

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG**  
**Departamento De Engenharia Mecânica**  
**Curso de Especialização em Soldagem**

Alex Moreira de Oliveira

**OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW  
E GMAW APLICADOS NA RECUPERAÇÃO DOS FUROS DA CAÇAMBA CAT994**

Belo Horizonte  
2025

Alex Moreira de Oliveira

**OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW  
E GMAW APLICADOS NA RECUPERAÇÃO DOS FUROS DA CAÇAMBA CAT994**

Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado  
ao Curso de Especialização em Soldagem da  
Universidade Federal de Minas Gerais como  
requisito para a obtenção do título de  
Especialista em Soldagem.

Professor orientador: Dr. Alexandre Queiroz  
Bracarense

Belo Horizonte

2025

O48o

Oliveira, Alex Moreira de.

Otimização de custos através dos processos de soldagem FCAW e GMAW aplicados na recuperação dos furos da caçamba CAT994 [recurso eletrônico] / Alex Moreira de Oliveira. – 2025.

1 recurso online (36 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Indústria mineral. 3. Equipamento industrial.

I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Programa de Pós-Graduação  
Curso de Especialização em Soldagem



### ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 04/12/2025, às 8:30h, a Comissão Examinadora se reuniu presencialmente para avaliar o trabalho:

**Título: OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW E GMAW APLICADOS NA RECUPERAÇÃO DOS FUROS DA CAÇAMBA CAT994**

**Nome Completo Aluno: ALEX MOREIRA DE OLIVEIRA**

**Nº da Matrícula na UFMG: 2024672170**


**Local: Auditório Faculdade de Engenharia UFMG, Sala 01.**

#### **Parecer:**

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 20 minutos e após ter arguido o(a) candidato(a) por 10 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de **90** e **SEM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador **Alexandre Queiroz Bracarense**.

#### **Assinaturas:**

 Documento assinado digitalmente  
ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE  
Data: 2025.12.04 08:40:37 -0300  
URL para verificar: https://lattes.in.gov.br

**Prof. Alexandre Queiroz Bracarense**  
DEMEC/UFMG - Orientador

\_\_\_\_\_  
**Inserir Nome do Avaliador**  
**Nome da Instituição de trabalho do Avaliador**  
**Avaliador**

 Documento assinado digitalmente  
ALEX MOREIRA DE OLIVEIRA  
Data: 2025.12.04 08:40:37 -0300  
URL para verificar: https://lattes.in.gov.br

**Aluno: Alex Moreira de Oliveira**  
**CPF: 055107476-09**

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, sabedoria e perseverança concedidas em todos os momentos desta caminhada.

À minha família, pelo amor, paciência e incentivo constantes, em especial à minha esposa Dra. Natália Dias Moreira de Oliveira, por sua compreensão, apoio e presença incondicional durante os períodos de dedicação e pelas ausências decorrentes das aulas e compromissos acadêmicos.

À minha amada filha Ketlyn Isabella Moreira de Oliveira, razão maior de inspiração e motivação para seguir em busca de crescimento pessoal e profissional.

Expresso minha sincera gratidão aos professores e colegas do curso de Pós-Graduação em Soldagem da UFMG, pelo compartilhamento de conhecimento e pelas valiosas contribuições durante o processo de aprendizado.

Em especial, agradeço ao Prof. Dr. Alexandre Bracarense, pela orientação, disponibilidade e confiança depositadas na execução deste trabalho, fundamentais para a consolidação dos resultados apresentados.

Registro meus sinceros agradecimentos ao Eng. Soldagem Internacional Vinício dos Anjos, pelo apoio técnico e pelas valiosas orientações que contribuíram diretamente para o alcance dos objetivos deste trabalho.

Agradeço também à empresa L&A Mandrilhamento pela preparação e usinagem, a empresa Codifer, pelo fornecimento dos mancais utilizados nas etapas experimentais, à empresa ASR, pela execução dos processos de soldagem e a empresa SOTREQ pelos fornecimentos dos dados técnicos e operacionais da máquina.

Registro um agradecimento ao Supervisor Carlito dos Santos pelos cortes das amostras e ao soldador Matheus Alexander Damascena de Carvalho, pelo comprometimento durante a execução dos cordões de solda, cuja experiência e dedicação foram essenciais para a qualidade e sucesso dos ensaios realizados.

Estendo meus agradecimentos ao Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais (LRSS) (UFMG), pelo apoio técnico e pela realização dos ensaios de dureza e metalografia, fundamentais para a análise e validação dos resultados deste estudo.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, seja por meio de apoio técnico, incentivo, amizade ou confiança.

## RESUMO

A indústria da mineração opera com equipamentos de grande porte submetidos a condições extremas, o que torna indispensáveis processos de manutenção e recuperação estrutural que garantam confiabilidade, segurança e produtividade. Dentre os componentes que exigem maior atenção estão as caçambas das carregadeiras, cujos furos e estruturas sofrem intenso desgaste e necessitam de recuperação por soldagem antes da usinagem final. Este trabalho tem como objetivo demonstrar a importância da correta execução dos processos de soldagem aplicados nessa etapa, evidenciando que, mais do que a escolha do processo em si, o fator determinante para o sucesso é a aplicação com técnica adequada, controle de parâmetros e mão de obra qualificada. Para isso, foram analisadas intervenções em campo durante paradas programadas de manutenção em caçambas de carregadeiras de grande porte, nas quais se observaram diferentes aplicações de processos usualmente empregados, como GMAW (Gas Metal Arc Welding) e FCAW (Flux Cored Arc Welding), ambos amplamente utilizados na recuperação de furos usinados. Verificou-se que, quando executados corretamente, os processos apresentam desempenho equivalente e resultados plenamente satisfatórios; contudo, falhas de preparação, parâmetros incorretos ou execução inadequada podem gerar retrabalhos e alongar o tempo de máquina parada, impactando diretamente na disponibilidade operacional e no custo da produção. Considerando que uma hora de inatividade de um equipamento desse porte pode ultrapassar R\$ 1.000.000,00 em perdas, a etapa de soldagem, embora represente pequena parcela do custo total da manutenção, torna-se decisiva para o sucesso do reparo. Conclui-se que a otimização de custos na recuperação de componentes de grande porte está diretamente ligada à execução qualificada e à eficiência do processo adotado, independentemente do tipo de soldagem selecionado. Assim, reforça-se que a qualidade técnica, o controle operacional e o comprometimento com a boa prática são os fatores que garantem a integridade estrutural, reduzem retrabalhos e asseguram a produtividade contínua dos equipamentos na mineração.

**Palavras-chave:** soldagem; FCAW; GMAW; otimização de custos; mineração; carregadeira Caterpillar 994.

## ABSTRACT

The mining industry operates with large-scale equipment subjected to extreme working conditions, which makes maintenance and structural recovery processes essential to ensure reliability, safety, and productivity. Among the components that require the greatest attention are the buckets of loading equipment, whose holes and structures are subject to intense wear and therefore require recovery by welding prior to final machining. This study aims to demonstrate the importance of the correct execution of welding processes applied at this stage, highlighting that, more than the choice of the welding process itself, the determining factor for success lies in proper application techniques, parameter control, and qualified labor. To this end, field interventions carried out during scheduled maintenance shutdowns of large mining loader buckets were analyzed, in which different applications of commonly used welding processes were observed, such as GMAW (Gas Metal Arc Welding) and FCAW (Flux Cored Arc Welding), both widely employed in the recovery of machined holes. The results showed that, when properly executed, both processes present equivalent performance and fully satisfactory results. However, failures related to surface preparation, incorrect parameters, or inadequate execution can lead to rework and extend equipment downtime, directly impacting operational availability and production costs.

