

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia Mecânica
Programa de especialização em Soldagem

Guilherme Ramos Mendes

**ESTUDO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM E PROPOSTA DE MELHORIA DE
UNIÕES SOLDADAS CRÍTICAS DE UMA CAÇAMBA ESCAVADEIRA COM FOCO
NA PREVENÇÃO DA FADIGA EM SERVIÇO**

Belo Horizonte
2024

Guilherme Ramos Mendes

**ESTUDO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM E PROPOSTA DE MELHORIA DE
UNIÕES SOLDADAS CRÍTICAS DE UMA CAÇAMBA ESCAVADEIRA COM FOCO
NA PREVENÇÃO DA FADIGA EM SERVIÇO**

Monografia de especialização
apresentada ao programa de Pós-
Graduação em Soldagem pelo
Departamento de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Ariel Rodrigues Arias

Belo Horizonte

2024

M538e

Mendes, Guilherme Ramos.

Estudo de processos de soldagem e proposta de melhoria de uniões soldadas críticas de uma caçamba escavadeira com foco na prevenção da fadiga em serviço [recurso eletrônico] / Guilherme Ramos Mendes. -2024.

1 recurso online (77 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

"Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais"

Bibliografia: f. 75-77.

1. Soldagem. 2. Fadiga. 3. Tensão residual - Soldagem. I. Arias, Ariel Rodríguez. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO GUILHERME RAMOS MENDES

Realizou-se, no dia 03 de outubro de 2024, às 19:30 horas, Teams/Meet, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada **ESTUDO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM E PROPOSTA DE MELHORIA DE UNIÕES SOLDADAS DE UMA CAÇAMBA ESCAVADEIRA COM FOCO NA PREVENÇÃO DA FADIGA EM SERVIÇO**, apresentada por GUILHERME RAMOS MENDES, número de registro 2022687528, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em SOLDAGEM, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Ariel Rodriguez Arias - Orientador (UFMG), Prof(a). Paulo Villani Marques (ufmg), Prof(a). Yuri Nogueira Rezende (Empresa Weir- Esco).

A Comissão considerou a monografia:

(X) Aprovada ⁹⁵ () Nota

() Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 03 de outubro de 2024.


Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
Chefe do Departamento
Eng. Mecânica | Esc. de Engenharia
Inscrição UFMG: 327824
Prof(a). Ariel Rodriguez Arias (Doutor)


Prof(a). Paulo Villani Marques (Doutor)


Prof(a). Yuri Nogueira Rezende (Especialista)

RESUMO

Com a modernização dos aços as caçambas escavadeiras para mineração tiveram uma redução significativa de massa, o que promoveu a redução da emissão de gases poluentes pelos equipamentos onde estes implementos são instalados. No entanto, esses materiais, são fornecidos no mercado, tratados termicamente, exigindo certos cuidados antes, durante e após a soldagem, pois se não avaliado e selecionado corretamente todos os parâmetros e técnicas de operação para confecção do implemento, esse pode não performar de 2.000 a 3.000 horas de operação exigidas contratualmente por clientes. Assim, para atenuar as consequências do processo de soldagem, como as tensões residuais, este estudo se propôs a entender os processos e parâmetros de soldagem que mais se adequam na construção de implementos, avaliando tanto o ponto de vista produtivo quanto o metalúrgico. Ademais, buscou-se selecionar materiais que, além de possuírem baixo carbono equivalente, devem apresentar boa resistência à decoesão lamelar, devido ao grande volume de solda encontrado nesses equipamentos, o estudo também apresenta melhorias no projeto para atenuar a fadiga. Conclui-se que apesar do impacto causado pela soldagem nos materiais a teoria que aborda a fadiga enfatiza que o formato da junta é o fator mais preponderante para a ocorrência do fenômeno mecânico, mas que a soma de vários fatores intrínsecos da construção do implemento não pode ser desprezada para postergar a fadiga.

