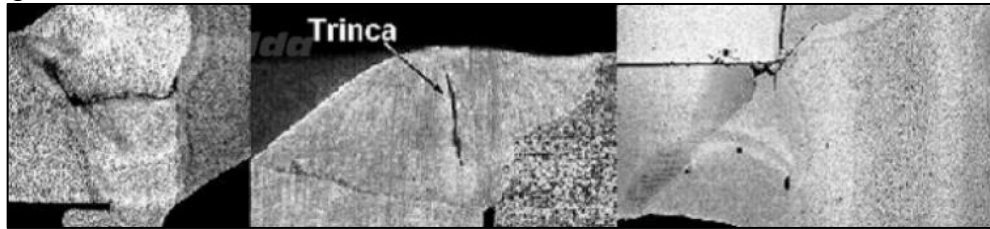
### **2.2.2 Problemas de soldagem**

Existem problemas durante o processo de soldagem. Por isso, deve-se analisar as propriedades do material e sua composição, e aqui serão apresentados alguns dos problemas comuns para este estudo.

O defeito mais aparente são as trincas. Conforme a Fig. 4, elas podem ser ocasionadas por dois fatores, ou porque as fusões dos materiais não se condizem ou porque o gás utilizado não está correto. Normalmente, as propriedades do metal a ser aplicada a adição do material são de ligas parecidas, porém mesmo assim podem ocorrer falhas durante o processo. Entretanto, estas podem ser evitadas diante da escolha do gás certo no processo ou até mesmo mediante escolha de consumíveis especiais que proporcionam a adição de elementos, os quais reduzem a faixa de temperatura de solidificação. (FORTES; ARAÚJO, 2005).



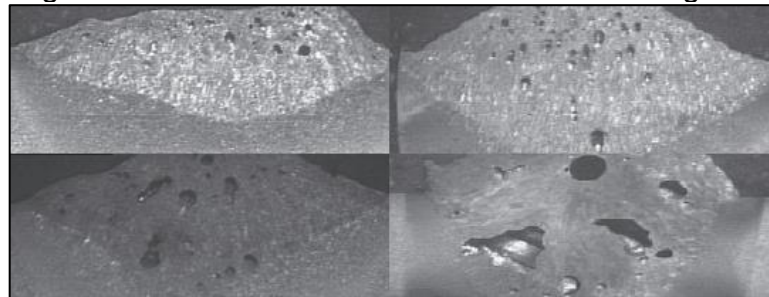
Figura 4: Trincas de solidificação ocasionadas pelo metal aplicado ou gás utilizado.



Fonte: César (2018)

A porosidade consiste em poros de gás, que podem ser encontrados na superfície ou no interior do cordão de solda solidificado. Como está ilustrado na Fig. 5, esses poros podem variar em tamanho e são geralmente distribuídos numa forma aleatória. (FORTES; VAZ, 2005).

Figura 5: Porosidade na solda com vista macrografia.



Fonte: Adaptado Liu et al. (2009)

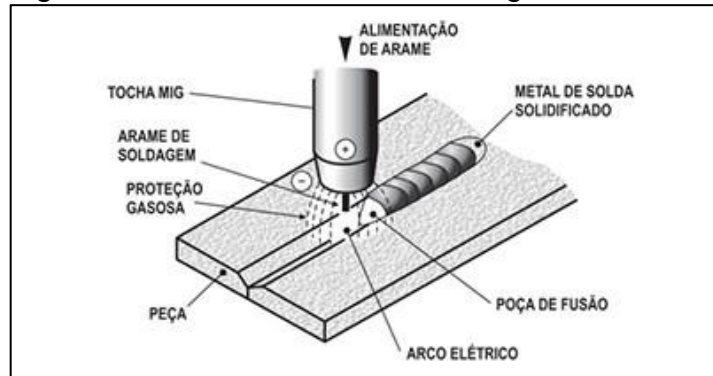
Falta de fusão e perfil do cordão desfavorável são outros defeitos comuns, fáceis de se evitar. A causa pode ser uma corrente de soldagem muito baixa ou uma velocidade de soldagem inadequada (TIBURI, 2007).

### 2.3 SOLDAGEM MIG/MAG

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), chamada também como soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas), um arco elétrico é estabelecido entre a peça (metal) e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à peça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo. A Fig. 6 ilustra exatamente o processo. (FORTES; VAZ, 2005).



Figura 6: Processo básico da soldagem MIG/MAG.



Fonte: Fortes; Vaz (2005)

A corrente de solda é espelho da alimentação do arame através do arco. Parâmetros da máquina devem ser observados, pois quanto maior a velocidade de alimentação do arame maior a corrente de solda e quanto menor a velocidade do arame menor a corrente. A fonte de energia de corrente contínua (CC) é encarregada por fundir a peça e o arame, fazendo com que gere um arco elétrico (SUMIG, 2018).