Considering that one hour of downtime for equipment of this size may exceed R\$ 1.000.000,00 in losses, the welding stage—although representing a small portion of the total maintenance cost—becomes decisive for the success of the repair. It is concluded that cost optimization in the recovery of large-scale components is directly linked to qualified execution and process efficiency, regardless of the welding process selected. Thus, technical quality, operational control, and commitment to best practices are reinforced as key factors to ensure structural integrity, reduce rework, and maintain continuous productivity in mining operations.

Keywords: welding; FCAW; GMAW; cost optimization; mining; Caterpillar 994 loader.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASM: American Society for Metals

ASTM: American Society of Mechanical Engineers

AWS: American Welding Society

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

GMAW: Gas Metal Arc Welding

FCAW: Flux Cored Arc Welding

ESAB: Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

Ar: Argônio

E: Eléctrodo

ER: Eléctrodo Revestido

1G: Posição Plana

2G: Posição Horizontal

3G: Posição Vertical

4G: Posição Sobrecabeça

FBTS: Federação Brasileira de Tecnologia da Soldagem

CP's: Corpos de Prova

RPM: Rotação por Minuto

Mm: Milímetros

H: Horas

M: Minutos

S: Segundo

L: Litros

%: Porcentagem

R\$: Real

\$: Dólar

MB: Metal Base

ZF: Zona Fundida

ZTA: Zona Termicamente Afetada

MPa: Mega Pascal

A: Amperes

V: Volts

°C: Graus Celsius

KJ/in: Kilo Joules/Polegada

N: Número

T: Tonelada

Hz: Hertz

KN: Kilo Newtons

HV: Hard Vickers

ISO: International Organization for Standardization

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 01 – Carregadeira CAT994K.

Figura 02 – Caçamba CAT994 (Sinalização dos Furos a serem recuperados).

Figura 03 – Mancal de corpo de prova (Processo de limpeza mecânica Retífica).

Figura 04 – Mancal de corpo de prova (Processo de limpeza Pre-usinagem Mandrilhadora Portátil).

Figura 05 – Mancal de corpo de prova (Controle Térmico Pré-aquecimento, Posição de soldagem).

Figura 06 – Instrução e sequencia de soldagem.

Figura 07 – Mancal de corpo de prova (Retirada de três amostras para ensaios).

Figura 08 – Aparelho Durômetro (Amostras ensaiadas).

Figura 09 – Macroestruturas (Amostras ensaiadas limpeza mecânica processo GMAW).

Figura 10 – Macroestruturas (Amostras ensaiadas limpeza pré-usinagem processo GMAW).

Figura 11 – Macroestruturas (Amostras ensaiadas limpeza pré-usinagem processo FCAW ).

Figura 12 – Macroestruturas (Amostras ensaiadas limpeza mecânica processo FCAW).

Figura 13 – Carregadeira CAT994K em operação.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 – Matrix experimental (Processos e Preparações).

Tabela 02 – Parâmetros de Soldagem.

Tabela 03 – Controle dos processos de soldagem.

Tabela 04 – Dureza média por amostra, processo, preparação e posição HV.

Tabela 05 – Dureza média HV, comparação entre os Processos e Preparação.

Tabela 06 – Diferença de Dureza HV entre preparações.

Tabela 07 – Observações gerais metalográficas.

Tabela 08 – Estimativa de pernas econômicas associadas a paradas de operação da CAT994.

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 01 – Dureza HV média no MB.

Gráfico 02 – Dureza HV média no ZTA.

Gráfico 03 – Dureza HV média no ZF.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>14</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>4 MATERIAIS E METODOS.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 CONDIÇÕES DE SOLDAGEM.....</b>	<b>18</b>
<b>4.3. PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM .....</b>	<b>19</b>
<b>4.4 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES.....</b>	<b>20</b>
<b>4.4.1. Influência da Preparação da Superfície: .....</b>	<b>21</b>
<b>4.4.2. Diferenças entre os Processos GMAW e FCAW: .....</b>	<b>21</b>
<b>4.4.3. Dificuldades nas Posições de Soldagem: .....</b>	<b>21</b>
<b>4.4.4. Análise Geral de Desempenho:.....</b>	<b>22</b>
<b>4.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE .....</b>	<b>22</b>
<b>4.5.1 Resultados e Discussão - Dureza (HV) nas Zonas MB, ZTA e ZF .....</b>	<b>22</b>
<b>4.5.2 Análise técnica.....</b>	<b>25</b>
<b>4.5.3 Análise Metalográfica (Macrografias das Amostras).....</b>	<b>26</b>
<b>4.5.4 Conclusão – Análise Macrografia dos Processos GMAW e FCAW .....</b>	<b>29</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 TEMPOS DE EXECUÇÃO E PRODUTIVIDADE.....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 QUALIDADES DO CORDÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS.....</b>	<b>31</b>
<b>5.3 ANÁLISES COMPARATIVAS GERAIS .....</b>	<b>32</b>
<b>5.4 IMPACTOS ECONÔMICOS DA PARADA OPERACIONAL .....</b>	<b>32</b>
<b>5.4.1 Dados .....</b>	<b>33</b>
<b>6. CONCLUSÃO FINAL .....</b>	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da mineração se caracteriza por operações contínuas, de grande porte e alto impacto econômico, nas quais a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos são fatores determinantes para o desempenho produtivo. Em especial, as carregadeiras de grande porte, como a Caterpillar 994 conforme Figura 1, desempenham papel essencial no carregamento e transporte de minério, estando submetidas a condições severas de impacto, abrasão e fadiga estrutural. Entre os componentes mais suscetíveis a desgaste estão as caçambas e seus pontos de articulação, onde se encontram furos e faces que, com o tempo, sofrem deformações e perdas dimensionais, exigindo intervenções de recuperação por soldagem e posterior usinagem de precisão.

O processo de soldagem empregado na recuperação desses componentes deve assegurar não apenas a integridade estrutural, mas também a eficiência operacional, considerando que uma falha nessa etapa pode resultar em retrabalhos e longos períodos de máquina parada, o que representa perdas econômicas expressivas. Estima-se que, em equipamentos desse porte, o custo de inatividade possa ultrapassar um milhão de reais por hora, o que reforça a importância de um processo de soldagem executado com qualidade e controle rigoroso de parâmetros. Assim, a escolha do processo adequado e, principalmente, a correta aplicação das técnicas e procedimentos, são fatores fundamentais para o sucesso da manutenção.

Diversos processos podem ser empregados na recuperação de furos usinados, sendo o GMAW (Gas Metal Arc Welding) e o FCAW (Flux Cored Arc Welding) amplamente utilizados por sua versatilidade, produtividade e facilidade de aplicação em campo. Entretanto, mais do que a escolha entre um ou outro, o diferencial está na execução qualificada, no uso de parâmetros corretos, na limpeza e preparação adequada das superfícies e na capacitação dos soldadores responsáveis. A eficiência global do processo de soldagem depende diretamente desses fatores, que determinam a qualidade final do reparo e a durabilidade do componente em serviço.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo evidenciar a importância da aplicação correta dos processos de soldagem na recuperação estrutural de furos em caçambas de carregadeiras de grande porte, demonstrando que a otimização de custos na manutenção está diretamente associada à qualidade da execução, à padronização dos procedimentos e à qualificação técnica da equipe envolvida. Busca-se, portanto, reforçar que a excelência na

soldagem representa não apenas um requisito técnico, mas também um fator estratégico na redução de perdas operacionais e na maximização da produtividade na mineração.



994K Large Wheel Loader

Figura 1. Carregadeira CAT994K

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e comparar os processos de soldagem GMAW e

FCAW aplicados na recuperação de furos de mancais da caçamba de uma carregadeira Caterpillar 994K, considerando diferentes métodos de preparação superficial, especificamente limpeza mecânica manual (retífica) e pré-usinagem, bem como a execução em múltiplas posições de soldagem (1G, 2G, 3G e 4G).