Palavras-Chave: Soldagem; Fadiga; Tensão residual; Processos; Técnicas operatórias; Parâmetros de Soldagem.

ABSTRACT

With the modernization of steel, excavator buckets for mining had a significant reduction in mass, which promoted the reduction of polluting gas emissions from the equipment where these implements are installed. However, these materials are supplied on the market heat treated, requiring certain care before, during and after welding, where if all parameters and operating techniques for manufacturing the implement are not correctly evaluated and selected, it may not perform from 2,000 to 3,000 operating hours contractually required by customers. To mitigate the consequences of the welding process, such as residual stresses, this study aimed to understand the welding processes and parameters that are most suitable for the construction of implements, evaluating both the productive and metallurgical points of view, as well as seeking to select materials that, in addition to having a low carbon equivalent, must present good resistance to lamellar decohesion due to the large volume of welding found in this equipment, proposing to present improvements in the design to mitigate fatigue. The study indicated that despite the impact caused by welding on materials, the theory that addresses fatigue emphasizes that the shape of the joint is the most preponderant factor for the occurrence of the mechanical phenomenon, but that the sum of several factors intrinsic to the construction of the implement, cannot be neglected to postpone fatigue.

Keywords: Welding; Fatigue; Residual Stress; Processes; Operative techniques; Welding Parameters.

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1- Limite de escoamento dos aços de classe AR-450.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 2 – Limite de escoamento dos aços de classe estrutural.</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 3- Carbono equivalente dos materiais estruturais.</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 4- Carbono equaivalente dos materiais de classe AR.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 5 - Propriedade dos gases de proteção.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 6 - Relação entre os eletrodos, corrente de transição, e a composição do gás de proteção.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 7- Rendimentos de diferentes processos de soldagem.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 8- Dimensões para o Cálculo das Forças de Escavação.</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 9 - Informações técnicas do sistema hidráulico.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 10-Resultados dos cálculos de área, volume, e tempos do sistema hidráulico</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 11-Forças exercida pelos cilindros de cada Conjunto</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 12 - Forças de escavação da Caçamba Komatsu PC500.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 13-Tensões admissíveis regiões críticas da caçamba escavadeira em relação a classe da junta.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 14-Propriedades da secção estudada.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 15-Tensões normais e cisalhantes atuantes.</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 16-Propriedades da secção estudada.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 17-Tensões normais e cisalhantes atuantes e os respectivos ciclos.</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 18-Propriedades da secção estudada.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 19-Tensões normais e cisalhantes atuantes e os respectivos ciclos.</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 20- Classificação dos Eletrodos GMAW e respectiva resistência mecânica.</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 21- Tensão admissível para soldas de penetração parcial (PJP).....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 22- Tensão admissível para soldas de penetração total (CJP).</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 23 – Processo, Parâmetros, técnicas e materiais selecionados para a confecção do implemento.</i>	<i>70</i>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1 - Tipos de escavadeiras: frontais, retroescavadeiras, carregadeiras, pás de mergulho e baldes de dragagem.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2 – Implemento construído com materiais fundidos, estruturais, e resistentes ao desgaste.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 - Carregadeira revestida internamente e externamente com materiais AR.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4-Variação da Dureza na ZTA de um AR-400 com diferentes aportes térmicos.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5 – Aço ASTM A514 soldado com eletrodo E11018 e E7018.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6- Strenx700 soldado com 0,9 kJ de aporte térmico.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7 - Implemento com aplicação de aços estruturais.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8- Relação entre Influência da quantidade de enxofre em % (porcentagem) e as trincas.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9 - Decoção Lamelar iniciando na raiz da solda.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10 – Proposta de Juntas para contornar a fissuração Lamelar.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11- Amanteigamento de juntas soldadas.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12 - Relação entre espessura e custos de soldagem.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13 - Processos de soldagem industrial e afins.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14-Taxa de deposição dos processos de soldagem mais comuns.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15 - Processo de soldagem GMAW.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16 – Nível de hidrogênio difusível dos processos de soldagem.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17 - Relação entre a os diâmetros dos arames com taxa de deposição Kg/h, corrente de soldagem e a velocidade de alimentação.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18 - Efeito da inclinação da tocha de soldagem na morfologia do cordão.(MIG/MAG).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19 -Morfologia do cordão com a variação da polaridade no processo MIG/MAG.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 20 -Modos de transferência metálica.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 21- Influência do gás de proteção na variação da tensão de soldagem.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 22 - Influência do aporte térmico no refino de grão.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 23- Método de transferência metálica GMAW arame de Ø1,6 mm.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26-Progressão de soldagem em passes Orientados.</i>	<i>39</i>