Corrente da máquina, espessura do arame, distância da soldagem, taxa de deposição, formalidade do cordão e ângulo da tocha são alguns outros parâmetros a serem investigados (GUIMARÃES, 2016).

Na soldagem MIG o gás é inerte, ou seja, não possui nenhuma interação com a poça de fusão, somente para proteção da soldagem e normalmente são utilizados o gás hélio e/ou argônio. Já no processo MAG é diferente, já que, por sua vez o gás é ativo e participa da interação com a poça de fusão. Dessa forma, poderá haver mudanças nas propriedades mecânicas de ambos (AVENTA, 2016).

É importante observar que a máquina utilizada na soldagem será a mesma; apenas os gases serão modificados, caso sejam utilizados, e os periféricos para o processo.

### 2.3.1 Processo manual e automático

Os equipamentos de soldagem podem ser utilizados basicamente de duas formas: manual ou automática.

O processo de soldagem manual requer uma pessoa capacitada para fazer a atividade manual. Essa técnica faz com que apresente maiores chances de falhas

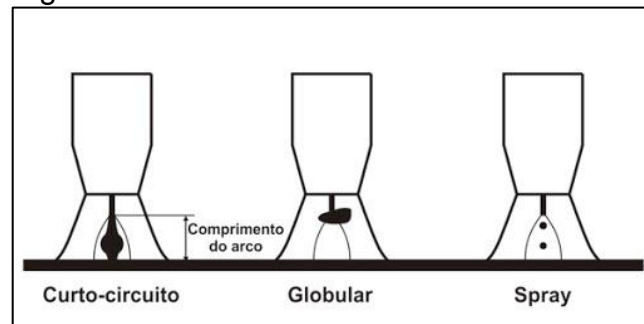
humanas, porém a instalação dos equipamentos é fácil e é aplicado onde não se tem grande escala de produção, por ser um processo mais lento (SUMIG, 2018).

Já o processo automático, presente em indústrias que apresentam grande escala de produção, é mais confiável e seguro. Chances menores de existirem falhas e um processo mais rápido. Requer equipamentos para fixação/movimentação da peça ou da tocha, equipamento mais complexo (SUMIG, 2018).

### 2.3.2 Modos de transferência metálica

A soldagem MIG/MAG engloba três técnicas, mostrada na Fig. 7, de processos distintas para a transferência do metal, as quais são curto-circuito, globular e spray.

Figura 7: Modos de transferência metálica.



Fonte: Dutra máquinas Blog (2014)

Na transferência por curto-circuito tem-se uma baixa tensão e uma baixa corrente na soldagem, causa uma incidência maior de respingos de solda e ocorre quando o arame toca na poça de fusão (ESAB, 2008).

Uma das formas de corrigir os respingos é utilizar altos níveis de energia, técnica chamada de spray. As gotículas produzidas têm tamanho menor que o comprimento do arco e são transferidas pela gravidade dentro da área formada pelo arco elétrico e protegida pelo gás de proteção (BOXER, 2015).

Por sua vez, a Globular ocorre quando a tensão de soldagem é muito elevada, superior à tensão recomendada. A transferência do metal transforma-se em um aspecto diferente, um processo muito errático, que varia e que comete erros (FORTES; VAZ, 2005).

### 2.3.3 Arames

Um fator-chave para a perfeição é a seleção do arame a ser utilizado na soldagem MIG/MAG. Esse arame, em conjunto com o gás, produzirá diferentes propriedades mecânicas e físicas (ESAB, 2008).

Sabe-se que as ferramentas de corte dos mineradores estão submetidas a constantes desgastes abrasivos. Com o metal-base (peça) sendo em aço SAE 1045 temperado, a Fig. 8, mostra o arame tubular de revestimento duro ligado ao Cr (Cromo) e ao Nb (Nióbio) UTP AF LEDURIT 68 (BARRAGÁS, 2021).

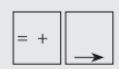
Figura 8: Arame tubular UTP AF LEDURIT 68.



Fonte: Barragás (2021)

O arame é utilizado em trilhos de ferrovias, escavadoras, moinhos, tudo o que se tem um desgaste excessivo. São usados arames DIN 8555, conforme a tabela 2, a qual mostra algumas informações relevantes sobre sua composição e seus parâmetros para a devida aplicação.

Tabela 2: Arame tubular de revestimento duro.

Material	Composição	Propriedades	Polaridade	Diâmetro (mm)	Parâmetros	Aplicação
UTP AF Ledurit 68 DIN 8555 MF 10-GF- 65-GRI	C – 5,50 Si – 0,30 Mn – 0,30 Cr – 22,0 Nb – 7,00	~ 63 à 65 HRC		1,60 2,40 2,80	22 – 29V / 150 – 350A 24 – 30V / 250 – 450A 26 – 32V / 300 – 500A	Arame tubular com alta liga para revestimentos protetores contra extremo desgaste por abrasão. Em temperaturas até 450 C. Não utiliza gás.