Busca-se analisar o desempenho operacional, o tempo de execução, o comportamento metalúrgico e a qualidade dos cordões de solda, por meio de ensaios de dureza Vickers e análises macrográficas, de forma a verificar a viabilidade técnica de cada processo nas condições reais de campo.

Adicionalmente, o estudo tem como o objetivo demonstrar a influência na correta execução do processo de soldagem, do controle de parâmetros e da preparação da superfície na otimização de custos de manutenção, evidenciando que a redução do tempo de parada operacional e a prevenção de retrabalhos são fatores determinantes para a disponibilidade e produtividade de equipamentos de grande porte na indústria da mineração.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A recuperação de componentes estruturais de grande porte por meio de processos de soldagem é amplamente empregada na indústria da mineração, em função das severas condições operacionais a que os equipamentos são submetidos, como elevadas cargas, abrasão intensa e impactos cíclicos. Segundo Modenesi (2017), a soldagem aplicada à manutenção industrial exige não apenas a seleção adequada do processo, mas também o controle rigoroso de parâmetros térmicos, a preparação correta da superfície e a qualificação da mão de obra, fatores diretamente relacionados à integridade metalúrgica do reparo.

No contexto da recuperação de furos e superfícies desgastadas, os processos GMAW (Gas Metal Arc Welding) e FCAW (Flux Cored Arc Welding) destacam-se por sua elevada produtividade, versatilidade e ampla aplicabilidade em operações de campo. De acordo com a American Welding Society (AWS D1.1/D1.1M, 2020), ambos os processos são indicados para soldagem de estruturas de aço carbono e de alta resistência, desde que observadas as recomendações de controle térmico, sequência de passes e preparação adequada da junta ou superfície a ser recuperada.

Bracarense (2016) ressalta que, em aplicações de recuperação estrutural, especialmente em aços de alta resistência como o ASTM A514, o controle do aporte térmico e das temperaturas de pré-aquecimento e interpasse é fundamental para evitar a formação de microestruturas frágeis na zona termicamente afetada (ZTA). A ausência desse controle pode resultar em endurecimento excessivo, perda de tenacidade e redução da vida útil do componente recuperado.

Estudos comparativos entre os processos GMAW e FCAW indicam que o GMAW apresenta maior taxa de deposição efetiva e melhor acabamento superficial, devido à ausência de escória e à maior estabilidade do arco em condições controladas. Por outro lado, o FCAW tende a apresentar maior robustez operacional, especialmente em posições forçadas, como a soldagem sobrecabeça (4G), em função da escória formada, que auxilia na sustentação do metal fundido (SOUZA; SANTOS; PEREIRA, 2019)

A preparação superficial é outro fator determinante na qualidade da soldagem de recuperação. Segundo Bracarense e Pimenta (2021), superfícies previamente usinadas proporcionam melhor molhabilidade do metal de adição, maior uniformidade do cordão e menor variabilidade térmica, favorecendo a repetibilidade do processo. Em contrapartida, a limpeza mecânica manual, embora amplamente utilizada em campo por questões logísticas e de tempo, depende fortemente da habilidade do soldador e pode resultar em maior dispersão de resultados.

Do ponto de vista normativo, a AWS D14.3/D14.3M (2019) estabelece diretrizes específicas para soldagem de equipamentos de terraplenagem e mineração, enfatizando a importância da qualificação dos procedimentos de soldagem, da inspeção visual e do controle de descontinuidades admissíveis. Complementarmente, a ABNT NBR ISO 5817 (2021) define critérios de aceitação para imperfeições em soldas, contribuindo para a padronização da avaliação da qualidade dos reparos.

A caracterização mecânica por meio de ensaios de dureza, como o método Vickers, é amplamente empregada para avaliar a integridade metalúrgica das regiões de metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Conforme a ABNT NBR ISO 6507-1 (2021), variações moderadas de dureza são esperadas em processos de soldagem de aços de alta resistência, desde que não ultrapassem limites que comprometam a usinabilidade ou a tenacidade do material.

Sob a ótica econômica, a literatura destaca que, em equipamentos de grande porte, o custo da parada operacional frequentemente supera de forma significativa o custo direto dos processos de soldagem e usinagem. Assim, a otimização da execução da soldagem, com foco na prevenção de retrabalhos e na redução do tempo de inatividade, torna-se um fator estratégico para a manutenção industrial (AWS D14.3, 2019).]

Dessa forma, a literatura evidencia que a escolha entre os processos GMAW e FCAW deve considerar não apenas aspectos metalúrgicos, mas também fatores operacionais, econômicos e logísticos. A correta aplicação dos procedimentos, associada à preparação adequada da superfície e ao controle dos parâmetros de soldagem, é determinante para garantir a confiabilidade estrutural, a produtividade e a redução de custos na recuperação de componentes de grande porte na indústria da mineração.

#### **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

O estudo foi conduzido durante uma parada programada de manutenção em campo, com o objetivo de avaliar a aplicação correta dos processos de soldagem empregados na recuperação de furos de mancais de articulação da caçamba de uma carregadeira Caterpillar 994, conforme Figura 2. A metodologia foi estruturada conforme recomendações das normas AWS D14.3, AWS D1.1 e ABNT NBR ISO 5817, assegurando a rastreabilidade, repetibilidade e comparabilidade dos resultados obtidos.



Figura 2 - Processo de reforma dos furos da caçamba Cat994

#### 4.1 Preparação das Amostras

Foram selecionados quatro (4) mancais representativos do conjunto estrutural da caçamba, apresentando desgaste acentuado devido à operação sob altas cargas e abrasão. As amostras foram escolhidas com geometria e dimensões equivalentes, de modo a manter condições comparáveis de análise e permitir a avaliação dos diferentes tipos de preparação superficial (limpeza mecânica manual (retífica) e pré-usinagem do furo) e processos de soldagem GMAW (ER70S-6) e (FCAW (E71T-1) conforme apresentado na Tabela 1. Nas Figuras 3 e 4 estão apresentados os dois tipos de preparação superficial (limpeza mecânica manual (retífica) e pré-usinagem ).

Tabela 1. **Matrix Experimental**

Mancal	Processo	Preparação para soldagem
1	GMAW (ER70S-6)	Limpeza mecânica manual (retífica)
2		Pré-usinagem
3	FCAW (E71T-1)	Limpeza mecânica manual (retífica)
4		Pré-usinagem



Figura 3. **Processo de limpeza mecânica manual (Retifica com ponta manual)**



Figura 4. **Processo de limpeza com pré-usinagem (Mandrilhadora Portátil)**

A comparação dessas condições permitiu avaliar a influência da preparação superficial (usinagem x limpeza manual) sobre a qualidade da solda e o desempenho metalúrgico, considerando as posições 1G, 2G, 3G e 4G, que representam as situações mais comuns em campo. Não foi realizado mandrilhamento após a soldagem, a fim de preservar o estado original do metal depositado para os ensaios posteriores.

#### **4.2 Condições de Soldagem**

As condições de soldagem foram definidas considerando a classe metalúrgica do material (ASTM A514), as posições de execução 1G, 2G, 3G e 4G, o tipo de processo (GMAW e FCAW) e a sequência operacional adotada durante a recuperação dos furos. Foram seguidos parâmetros previamente estabelecidos em ensaios de campo, observando-se o controle de temperatura de pré-aquecimento de acordo com as características metalúrgicas do material dos mancais, conforme Figura 5, a sequência de passes e a orientação das soldas para minimizar tensões residuais e evitar deformações.



Figura 5. Processo pré-aquecimento e posições de soldagem

### 4.3. Procedimento de soldagem

O procedimento foi conduzido conforme ilustrado na Figura 6, que apresenta a sequência de aplicação das soldas utilizadas na recuperação dos furos dos mancais. O processo consistiu em contornar os furos com soldas (W1) e (W2). Aplique soldas transversais (W3) nos furos. As soldas transversais devem conectar as soldas que contornam os furos, garantindo a continuidade entre os passes de contorno e o preenchimento interno.