<i>Figura 27- Progressão de soldagem simétrica.</i>	39
<i>Figura 28-Sequência de soldagem em passos progressivos.</i>	40
<i>Figura 29- Sequência de progressão de ré.</i>	40
<i>Figura 30 - Equipamento para execução do rebarbamento.</i>	41
<i>Figura 31 - Técnicas para execução do rebarbamento.</i>	42
<i>Figura 32 - Correta e incorreta forma de execução do rebarbamento respectivamente.</i>	42
<i>Figura 33 – Instrução de execução do martelamento.</i>	43
<i>Figura 34 – Esquema do Processo de jateamento com esferas.</i>	44
<i>Figura 35 – Recomendações da técnica de TIG Dressing.</i>	45
<i>Figura 36 - Antes e depois do processo de TIG drassing.</i>	45
<i>Figura 37 - Influência dos diferentes métodos para otimização da resistência a fadiga.</i>	46
<i>Figura 38- Influência do reforço de solda na resistência à fadiga.</i>	47
<i>Figura 39 - Influência do ângulo entre a o metal base e o metal de solda na resistência à fadiga.</i>	48
<i>Figura 40 -Caçamba escavadeira para PC500.</i>	49
<i>Figura 41- Identificação dos componentes de uma caçamba Escavadeira.</i>	50
<i>Figura 42- Esquema da caçamba escavadeira.</i>	51
<i>Figura 43- Esquema para o Cálculo de forças de escavação.</i>	52
<i>Figura 44- Esquema do Braço da caçamba e do Implemento da PC500.</i>	53
<i>Figura 45 – Dimensões da Lança e Braço.</i>	56
<i>Figura 46 – Forças atuantes na Lança da escavadeira com o cilindro em avanço.</i>	56
<i>Figura 47- Vetores das Forças de escavação.</i>	58
<i>Figura 48- Seções estudadas do implemento.</i>	62
<i>Figura 49-Junta do reforço e borda.</i>	63
<i>Figura 50 - Esquema das tensões atuantes na região entre reforço e borda.</i>	64
<i>Figura 51- Fluxo de tensões atuantes na região do reforço e borda do implemento.</i>	65
<i>Figura 52 – Apresentação das tensões cisalhantes primárias e secundárias.</i>	66
<i>Figura 53- Representação do ponto de tensão normal e compressiva máxima atuando na solda da alça e viga.</i>	67
<i>Figura 54 - Proposta de novo chanfro para região da borda e reforço.</i>	71
<i>Figura 55-Proposta de junta.</i>	72