Fonte: SBRevestimentos (2021)

### 2.3.4 Gases

Conforme estudado, diversos processos de soldas utilizam gases de proteção, e o processo de soldagem MIG/MAG não é diferente, já que apresenta quatro principais gases utilizados na prática: o argônio, o hélio e o dióxido de carbono (TATAGIBA, 2012).

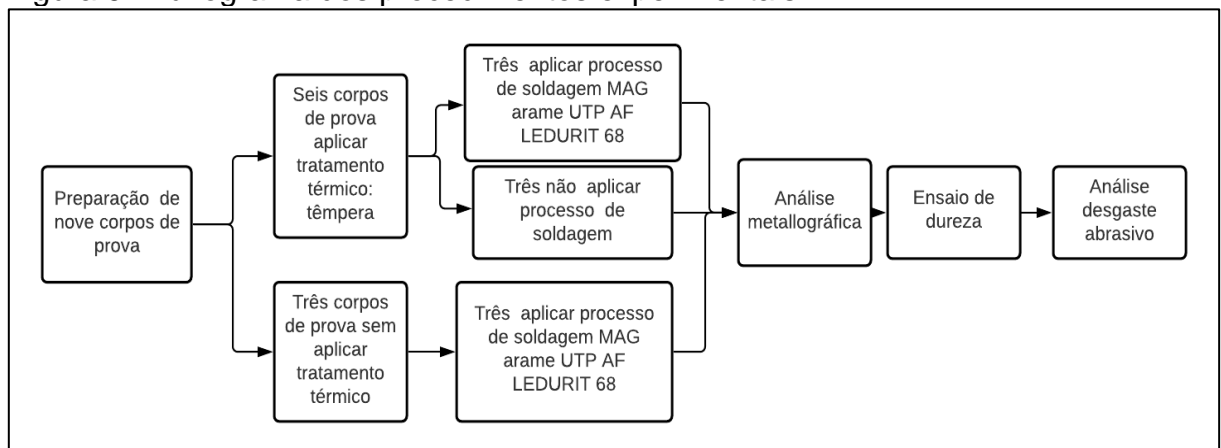
O argônio (Ar) é um gás inerte, adequado para aplicar em peças de bronze e alumínio. O hélio (He) também é um gás inerte, utilizado onde precisa-se de maior calor para melhorar a profundidade de penetração e maior velocidade de soldagem. Já entrando em gás ativo, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é usado para aplicabilidade, a qual reduz o calor na área a ser aplicada a solda, ou seja, preserva as propriedades químicas e mecânicas do material. Permite maior resistência na soldagem e maior penetração. A mistura de CO<sub>2</sub> e He forma o gás “liso” durante a soldagem, deixando um acabamento melhor, reduzindo respingos. O único defeito é que a penetração na peça é menor (AVENTA, 2016).

## 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Com o intuito de realizar todas as tarefas com sucesso, de maneira que se obtenha bons resultados, esta seção mostra os materiais necessários e as etapas que serão executadas para o estudo do trabalho.

A Fig. 9 apresenta o fluxograma de todo os procedimentos experimentais para a execução do estudo.

Figura 9: Fluxograma dos procedimentos experimentais.



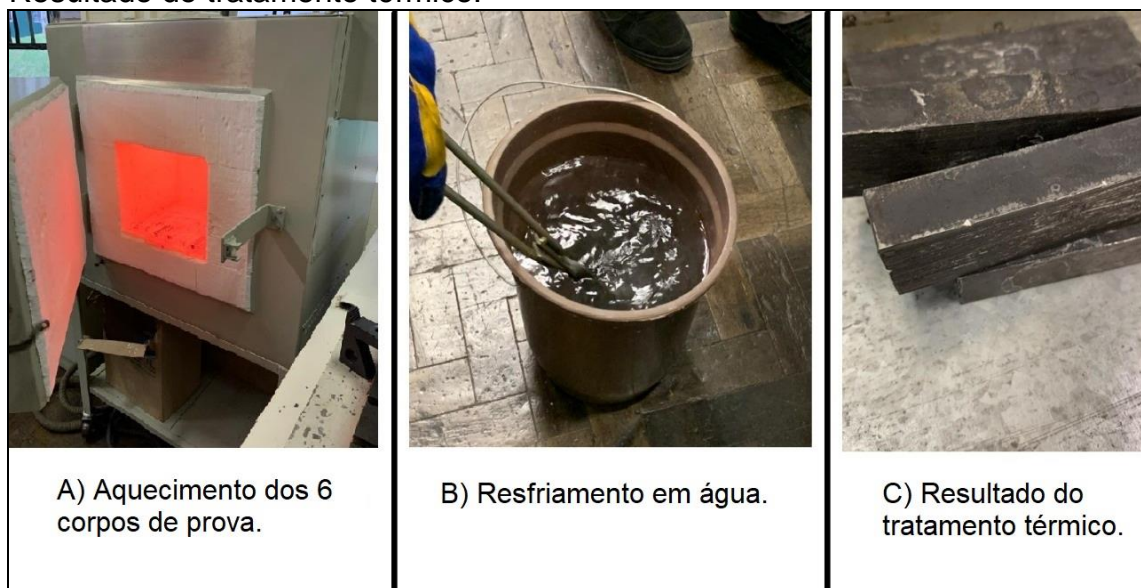
Fonte: Do Autor (2021)

As etapas foram divididas em duas principais ramificações: a primeira é quando os corpos de prova foram preparados com processo de tratamento térmico têmpera e, na segunda, não foi aplicado.