Conforme ilustrado na Figura 6 os passes de contorno (W1 e W2) correspondem principalmente à posição 2G, enquanto os passes transversais de preenchimento (W3) foram realizados predominantemente na posição 3G (vertical ascendente). Nas etapas de soldagem inferior e superior, ocorreram também as posições 1G (plana) e 4G (sobre cabeça), conforme o acesso do soldador e a configuração da peça.

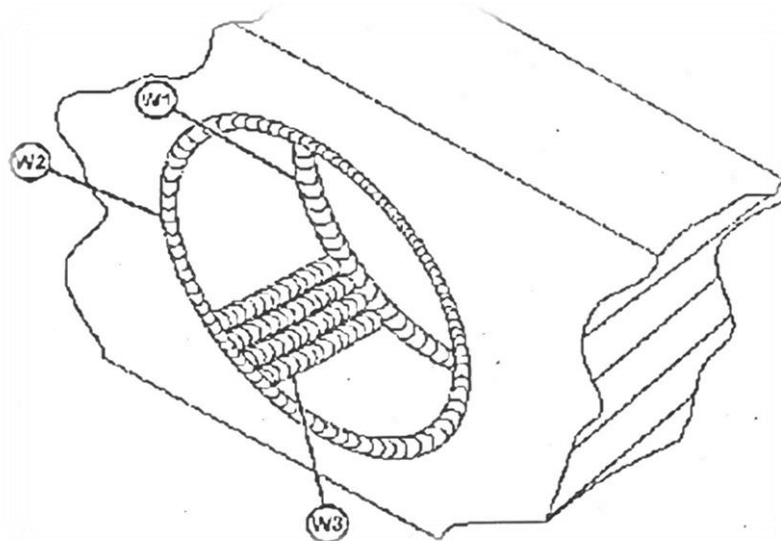


Figura 6. Sequência de soldagem dos furos com passes W1, W2 e W3.

Após processo de limpeza mecânica ou de pré- usinagem aplicou-se o **pré-aquecimentos de 100 – 150 °C** e interpasses temperatura máxima de **200°C**.

Após cada solda permitiu-se que as soldas esfriem lentamente para evitar tensões internas. Reparou-se quaisquer soldas defeituosas removendo o metal depositado e repetindo o processo após o pré-aquecimento do furo.

O procedimento de recuperação dos furos foi executado em múltiplas posições de soldagem, **1G, 2G, 3G e 4G** em função da geometria e orientação da peça em campo.

Os parâmetros de soldagem foram definidos com base em recomendações normativas das **AWS D1.1 e AWS D14.3**, associadas às práticas operacionais padronizadas para manutenção de componentes estruturais de grande porte conforme apresentado na **Tabela 2**. A execução foi realizada manualmente por soldadores qualificados, com controle rigoroso de corrente, tensão, velocidade de alimentação e fluxo de gás protetor buscando o melhor equilíbrio entre taxa de deposição, estabilidade do arco e controle da penetração.

**Tabela 2. Parâmetros de soldagem**

<b>Parâmetro</b>	<b>FCAW</b>	<b>GMAW</b>
Consumível	E71T-1C	ER70S-6
Diâmetro do arame	1,2 mm	1,2 mm
Corrente	180–280 A	180–300 A
Tensão	22–29 V	22–30 V
Velocidade de alimentação	5–10 m/min	5,5–10,5 m/min
Gás de proteção (Vazão)	CO <sub>2</sub> (18–22L/min)	75% Ar + 25% CO <sub>2</sub> (16–20L/min)

#### **4.4 Observações Complementares**

Durante a execução dos cordões, foi realizado o controle do tempo total de soldagem para cada processo (GMAW e FCAW) e tipo de preparação superficial (limpeza manual e pré-usinagem). O objetivo foi comparar a eficiência operacional entre os processos e correlacionar o tempo de execução com as condições de superfície e desempenho observado conforme Tabela 3.

Tabela 3. Controle dos processos de Soldagem

Tipo de Preparação	Nº do Mancal	Tempo GMAW	Tempo FCAW	Diferença ( $\Delta t$ )
Limpeza Manual	1 e 4	1:10h	1:17h	+ 0:07 h (FCAW mais lento)
Pré-Usinagem	2 e 3	0:46h	1:00h	+ 0:14 h (FCAW mais lento)

#### 4.4.1. Influência da Preparação da Superfície:

Nos mancais preparados apenas com limpeza manual, observou-se uma superfície com maior irregularidade e presença de impurezas, exigindo maior controle da tocha e ajustes na distância do arco durante a soldagem. Isso resultou em aumento do tempo total, principalmente no FCAW, que demanda limpeza de escória entre passes. Já nos mancais submetidos à pré-usinagem, a superfície apresentou melhor planicidade e menor contaminação, o que favoreceu a estabilidade do arco elétrico, melhor molhabilidade do metal de adição e redução do tempo de execução, com destaque para o GMAW, que obteve maior regularidade dos cordões.

#### 4.4.2. Diferenças entre os Processos GMAW e FCAW:

O GMAW mostrou maior taxa de deposição e menor tempo médio, sendo mais produtivo em superfícies usinadas. O FCAW, embora tenha apresentado maior tempo total, proporcionou melhor penetração e perfil de cordão mais reforçado, especialmente em regiões de difícil acesso. A diferença média entre os tempos variou de 7 a 14 minutos por mancal, evidenciando o impacto do método de preparação na eficiência de cada processo.

#### 4.4.3. Dificuldades nas Posições de Soldagem:

A execução nas posições 1G, 2G, 3G e 4G demonstrou que a posição 4G (sobre cabeça) foi a mais crítica. No processo GMAW, observou-se maior dificuldade de controle do banho de fusão, já que não há formação de escória que auxilie na sustentação do metal fundido o que exigiu maior habilidade do soldador, pausas entre passes e maior atenção à fluidez do metal líquido. Já o FCAW, mesmo com o inconveniente da escória, teve maior facilidade de deposição nessa posição, pois o revestimento do arame ajuda na sustentação do cordão, reduzindo a tendência de gotejamento. Contudo, isso implicou tempo adicional de limpeza entre passes.

#### 4.4.4. Análise Geral de Desempenho:

Considerando todas as condições, o GMAW apresentou melhor desempenho em superfícies pré-usinadas e posições planas, enquanto o FCAW mostrou maior robustez em posições forçadas, como a 4G. Dessa forma, a escolha do processo deve considerar não apenas o tempo de execução, mas também o tipo de superfície, a posição de soldagem e a experiência do soldador, equilibrando produtividade e qualidade metalúrgica do cordão.

#### 4.5 Ensaios de Caracterização e Análise

Após a conclusão das soldagens, foram retirados três amostras (P) de cada mancal conforme Figura 7, correspondentes às posições 1G, 2G e 4G, de modo a representar as condições mais críticas de execução. Esses corpos de prova foram submetidos aos ensaios de dureza Vickers e análise metalográfica, com o objetivo de avaliar a integridade metalúrgica dos depósitos e a influência das posições de soldagem na estrutura final da junta.



Figura 7. Mancal - Amostras (P) e Posições (1G, 2G e 4G)

##### 4.5.1 Resultados e Discussão - Dureza (HV) nas Zonas MB, ZTA e ZF

Foram ensaiadas quatro amostras (P1 a P4) contemplando os processos GMAW e FCAW, nas posições 1G, 2G e 4G, conforme demonstrado em Figura 8 com dois tipos de preparação superficial: limpeza manual (P1 e P4) e pré-usinagem (P2 e P3). Foram realizados ensaios com 5 pontos de dureza em cada amostra aonde as Tabelas 4 a 6 apresentam as médias de dureza por condição e os Gráficos 1 a 3 comparam o comportamento nas zonas MB, ZTA e ZF.