SUMÁRIO

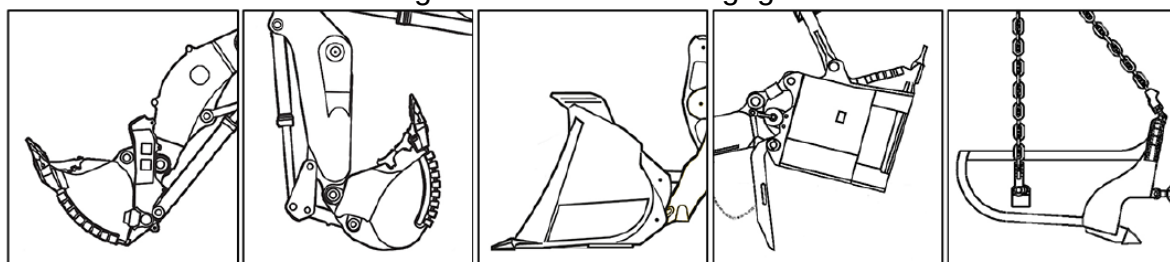
1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	Contextualização	10
1.2.	Objetivo Geral	12
1.3.	Objetivo específico	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1.	Materiais	13
2.1.1.	Materiais de classe AR	13
2.1.2.	Materiais de classe estrutural	15
2.1.3.	Seleção dos materiais AR e estruturais	17
2.2.	Processos de Soldagem	23
2.2.1.	Introdução	23
2.2.2.	Seleção do Metal de adição	27
2.2.3.	Influência dos parâmetros e técnicas de soldagem na morfologia do cordão	29
2.2.3.1.	Modos de transferência metálica	30
2.2.3.2.	Seleção do Gás de proteção	31
2.3.	Aporte térmico	36
2.4.	Técnicas para minimizar as tensões residuais e maximizar a vida útil	38
2.4.1.	Seleção da sequência de soldagem	38
2.4.2.	Estudo de procedimentos pós-soldagem	40
2.4.2.1.	Rebarbamento (<i>Burr Grinding or Fully bur Machine</i>)	41
2.4.2.2.	Martelamento (<i>Hammer Peened</i>)	42
2.4.2.3.	Jateamento de esferas (<i>Shot Peening</i>)	43
2.4.2.4.	TIG Dressing	44
2.4.2.5.	Fator de forma. Seleção da altura do Reforço de Solda	46
2.5.	Objeto de estudo, escavadeira PC500	48
2.6.	Forças de escavação	50
2.7.	Tensões admissíveis	58
2.8.	Avaliação da resistência à fadiga das principais juntas estruturais soldadas do implemento	61
2.8.1.	Junta da Borda e reforço	62
2.8.2.	Junta da Viga e reforço	65
2.8.3.	Junta da alça e viga	67
2.9.	Avaliação da tensão admissível do metal de adição	68
3.	Resultados e discussões	70
4.	Conclusão	72
5.	REFERÊNCIAS	75

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Conforme a figura 1 ilustra, existem diferentes possíveis tipos de escavadeiras: escavadeiras frontais (*Excavator Face Shovels*), retroescavadeiras (*Excavator Backhoe*), carregadeiras (*Loaders*), pás de mergulho (*Shovel Dippers*) e baldes de dragagem (*Draglines Buckets*), respectivamente. (SSAB, 2024a)

Figura 1 - Tipos de escavadeiras: frontais, retroescavadeiras, carregadeiras, pás de mergulho e baldes de dragagem.



Fonte - (SSAB, 2024a).

Na confecção desses implementos, são empregados uma gama de materiais, sendo eles: estruturais, resistentes ao desgaste e abrasão, fundidos entre outros. Também, são encontrados em outros equipamentos de mineração: retomadoras, caçambas de caminhões, transportadores, chute de descarga, peneira vibratória, etc. De modo que esses equipamentos são responsáveis pelo beneficiamento de minério de ferro, rochas, entre outros minerais.

Figura 2 – Implemento construído com materiais fundidos, estruturais, e resistentes ao desgaste.



Fonte – (RAPTOR, 2021)

Dentre os materiais já citados, os estruturais e os resistentes ao desgaste apresentam elevada resistência mecânica e quando aplicados em implementos de mineração observa-se a redução de custos operacionais, em razão da redução de consumo de combustíveis que por consequência reduz a emissão de gases nocivos na atmosfera como o CO_2 . Esse fato foi estudado pela SSAB, onde a empresa mostra que a redução da massa de um implemento de uma carregadeira gerou um aumento na receita de 740.873 EURO/ano e redução de 77 toneladas de CO_2 emitidas (SSAB, 2024b).