### 3.1 MATERIAL DOS CORPOS DE PROVA E CONSUMÍVEIS UTILIZADOS

Foram preparados 9 corpos de prova conforme a norma ASTM-G65 e foi realizado em Aço SAE 1045. Seis deles foram aplicados o processo de têmpera, aquecidos a uma temperatura média de 900 °C, mantido por 50 minutos e resfriado em água. A Fig. 10 mostra o a sequência do tratamento térmico.

Figura 10: Processo de tratamento térmico têmpera em 6 corpos de prova, onde: A) Aquecimento dos 6 corpos de prova; B) Resfriamento em água; C) Resultado do tratamento térmico.

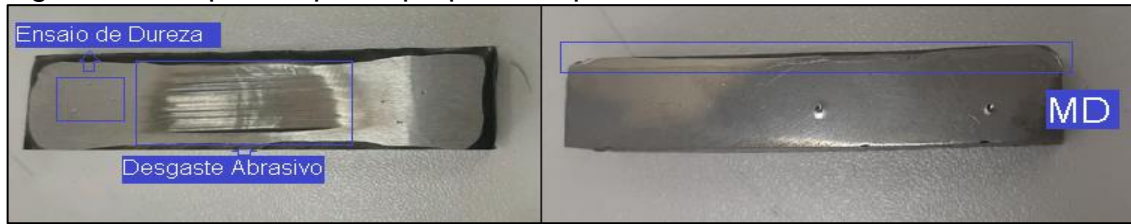


Fonte: Do Autor (2021)

Após o processo de têmpera, foram selecionados três corpos de prova temperado e três corpos de prova sem tratamento térmico para deposição de uma camada de material resistente ao desgaste. Utilizando a manufatura aditiva para deposição metálica com fusão localizada através do arco elétrico, proporcionado pelo processo de soldagem MAG. Foram revestidos com o arame UTP AF LEDURIT 68, indicados para mineração em operações de escavação onde os materiais escavados geram desgaste abrasivo às respectivas ferramentas do minerador contínuo (ferramentas de corte) (BARRAGÁS, 2021).



Figura 11: Corpos de prova preparados para os ensaios.



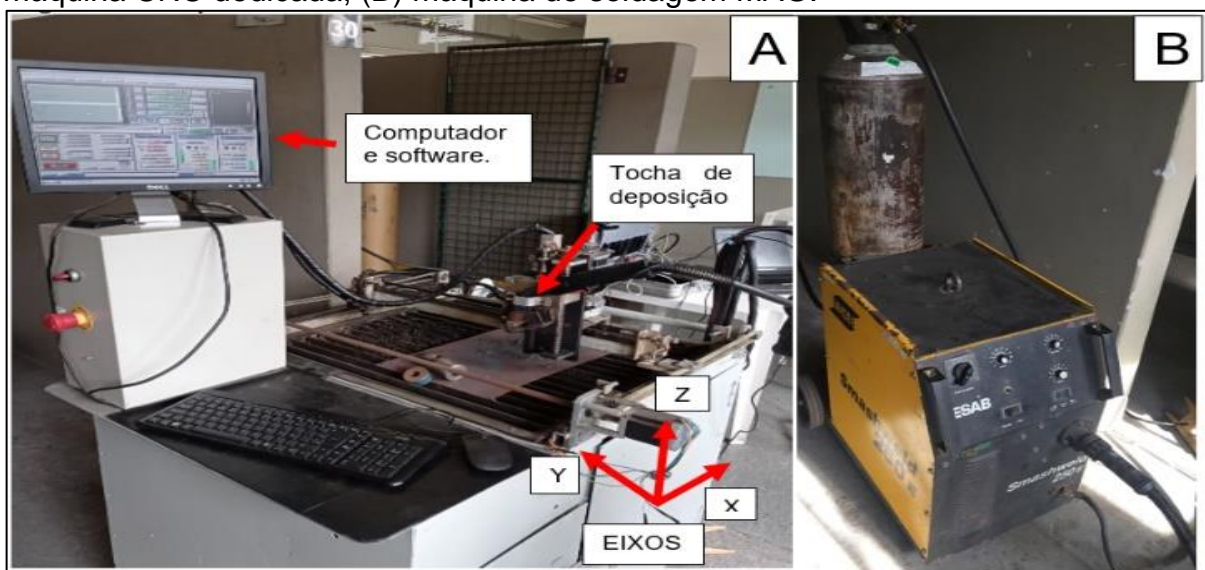
Fonte: Do Autor (2021)

Após a deposição de camada resistente ao desgaste, foram feitos ensaios de desgaste abrasivo e dureza, como mostrados na Fig. 11. A camada MD – material depositado possui aproximadamente 2mm de metal depositado pelo processo de soldagem após o processo de retificação utilizado para deixar a superfície plana.