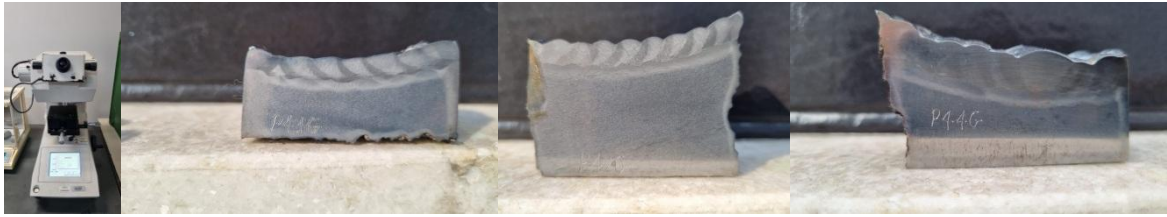


Figura 8. Durômetro de microdureza Vickers - Amostras (P) e Posição (1G, 2G e 4G)

Fonte: LRSS – UFMG, 2025

Tabela 4. Dureza média por Amostra, Processo, Preparação e Posição (HV).

Amostra	Processo	Preparação	Posição	MB	ZTA	ZF
P1	GMAW	Limpeza manual	1G	235.0	311.8	217.6
P1	GMAW	Limpeza manual	2G	234.0	329.2	223.2
P1	GMAW	Limpeza manual	4G	254.2	302.4	212.2
P2	GMAW	Pré-usinagem	1G	301.2	324.2	221.4
P2	GMAW	Pré-usinagem	2G	268.4	345.6	238.8
P2	GMAW	Pré-usinagem	4G	229.4	281.8	216.0
P3	FCAW	Pré-usinagem	1G	245.2	335.4	221.8
P3	FCAW	Pré-usinagem	2G	273.0	301.2	227.8
P3	FCAW	Pré-usinagem	4G	254.0	287.2	243.6
P4	FCAW	Limpeza manual	1G	244.4	306.0	218.6
P4	FCAW	Limpeza manual	2G	237.2	310.2	205.2
P4	FCAW	Limpeza manual	4G	231.8	341.0	216.0

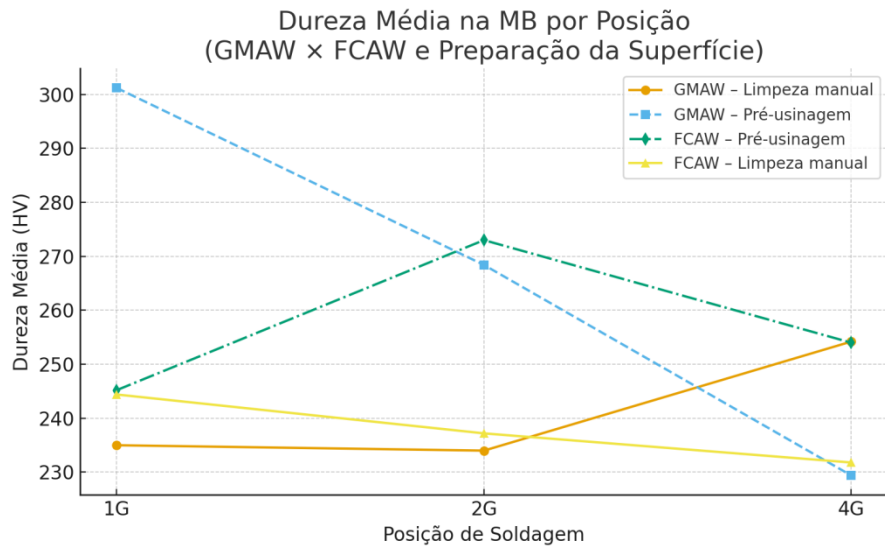
Tabela 5. Médias por Processo × Preparação (HV).

Processo	Preparação	MB	ZTA	ZF
GMAW	Limpeza manual	241.07	314.47	217.67
GMAW	Pré-usinagem	266.33	317.2	225.4
FCAW	Limpeza manual	237.8	319.07	213.27
FCAW	Pré-usinagem	257.4	307.93	231.07

Tabela 6. Diferenças entre preparações Pré-usinagem – Limpeza manual (HV).

Processo	$\Delta(\text{MB})$ Pré - Limpeza	$\Delta(\text{ZTA})$ Pré - Limpeza	$\Delta(\text{ZF})$ Pré - Limpeza
GMAW	25.26	2.73	7.73
FCAW	19.6	-11.14	17.8

**Gráfico 1. Dureza média no MB.**



**Gráfico 2. Dureza média na ZTA.**

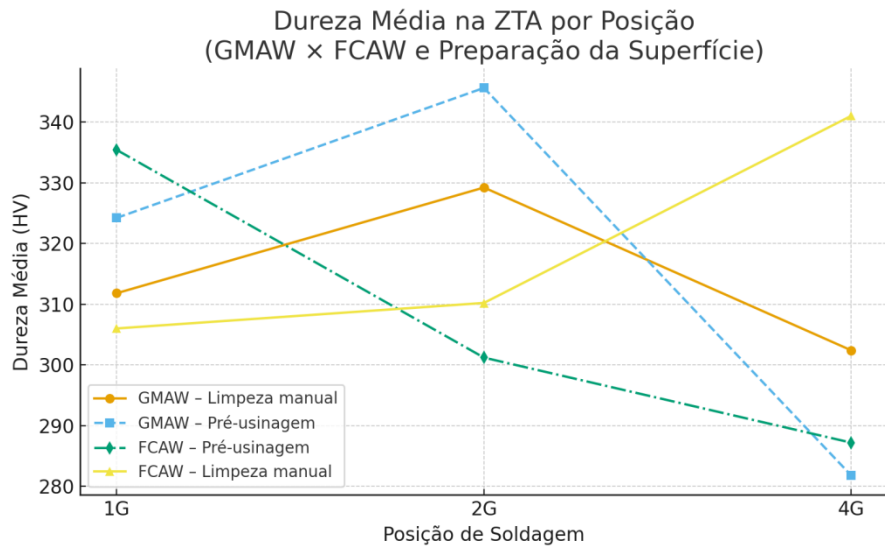
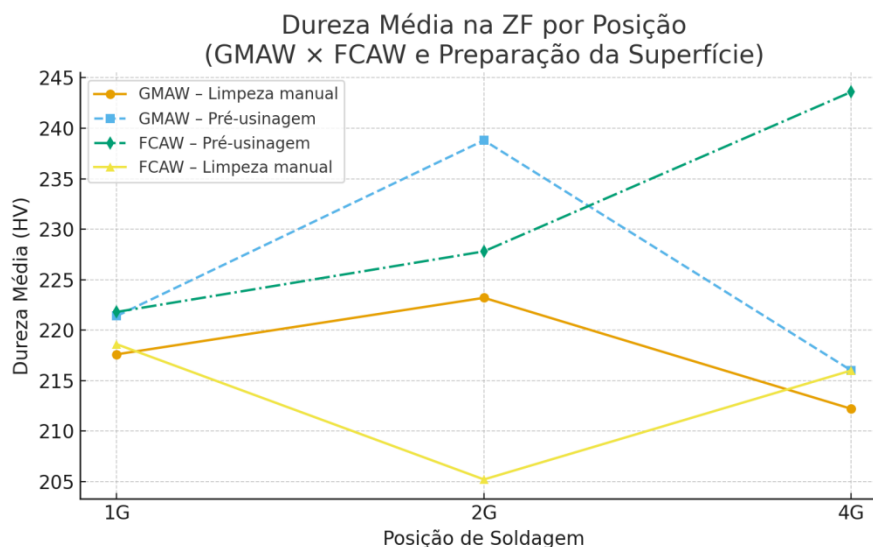


Gráfico 3. Dureza média na ZF.