Contudo, esses implementos estão sujeitos a desgaste e falha, de maneira que para aumentar a sua vida útil na organização em geral são feitas reformas no intuito de evitar a necessidade de aquisição de novos equipamentos para realizar a operação.

Destaca-se que na fabricação desses implementos são usados diferentes processos de fabricação como conformação, usinagem e soldagem. Todavia, a soldagem é um processo que causa modificações nas propriedades mecânicas e microestruturais do material a ser unido.

A modificação do material implica a necessidade de avaliar e minimizar os impactos do processo de soldagem, pois a não observância das boas práticas de soldagem e o adequado dimensionamento do implemento podem levar o implemento

a uma falha prematura em operação, em decorrência das elevadas tensões residuais intrínsecos do processo de soldagem empregado, o que induz o proprietário a solicitar reparos em garantia. Tudo isso compromete os lucros das empresas desenvolvedoras desses implementos.

Assim, nesse trabalho será feita uma avaliação tanto dos processos e técnicas operatórias de soldagem quanto uma avaliação de uniões estruturais críticas encontradas em uma escavadeira, tendo como resultado a proposta de adoção de materiais que mais se adequam a fabricação do implemento, bem como das melhores técnicas de confecção com o objetivo de evitar a falha prematura do equipamento durante sua utilização e para maximizar sua disponibilidade para operação sem paradas inesperadas.

1.2. Objetivo Geral

Estudar e conhecer o projeto e o processo construtivo, particularmente o de soldagem de uma caçamba escavadeira, visando minimizar a ocorrência de falha em operação e maximizar a utilização do implemento pelo cliente.

1.3. Objetivo específico.

Para evitar a falha prematura da caçamba escavadeira é necessário estudar e avaliar os processos de soldagem que mais se amoldam a fabricação desses equipamentos, com base na tensão normal e de cisalhamento admissível pela ação das forças externas às quais a estrutura será submetida na finalidade de verificar a possibilidade de melhoria no projeto pela adoção de outro metal de adição em determinadas juntas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais

2.1.1. Materiais de classe AR

Aços resistentes ao desgaste pertencem a uma classe denominada pela sigla AR (Abrasion Resistance), classificados pela sua dureza, desde AR 450 ao AR 600, respectivamente com dureza de 450 brinel e 600 brinel. Vale salientar que desde os aços menos resistentes aos mais resistentes, são aços amplamente aplicados em equipamentos cuja característica principal seja resistir em ambientes com elevado índice de abrasão. Abaixo temos um exemplo:

Figura 3 - Carregadeira revestida internamente e externamente com materiais AR.



Fonte-(WEIR- ESCO, 2024a).

O implemento ilustrado na figura 3, mostra o implemento revestido com placas de materiais AR representados na cor cinza, enquanto os demais componentes apresentados na cor vermelha podem ser confeccionados com materiais de classe estrutural.

Os materiais AR também podem exercer funções estruturais do implemento, porém é mais recorrente em aplicações onde se faz necessário proteger componentes que não apresentam a resistência a abrasão, motivo pelo qual devem ser protegidos por placas resistentes ao desgaste, de forma que essas placas devem ser substituídas

regularmente quando desgastadas para não comprometerem os componentes estruturais fabricados com materiais exclusivamente estruturais.

Desta forma, existe uma gama de fornecedores desses aços e algumas opções podem ser vistas na Tabela 1, na qual são apresentados os principais materiais resistentes ao desgaste disponibilizados no mercado e seu limite de escoamento. Pode-se observar também que esses materiais apresentam limites de escoamento bem semelhantes, senão vejamos:

Tabela 1- Limite de escoamento dos aços de classe AR-450.