### 3.2 SOLDAGEM MAG DOS CORPOS DE PROVA

Um conjunto de equipamento de estudo foi montado com o objetivo de se obter melhores parâmetros e processos na realização de tais atividades. A soldagem foi feita pelo processo de manufatura aditiva com um CNC (Comando Numérico Computadorizado) 3D, ou seja, três dimensões. Selecionada a Smashweld 250E, uma máquina de solda MIG/MAG, fabricada pela Esab, para a realização do processo. Foi realizado um monitoramento em alguns equipamentos que determinam a velocidade do arame, vazão de gás, tensão e corrente momentâneas. A Fig. 12 mostra os citados.

Figura 12: Conjunto de equipamentos para aplicação da manufatura aditiva. (A) máquina CNC dedicada, (B) máquina de soldagem MAG.



Fonte: Do Autor (2021)



Na soldagem MAG foi utilizado o gás de proteção chamado StarGold, 75% de argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O arame selecionado foi o UTP AF LEDURIT 68, arame com característica soldável dura, alta performance para resistir aos desgastes da ferramenta de corte. Após definir todos os consumíveis do processo, foram aplicadas duas camadas de solda nos corpos de prova selecionados.

### 3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A análise metalográfica visa estudar as estruturas internas do material, sua microestrutura, juntamente de suas propriedades físicas - onde irá ser aplicado na indústria.

As análises nos corpos de prova da estrutura do aço-base e da estrutura do metal depositado foram feitas com o Microscópio Olympus BX51 conforme Fig. 13, disponibilizado pela UNISATC, a fim de avaliar as microestruturas formadas e possíveis defeitos na deposição do material.

Figura 13: Microscópio Olympus BX51



Fonte: Do Autor (2021)

### 3.4 ANÁLISE DA DUREZA E AO DESGASTE

Após a deposição da camada de metal com resistência ao desgaste, foram realizados os ensaios de dureza Rockwell C e o ensaio de desgaste abrasivo. O Micro Hardness Tester (Testador de Microdureza), conforme Fig 14, tem como objetivo principal testar a resistência do material. Um corpo de prova é selecionado onde um penetrador de material conhecido aplica a força sobre o material a ser estudado.

Figura 14: Testador de dureza Mitutoyo HR-400.



Fonte: Do Autor (2021)

A Fig. 15 mostra um conjunto de equipamentos para a realização de ensaio do desgaste ocorrido em uma amostra, devido ao atrito da superfície entre a roda e a areia. O grau de desgaste é obtido em perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) entre a divisão da massa do corpo original (g) e a densidade do material ( $\text{g}/\text{mm}^3$ ). Desenvolvida pela UNISATC, segue a norma ASTM-G65 roda de borracha e areia seca.

Figura 15: Máquina de ensaio de desgaste abrasivo.



Fonte: Do Autor (2021)

Os parâmetros dos ensaios utilizados nos testes seguem os procedimentos da norma desde a limpeza das amostras, pesagem inicial, ensaio, limpeza pós-teste e pesagem final. A tabela 3 mostra os parâmetros usados nos ensaios.

Tabela 3: Parâmetros do ensaio de desgaste.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Vazão de areia	325 g/min	Granulometria da areia	30 mesh
Carga aplicada	45 N	Rotação da roda	200 rpm
Tempo de cada ensaio	30 min	Diâmetro da roda	228,6 mm
Corpos de prova por material	4	Abrasão linear	4309 m

Fonte: Adaptado ASTM-G65 (2016)