#### 4.5.2 Análise técnica

**MB (Metal Base):** Os valores mantiveram-se estáveis entre 230-301 HV, sem diferença relevante entre processos. A preparação por pré-usinagem elevou discretamente a MB no GMAW (+25.3 HV), enquanto reduziram no FCAW (19.6 HV), efeitos atribuídos à condução térmica local e à repetitividade do aporte de calor.

**ZTA (Zona Termicamente Afetada):** Apresentou os maiores valores e variações. Em GMAW, a pré-usinagem aumentou a ZTA em +2.7 HV na média, sugerindo maior taxa de resfriamento efetivo na interface e possível formação de microestruturas mais endurecidas. Em FCAW ocorreu o inverso (-11.1 HV), coerente com a maior eficiência térmica do processo que, sobre superfícies preparadas, tende a reduzir gradientes locais. Ainda assim, os valores permaneceram em faixa segura quando correlacionados à aplicação.

**ZF (Zona Fundida):** As durezas foram as mais baixas e homogêneas (205-244 HV), indicando boa fusão e diluição. As diferenças entre preparações foram pequenas (GMAW: 7.7 HV; FCAW: 17.8 HV na média), reforçando a consistência metalúrgica dos cordões.

**Síntese comparativa:** De modo geral, os resultados demonstraram que os processos GMAW e FCAW apresentaram comportamentos muito semelhantes quanto á dureza média nas diferentes zonas analisadas (MB - ZTA - ZF). As variações observadas ficaram dentro da faixa esperada para aço ASTM A514, não havendo indícios de endurecimento excessivo que possam comprometer a usabilidade ou a integridade metalúrgica.

A pré-usinagem das superfícies mostrou-se vantajosa para o controle da variabilidade térmica e repetibilidade dimensional, proporcionando melhor dissipação do calor e maior estabilidade do cordão.

A limpeza manual, embora mais dependente da habilidade do soldador, apresentou resultados satisfatórios, demonstrando ser uma alternativa prática e eficaz em campo, especialmente quando há limitação de tempo.

#### **4.5.3 Análise Metalográfica (Macrografias das Amostras)**

As análises macrográficas foram realizadas em quatro amostras (P1 a P4), correspondentes aos processos GMAW e FCAW, com diferentes tipos de preparação superficial (limpeza manual e pré-usinagem). Em cada amostra foram observadas as posições 1G, 2G e 4G em conjunto, com o objetivo de avaliar a uniformidade dos cordões de solda, a penetração, a largura da zona termicamente afetada (ZTA), e a presença ou ausência de descontinuidades visíveis. As imagens obtidas permitem uma análise comparativa da estabilidade do arco e da qualidade da fusão nas diferentes posições de soldagem.

##### **Amostra P1 – Processo GMAW (Limpeza manual)**

A amostra P1, soldada pelo processo GMAW com limpeza manual, apresenta cordões regulares e bem formados nas três posições conforme Figura 9. Na posição 1G, observa-se excelente acabamento superficial e transição suave entre passes. Na 2G, a fusão lateral manteve-se uniforme, sem indícios de falta de fusão ou mordeduras. Na 4G, a penetração é levemente reduzida, porém suficiente para garantir a continuidade do cordão. A ZTA é estreita e bem delimitada em todas as posições, evidenciando bom controle térmico durante a soldagem. Não foram observadas descontinuidades visuais relevantes, demonstrando boa estabilidade do arco e execução adequada, mesmo com o uso de preparação por limpeza manual.

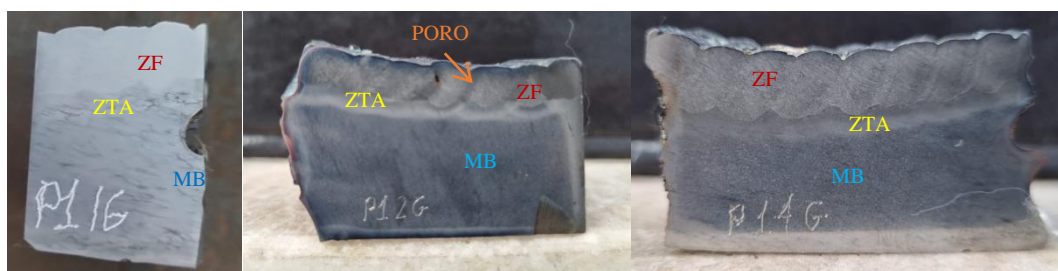


Figura 9. – Macroestruturas das posições 1G, 2G e 4G da amostra P1 (GMAW, Limpeza manual).

Fonte: LRSS – UFMG, 2025

#### Amostra P2 – Processo GMAW (Pré-usinagem)

A amostra P2, conforme Figura 10, produzida pelo processo GMAW com superfície previamente usinada, apresentou cordões com alta regularidade e excelente penetração em todas as posições. A pré-usinagem contribuiu para uma limpeza mais eficaz da superfície e menor presença de impurezas, resultando em melhor estabilidade do arco. Na posição 1G, o cordão apresenta penetração completa e aspecto uniforme. Na 2G, observa-se continuidade entre passes e ausência de defeitos. Já na 4G, a deposição manteve boa coalescência, sem indícios de poros ou descontinuidades superficiais. A ZTA é contínua e de largura moderada, sem indícios de superaquecimento.



Figura 10. – Macroestruturas das posições 1G, 2G e 4G da amostra P2 (GMAW, Pré-usinagem).

Fonte: LRSS - UFMG, 2025.

### Amostra P3 – Processo FCAW (Pré-usinagem)

A amostra P3, conforme Figura 11, soldada pelo processo FCAW com preparação por pré-usinagem, apresentou cordões uniformes e bem definidos. A escória característica do processo auxiliou na proteção e estabilidade do arco, proporcionando boa aparência superficial. Na posição 1G, observa-se cordão com penetração total e superfície regular. Na 2G, a fusão lateral manteve-se estável e sem mordeduras aparentes. Na 4G, o cordão foi depositado de forma uniforme, com penetração adequada e sem porosidade visível. A ZTA é levemente mais ampla em relação ao GMAW, porém com contorno bem delimitado. Não há presença de discontinuidades.

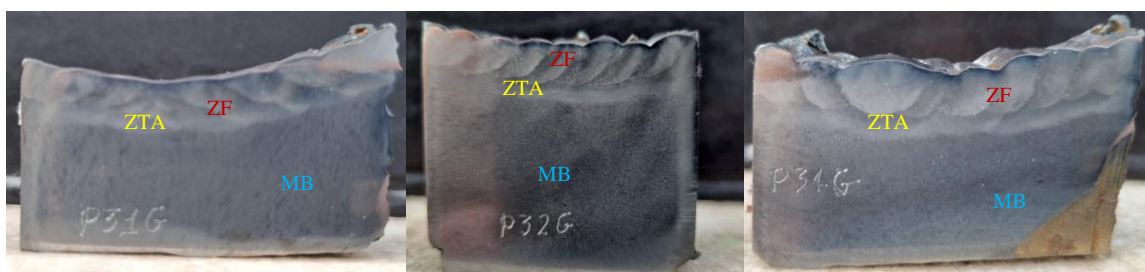


Figura 11. Macroestruturas das posições 1G, 2G e 4G da amostra P3 (FCAW, Pré-usinagem).

Fonte: LRSS - UFMG, 2025.

### Amostra P4 – Processo FCAW (Limpeza manual)

A amostra P4, conforme Figura 12, também soldada pelo processo FCAW, porém com limpeza manual, apresenta cordões regulares e bem formados nas três posições. Na posição 1G, observa-se cordão de boa aparência e penetração completa. Na 2G, a fusão entre passes é contínua e sem indícios de defeitos. Na 4G, a deposição manteve uniformidade, com leve redução de penetração típica da posição sobrecabeça. A ZTA é estreita e bem definida, e não foram observadas trincas, poros ou falta de fusão. O conjunto das macrografias demonstra estabilidade de soldagem mesmo em superfície limpa manualmente.