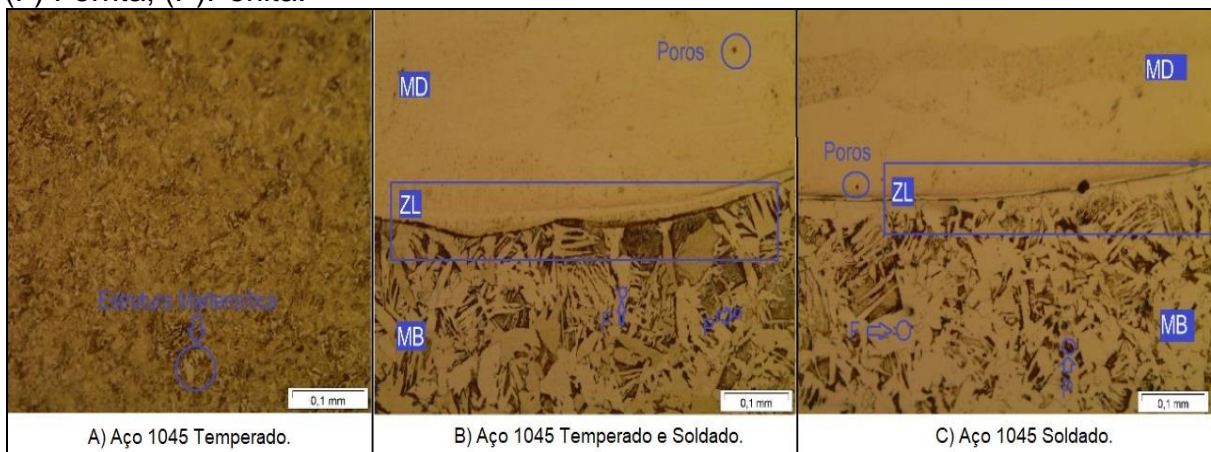
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão mostrados os resultados obtidos nos ensaios de metalografia, dureza e ensaio de desgaste abrasivo nos corpos de prova com a deposição da camada resistente ao desgaste usando a técnica de deposição metálica por manufatura aditiva de metais.

#### 4.1 METALOGRAFIA DOS CORPOS DE PROVA

Analisando as amostras, foi possível perceber nitidamente as microestruturas de cada parte da peça. A microestrutura do material de base com as características do aço SAE 1045, a Zona Termicamente Afetada - ZTA e a camada de material depositado, com o arame UTP AF LEDURIT 68, pelo processo de manufatura aditiva, conforme mostrado na Fig. 16.

Figura 16: Microestrutura do aço SAE 1045. Atacada com Nital 2,5%. Ampliação 200X. (F) Ferrita; (P) Perlita.



Fonte: Do autor (2021)

Na figura 16 seção A, pode-se observar uma estrutura convencional para um aço SAE 1045 temperado em água, com as agulhas de martensita dispersas em uma matriz ferrítica. Nas seções B e C, é possível perceber a mudança da microestrutura de acordo com o formato e tamanho dos grãos. No MB – material de base, nota-se o tamanho pequeno dos grãos, característico do aço SAE 1045, na ZTA, local onde a amostra recebeu maior intensidade de calor e pode-se verificar o aumento significativo dos grãos - característica para esta região. Já no MD – material depositado, nota-se a mudança completa no formato dos grãos, mostrando que tal material tem características diferenciadas, como por exemplo dureza maior e resistência ao desgaste abrasivo. Na ZL – zona de ligação, entre o material depositado e o material de base, pôde-se perceber que não há o surgimento de trincas e ou deslocamento, provando que o material depositado teve boa aderência ao material de base. Percebe-se também a presença de poros, um problema recorrente após aplicada a segunda camada de solda.

#### 4.2 ENSAIO DE DUREZA

Foi realizado o ensaio de dureza Rockwell C em todas as amostras, bem como foram feitos três indentações para cada região do corpo de prova e os resultados obtidos foram mostrados na tabela 4.

Tabela 4: Ensaio de Dureza Rockwell C (HRC).

<b>Ensaio Dureza Rockwell C (HRC)</b>			
<b>Nº Leitura</b>	<b>Aço 1045 Temperado</b>	<b>Aço 1045 Temperado e Soldado</b>	<b>Aço 1045 Soldado</b>
1	46,9	46,7	35,7
2	46,5	45,2	34,5
3	45,3	43,1	34,2
	<b>Média (HRC)</b>		
	46,2	45,0	34,8
	<b>Desvio Padrão (HRC)</b>		
	0,8	1,8	0,8

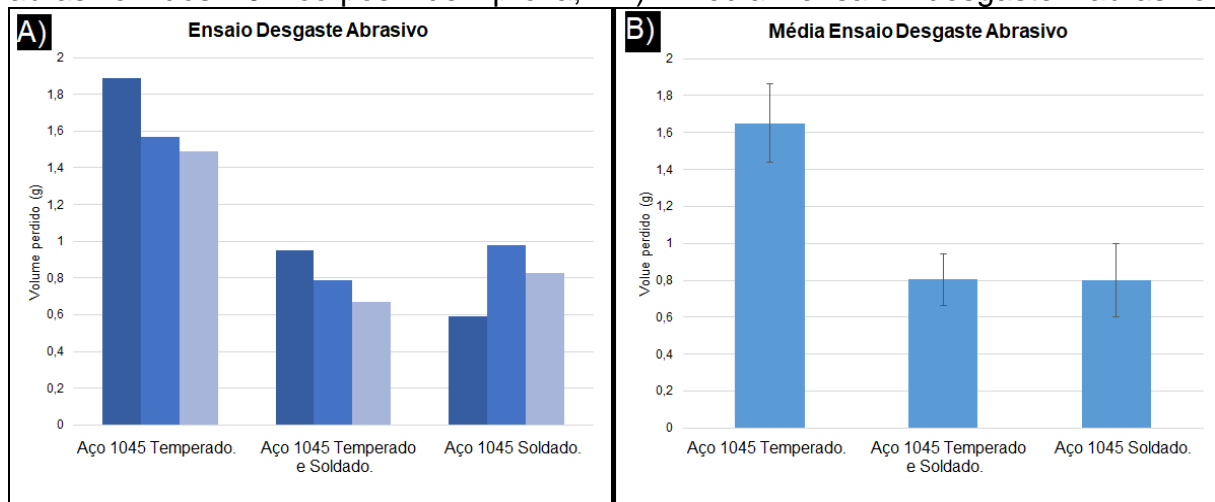
Fonte: Do autor (2021)

A dureza média encontrada no material base temperado foi de 46,2 HRC, ficando de acordo com a dureza média característica do aço SAE 1045 temperado (FREITAS, 2016). Na camada depositada pelo processo de manufatura aditiva no material base foi de 45 HRC e no material base temperado foi de 34,8 HRC. Comprovando que quando se aplica processo de soldagem, o aço temperado apresentou maior dureza aos testes realizados e o material-base sem processo térmico se torna ineficiente.

#### 4.3 DESGASTE ABRASIVO OBTIDO NAS AMOSTRAS

Para a comparação da perda de material através do ensaio de abrasão roda de borracha e areia seca, foi feita uma análise simplificada do resultado do ensaio. Fez-se apenas o cálculo simples da perda de peso em gramas das amostras com relação ao peso antes e depois do teste. Também foi acrescentado o gráfico que mostra a média da quantidade de gramas perdidas, conforme mostrado na Fig. 17.

Figura 17: Análise da perda de volume dos corpos de prova, onde: A) Ensaio desgaste abrasivo dos 9 corpos de prova; B) Média ensaio desgaste abrasivo.



Fonte: Do autor (2021)

De acordo com o gráfico da Fig. 17, o corpo de prova com aço SAE 1045 temperado se tornou mais vulnerável ao desgaste abrasivo, cerca de 1,3% de perda de volume. Nos corpos de prova soldados com UTP AF LEDURIT 68, tanto o aço temperado quanto aço sem tratamento térmico obtiveram maior resistência ao desgaste, com média de 0,86% de perda de volume. Analisando em quantidade de volume perdido, os dois aços soldados resistiram aproximadamente 2 vezes mais do que aqueles em que a solda não foi aplicada.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo realizado refere-se aos experimentos preliminares para definição do melhor parâmetro para uso na recuperação das ferramentas de corte do minerador contínuo desgastado durante a extração de carvão. O processo de recuperação em estudo usa a técnica de deposição de metal por meio da manufatura aditiva com fusão localizada, juntamente com aplicação do tratamento térmico do aço.

De acordo com os experimentos realizados, foi possível definir que na comparação entre os corpos de prova testados, aqueles que possuem revestimento UTP AF LEDURIT 68 apresentam as melhores características relacionadas ao desgaste abrasivo, sendo este classificado como um dos materiais que serão depositados no corpo das ferramentas de corte, com o objetivo de reconstrução delas e melhoria no desgaste.



Os testes preliminares feitos por meio do ensaio metalográfico mostram a presença de pequenas inclusões, as quais podem ser corrigidas por meio da limpeza das peças antes do processo de deposição e ajustes nos parâmetros na máquina de soldagem.

Por meio da análise de dureza feita apenas nos corpos de prova com material depositado UTP AF LEDURIT 68, foi possível constatar que o material depositado tem menor dureza quando comparado ao aço SAE 1045 temperado. Em ambos os processos de deposição, no aço SAE 1045 temperado e sem têmpera, isso deve-se ao fato de que o processo de soldagem possui efeito térmico diretamente ao aço, o qual faz com que o material altere suas propriedades de dureza.

Para um trabalho futuro, pode-se analisar a possibilidade de aplicar a têmpera após o processo de soldagem e a reconstrução das ferramentas de corte para extração de minério com a técnica de manufatura aditiva, fusão localizada e posterior teste em campo, na mina de carvão, com o objetivo de obter resultados práticos para a pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ABCM - Associação Brasileira do Carvão Mineral. **História do Carvão no Brasil**. Disponível em: <[https://www.carvaomineral.com.br/interna\\_conteudo.php?i\\_subarea=8&i\\_area=4](https://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=8&i_area=4)>. Acesso em 04 jun. 2021.

AÇOPORT. **Aço sae 1045**. Disponível em: <<https://www.acosporte.com.br/aco-sae-1045>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

ADES FERRAMENTAS. **Bits e Badames**. Disponível em: <<https://adesferramentas.com.br/bits-e-bedames>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

ALBERTI, Eduardo André; DA SILVA, Leandro João; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M. **Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade**. Soldag. Inspeção, Curitiba, v.19, n. 2, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-9224/S11902.11>>. Acesso em: 31 mai. 2021.

ASTM G65-16. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken, Pennsylvania, 2016.