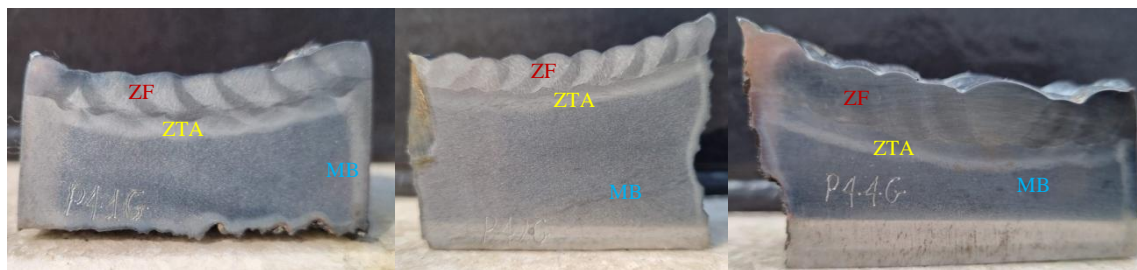


Figura 12. Macroestruturas das posições 1G, 2G e 4G da amostra P4 (FCAW, Limpeza manual).

Fonte: LRSS - UFMG, 2025.

Tabela 7. Comparativo Geral das Observações Metalográficas

Amostra	Processo	Preparação	Posições	Penetração	ZTA	Observações
P1	GMAW	Limpeza manual	1G-4G	Boa a moderada	Estreita	Cordões limpos, sem defeitos visíveis
P2	GMAW	Pré-usinagem	1G-4G	Excelente	Média	Boa penetração e regularidade do cordão
P3	FCAW	Pré-usinagem	1G-4G	Boa	Média	Cordões regulares e sem porosidade
P4	FCAW	Limpeza manual	1G-4G	Regular a boa	Estreita	Transição suave e ausência de discontinuidades

#### 4.5.4 Conclusão – Análise Macrográfia dos Processos GMAW e FCAW

A análise macrográfica das amostras permitiu avaliar visualmente a qualidade dos cordões de solda, a penetração e a continuidade da fusão entre os passes.

De forma geral, observou-se que ambos os processos, GMAW e FCAW, apresentaram resultados satisfatórios, evidenciando boa estabilidade de arco e adequada fusão lateral nas diferentes posições (1G, 2G e 4G).

Nas amostras produzidas pelo processo GMAW, verificou-se maior regularidade superficial e acabamento mais limpo, especialmente quando associadas à pré-usinagem da superfície, o que proporcionou melhor remoção de contaminantes e favoreceu a penetração do cordão. As amostras com limpeza manual também apresentaram boa coalescência, embora com ligeira redução de penetração na posição 4G, comportamento esperado devido à influência da gravidade e da deposição sobrecabeça.

Nas amostras obtidas pelo processo FCAW, a presença da escória contribuiu para maior estabilidade do arco e proteção da poça de fusão, resultando em cordões de boa uniformidade e ausência de discontinuidades visíveis. A comparação entre as preparações superficiais demonstrou que a pré-usinagem tende a favorecer maior uniformidade térmica e penetração mais consistente, enquanto a limpeza manual apresentou desempenho satisfatório, sem comprometer a integridade do cordão.

De forma consolidada, os resultados macrográficos indicam que ambos os processos são tecnicamente viáveis para a recuperação de furos em componentes de grande porte, como os mancais da caçamba do carregador Cat 994, desde que sejam observadas as condições de preparo e parâmetros adequados.

As diferenças observadas entre as amostras refletem principalmente as características próprias de cada processo e o tipo de preparação da superfície, não havendo indícios visuais de descontinuidades que comprometam a aplicação prática.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A comparação entre os processos GMAW e FCAW, aplicados na recuperação de furos da caçamba da Carregadeira Caterpillar 994, permitiu identificar diferenças operacionais e metalúrgicas entre os métodos, especialmente quanto ao tempo de execução, comportamento térmico e acabamento superficial.

Essas variações, entretanto, não comprometem a aplicabilidade técnica de nenhum dos processos, demonstrando que ambos são viáveis na recuperação de componentes de grande porte, desde que observadas as condições de preparo da superfície e as posições de soldagem.

Os resultados obtidos a partir das medições, observações e análises comparativas são apresentados a seguir.

### **5.1 Tempos de Execução e Produtividade**

Durante os ensaios práticos, observou-se diferença significativa no tempo de execução entre os processos analisados.

O GMAW apresentou maior produtividade, com tempo médio de execução entre 7 e 14 minutos inferior ao FCAW, dependendo da posição e do tipo de preparação da superfície. Esse desempenho se deve à maior taxa de deposição efetiva, ausência de escória e menor necessidade de interrupções para limpeza entre passes.

Já o FCAW, apesar do tempo de execução mais elevado, demonstrou maior estabilidade de arco e melhor controle do banho metálico em posições não planas, especialmente na 4G (sobrecabeça). A presença de escória e o maior volume de fumaça exigiram intervalos adicionais de limpeza, aumentando o tempo total, mas garantindo uma proteção mais eficaz do arco e reduzindo o risco de contaminação.

Nos mancais com preparação por pré-usinagem, o tempo total foi menor em ambos os processos, devido à melhor remoção de óxidos e impurezas superficiais, o que facilitou a fusão inicial e reduziu retrabalhos. Já nos mancais com limpeza manual, observou-se aumento médio de 5% a 8% no tempo de soldagem, consequência da menor uniformidade do substrato e da necessidade de ajuste mais frequente da tocha.

Esses resultados indicam que o GMAW é mais produtivo, porém o FCAW apresenta maior estabilidade operacional, sendo mais tolerante a variações de superfície e posição.

## **5.2 Qualidades do Cordão e Propriedades Mecânicas**

A análise macrográfica das amostras revelou que ambos os processos apresentaram cordões uniformes, com boa fusão lateral e penetração adequada, sem ocorrência de porosidade, mordedura ou falta de fusão visível.

As diferenças observadas foram sutis e atribuídas principalmente ao comportamento térmico de cada processo.

No GMAW, as macrografias evidenciaram penetração mais concentrada e ZTA estreita, reflexo de um controle térmico mais direcionado e da ausência de escória.

No FCAW, observou-se ZTA ligeiramente mais ampla, resultado da energia de soldagem mais elevada e do resfriamento levemente mais lento causado pela cobertura de escória.

Os ensaios de dureza Vickers mostraram valores médios compatíveis com o material base ASTM A514, sem indícios de fragilização. Em média, o metal de solda (ZF) apresentou durezas entre 205 e 244 HV, enquanto o metal base (MB) manteve-se entre 229 e 301 HV, valores considerados normais e aceitável para aços de alta resistência soldados sob controle térmico adequado. A ZTA apresentou variações intermediárias (280–346 HV), sem zonas de amolecimento ou endurecimento excessivo, confirmando a eficiência dos parâmetros aplicados.

Esses resultados demonstram que ambos os processos produzem soldas com qualidade metalúrgica satisfatória, com propriedades mecânicas homogêneas e sem indícios de discontinuidades prejudiciais. A pré-usinagem da superfície contribuiu para maior uniformidade de penetração e dureza, enquanto a limpeza manual, embora funcional, apresentou pequenas variações nos contornos de fusão e nas transições da ZTA.

### **5.3 Análises comparativas gerais**

De forma consolidada, a análise comparativa entre os processos GMAW e FCAW evidencia que ambos são tecnicamente adequados para aplicação na recuperação de furos de mancais da caçamba Cat 994, cada qual com vantagens específicas.

O GMAW apresentou melhor desempenho em tempo e acabamento superficial, sendo indicado para situações em que há condições controladas de limpeza, posição e acesso.

O FCAW, por sua vez, mostrou-se mais robusto e estável em posições desfavoráveis, apresentando boa fusão mesmo em superfícies menos preparadas.