AVENTA. **Saiba qual gás usar na solda MIG e na solda TIG**. Aventa. 2016. Disponível em: <<https://aventa.com.br/novidades/saiba-qual-gas-usar-na-solda-mig-e-na-solda-tig-aventa>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

BARRAGÁS, Gases e Ferramentas. **Arame Tubular UTP AF LEDURIT 68 1,6mm (BF)**. 2021. Disponível em: <https://www.barragas.com.br/?page=detalhe&id=1524>. Acesso em: 07 set. 2021.

BOXER. **Solda MIG/MAG: Modos de transferência metálica**. 2015. Disponível em: <https://boxersoldas.com.br/transferencia-metalica-na-solda>. Acesso em: 04 jun. 2021.

CÉSAR, Paulo. **Defeitos e soluções mais comuns na soldagem elétrica**. Alusolda, 2018. Disponível em: <https://alusolda.com.br/defeitos-e-solucoes-mais-comuns-na-soldagem-eletrica>. Acesso em: 04 jun. 2021.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 04 jun. 2021.

ESAB. **Arames tubulares ok**. v.17, n.04, 2008.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, Welerson. **Apostila Metalurgia da Soldagem**. ESAB, 2005.

FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio Turani. **Apostila Soldagem MIGMAG**. ESAB, 2005.

FREITAS, Brenda. **Estudo da influência das temperaturas de austenitização na dureza dos aços aisi d6 e sae 1045**. Trabalho de conclusão de curso - UTFPR, Londrina, 2016.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. Springer, Boston, vol. 1, pp. 299–332, 2010.

GUIMARÃES, Jéssika. **Análise de parâmetros de soldagem pelo processo convencional com arame tubular**. Trabalho de conclusão de curso - UTFPR, Londrina, 2016.

JACOB, Pedro. **Manufatura aditiva de metal, um novo passo para o mercado**. LWT sistemas, 2019. Disponível em: <https://www.lwtsistemas.com.br/2019/08/28/manufatura-aditiva-de-metal>. Acesso em: 04 jun. 2021.

KENNAMETAL. **Underground Mining**. 2014. E-book. Disponível em: <https://s7d2.scene7.com/s7viewers/html5/eCatalogSearchViewer.html?emailurl=https://s7d2.scene7.com/s7/emailFriend&searchserverurl=http://s7search1.scene7.com/s7search/&serverUrl=https://s7d2.scene7.com/is/image/&config=Scene7SharedAssets/Universal%5FHTML5%5FeCatalog%5FSearch&contenturl=https://s7d2.scene7.com/skins/&config2=companypreset&asset=Kennametal/B%2D12%2D02961%5FKMT%5FUGM13%5FEN%5FLRpdf%2D183>. Acesso em: 04 jun. 2021.

LIU, Stephen et al. **Efeito do Teor de Carbono do Metal de Base e da Alma do El**. Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 15, No. 2, p.156-164, Abr/Jun 2010.

MONTEIRO, M. T. F. **A Impressão 3D no Meio Produtivo e o Design: um Estudo na Fabricação de Joias.** 2015. 129p. Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte;

MORI, Gabryella; CESCNETI, Lorena. **Análise das propriedades metalográficas do aço sae 1045 nos processos térmicos de normalização, revenimento e têmpera.** Rev. Esfera acadêmica tecnologia, vol. 3, no. 1, 2018.

SANDVIK. **Minerador contínuo MC470.** Disponível em: <<https://www.rocktechnology.sandvik/pt-br/produtos/equipamento-de-corte-mec%C3%A2nico/mineradores-cont%C3%ADnuos/minerador-cont%C3%ADnuo-mc470>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

SBREVESTIENTOS. **UTP Maintenance.** Disponível em: <<https://sbrvestimentos.com.br/assets/pdfs/utp-maintenance2014.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

SILVA, Fernando Lucas dos Santos e. **Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco.** Projeto de Fim de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SUMIG. **Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG.** Sumig, 2018. Disponível em: <<https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag#:~:text=Os%20processos%20MIG%2FMAG%20podem,tamb%C3%A9m%20conhecidos%20como%20sistema%20sin%C3%A9rgico>>. Acesso em: 04 jun. 2021.

TATAGIBA, Luiz. **Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG.** São Paulo, Vol. 17, No. 3, p.218-228, Jul/Set 2012.

TIBURI, Fábio. 2007. **Qualidade em Soldagem.** SENAI-RS / Centro Tecnológico de Mecatrônica. Disponível em: <[https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/qualidade\\_em\\_soldagem.pdf](https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/qualidade_em_soldagem.pdf)>. Acesso em: 04 jun. 2021.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais/amigos que me incentivaram em momentos difíceis e compreenderam minha ausência enquanto eu me dedicava a realização deste trabalho. Ao professor Anderson Daleffe, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade. A instituição UNISATC e a todos os outros colegas que de alguma forma colaboraram para a realização do trabalho.