Em termos de propriedades mecânicas, não foram observadas diferenças significativas quanto à dureza ou homogeneidade do cordão. A variação entre metal base, ZTA e metal de solda manteve-se dentro dos limites esperados, garantindo integridade e resistência adequadas para serviço.

Assim, pode-se concluir que a escolha entre GMAW e FCAW deve considerar o ambiente de aplicação e o tempo disponível, e não limitações metalúrgicas.

Ambos os processos são viáveis e seguros, desde que conduzidos sob parâmetros e preparações adequadas, com controle de pré-aquecimento, interpasses e sequência de soldagem.

O GMAW se destaca em eficiência e acabamento, ideal para reparos rápidos e condições limpas, enquanto o FCAW se sobressai em versatilidade e estabilidade, adequado para aplicações em campo e condições variáveis. Nenhum dos processos apresentou indícios de descontinuidade crítica ou variação excessiva de dureza, validando ambos para aplicação industrial.

### **5.4 Impactos econômicos da parada operacional**

Com base nos tempos medidos e na produtividade dos processos, foram realizados cálculos de impacto econômico considerando os custos médios da reforma na Caçamba da máquina e o valor de produção horária, conforme os parâmetros descritos a seguir:



Figura 13. Carregadeira CAT994K em operação.

#### 5.4.1 Dados:

- **Carregadeira:** CAT994K 35t
- **Capacidade:** 12m<sup>3</sup>
- **Produção média:** 2.000 t/h
- **Horas anuais:** 5.000 h/a
- **Valor do minério de ferro:** US\$ 100/t – Produção/h → R\$1.056. 000,00/h
- **Custo médio de reforma completa da caçamba:** R\$900.000,00
- **Custo médio do processo de soldagem dos furos:** R\$16.000,00
- **Custo médio do processo de usinagem (mandrilhamento portátil):** R\$25.000,00

Esses dados serviram de base para construir cenários comparativos de parada operacional em casos de retrabalhos nos processos de soldagem de 1 h, 2 h, 5 h e 10 h, permitindo a análise direta das perdas produtivas associadas ao tempo de inatividade, bem como o impacto econômico total entre as perdas de produção e os custos de manutenção.

A Tabela 8 evidencia que mesmo curtos períodos de parada geram perdas expressivas, principalmente quando comparadas ao baixo custo relativo das etapas de soldagem e usinagem (inferiores a 5% do valor total da reforma). Dessa forma, fica demonstrado que o controle técnico da execução e a prevenção de retrabalhos têm impacto econômico muito superior à simples redução de custos diretos.

Assim, a estimativa econômica evidencia que a otimização do processo de soldagem, além de garantir qualidade e confiabilidade estrutural, é um fator determinante para a redução de custos indiretos e a melhoria da disponibilidade operacional dos equipamentos.

**Tabela 8.** Estimativa de perdas econômicas associadas à parada da CAT 994

Tempo de Parada (h)	Produção Média(t)	Valor Médio (R\$)	Perda de Produção (US\$)	Perda de Produção (R\$)
1 hora	2.000t	\$100t	\$200.000,00	R\$1.056.000,00
2 horas	4.000t	\$100t	\$400.000,00	R\$2.112.000,00
5 horas	10.000t	\$100t	\$1.000.000,00	R\$5.280.000,00
10 horas	20.000t	\$100t	\$2.000.000,00	R\$10.560.000,00

## 6. CONCLUSÃO FINAL

Considerando que a Carregadeira Caterpillar 994 movimentada aproximadamente 2.000 toneladas de minério por hora, qualquer diferença de tempo na execução dos processos de soldagem representa um impacto financeiro significativo durante as paradas de manutenção. Com base no câmbio médio de R\$ 5,28, uma única hora de inatividade pode gerar uma perda potencial superior a R\$ 1.056.000,00, reforçando a importância da eficiência dos processos de recuperação aplicados em campo.

Ao longo deste estudo foram comparados os processos de soldagem GMAW e FCAW, aplicados na recuperação de furos de mancais da caçamba da Carregadeira Cat 994, considerando dois métodos de preparação superficial - limpeza manual e pré-usinagem e diferentes posições de soldagem (1G, 2G, 3G e 4G).

Os resultados mostraram que o GMAW apresentou menor tempo médio de execução e maior continuidade de deposição, devido à ausência de escória e menor necessidade de interrupções para limpeza entre passes. Em média, o tempo total de enchimento foi de 7 a 14 minutos inferior ao do FCAW, demonstrando maior produtividade, especialmente em superfícies pré-usinadas e posições planas.

O FCAW, por sua vez, apresentou maior estabilidade do arco elétrico e melhor desempenho em posições desfavoráveis, como a 4G (sobrecabeça), graças à formação de escória que atuou como suporte natural do metal fundido, favorecendo a penetração e a qualidade do cordão. Apesar de exigir maior tempo total, demonstrou melhor robustez e tolerância à variação de preparo superficial, sendo o processo mais indicado para regiões de difícil acesso ou que demandem maior resistência estrutural.

As análises macrográficas evidenciaram cordões com boa fusão lateral, ausência de descontinuidades visíveis e penetração uniforme em ambos os processos, com variação dimensional mínima entre amostras. Já as medições de dureza Vickers confirmaram a integridade metalúrgica das juntas soldadas, apresentando valores médios de 260–280 HV no metal base (MB), 280–320 HV na ZTA e 310–340 HV no metal de solda (ZF). A diferença de

até 70 HV entre o MB e o ZF foi considerada normal e aceitável para aços ASTM A514, não sendo observadas zonas de endurecimento crítico nem indícios de fragilização.

Esses resultados comprovam que ambos os processos são tecnicamente aplicáveis à recuperação de componentes de grande porte, apresentando comportamento metalúrgico estável e propriedades mecânicas adequadas.

A pré-usinagem da superfície contribuiu de forma direta para a regularidade dos cordões e maior eficiência de deposição, enquanto a limpeza manual, embora eficaz, resultou em pequenas variações na morfologia e tempo total de execução.

Sob a ótica operacional e econômica, a seleção criteriosa do processo de soldagem e do método de preparação superficial mostrou-se determinante para o desempenho global do reparo, influenciando diretamente o tempo de parada, a confiabilidade estrutural e o custo total de manutenção.

Dessa forma, conclui-se que: O GMAW é o processo mais eficiente e produtivo para condições controladas e superfícies pré-usinadas, sendo indicado quando o tempo de parada é fator crítico.

O FCAW é o mais indicado para condições de campo e posições não planas, garantindo maior estabilidade e resistência final.

Ambos os processos atenderam plenamente aos requisitos metalúrgicos e operacionais da aplicação proposta, demonstrando viabilidade técnica, segurança e qualidade de execução.

Assim, a otimização dos parâmetros de soldagem, aliada à escolha adequada do processo e do tipo de preparação superficial, representa uma estratégia essencial para reduzir custos, aumentar a disponibilidade operacional e garantir a sustentabilidade das operações de mineração em grande escala.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 6152: Materiais metálicos – Dureza Rockwell e Rockwell superficial. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. NBR ISO 6507-1: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1/D1.1M:2020 – Structural Welding Code – Steel. Miami: AWS, 2020.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D14.3/D14.3M:2019 – Specification for Welding Earthmoving, Construction, and Agricultural Equipment. Miami: AWS, 2019.
- BRACARENSE, A. Q. Metalurgia da Soldagem. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016.
- BRACARENSE A,Q.; PIMENTA, G.S. Tecnologia da Soldagem: Fundamentos, Processos e Aplicações. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2021.
- MODENESI, P.J. Fundamentos da Soldagem. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017.
- SOUZA, R.P.; SANTOS, M. C.; PEREIRA, F. L. Análise comparativa entre processos GMAW E FCAW na recuperação de componentes de grande porte. Revista Brasileira de Engenharia de Soldagem, v 9, n. 2, p. 45-53, 2019.