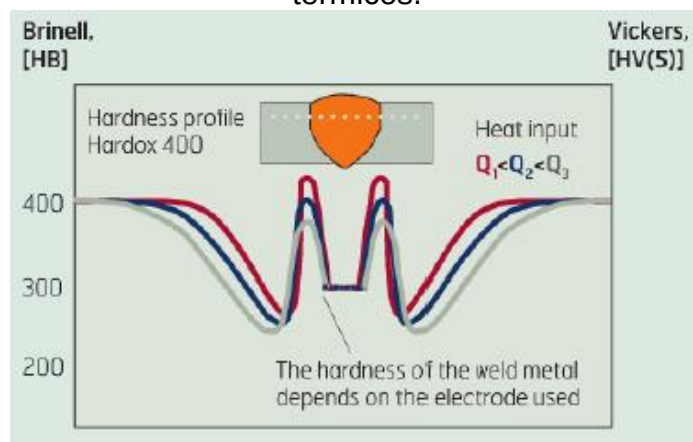
Fabricante	Material	Limite de Escoamento (MPa)
SSAB	Hardox	1000 -1300
Usiminas	UsiRavur	1200
Dillinger	Dillidur	1300
Thyssenkrupp	XAR	1200
Industeel	Creusabro Relia 450	1200
NLMK	Quard	1250

Fonte – Data Sheet dos fabricantes.

Do ponto de vista da resistência mecânica, qualquer um dos materiais apresentados poderia ser selecionado para a confecção de um implemento, entretanto, a resistência mecânica do material não é a única característica a ser considerada e também deve ser avaliada, entre outras propriedades, a composição química do aço, visto que esta última está diretamente relacionada à soldabilidade do material.

Todavia, um fator preponderante deve ser considerado ao selecionar materiais desta categoria para aplicação como componentes estruturais, pois conforme a SSAB em seu guia de soldagem é possível visualizar a drástica redução da dureza do metal base em quase pela metade, o que pode levar a falha estrutural do implemento quando ocorrer a solicitação mecânica acima da resistência mínima encontrada na ZTA, conforme se observa na Figura 4, o que não é observado nos materiais de classe estrutural.

Figura 4-Variação da Dureza na ZTA de um AR-400 com diferentes aportes térmicos.



Fonte -(SSAB - WELDING HANDBOOK A GUIDE TO BETTER WELDING OF HARDOX AND STRENX, 2019).

2.1.2. Materiais de classe estrutural

Os aços estruturais são materiais usados em implementos para os quais não ocorre desgaste e são frequentemente unidos aos aços AR, seja visando minimizar o desgaste abrasivo ou unir estruturalmente esses materiais.

Na Tabela 2 analisa-se uma variedade de fornecedores e que esses materiais também apresentam valores similares de limite de escoamento assim como os da classe AR, de acordo se lê:

Tabela 2 – Limite de escoamento dos aços de classe estrutural.

Fabricante	Material	Limite de Escoamento (Mpa)
SSAB	Strenx 700	650-700
Usiminas	Usi SAR 60T	600-700
Dillinger	Dillimax 690	550-690
Industeel	Amstrong Ultra 690	630 -690
NLMK	Quend 700	700

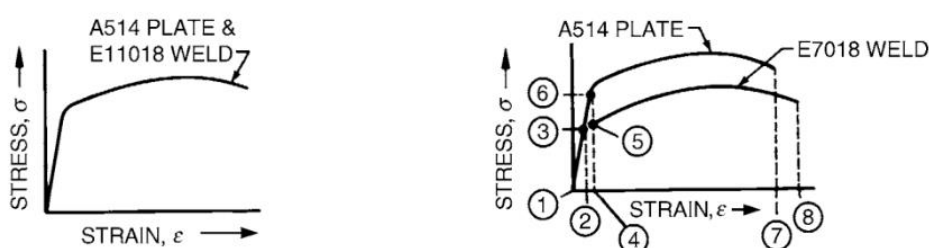
Fonte – Data Sheet dos fabricantes

Logo, estão disponíveis materiais estruturais com maior limite de escoamento, contudo, seu uso é limitado pela necessidade de soldagem durante a fabricação, tendo em vista que os metais de adição disponíveis no mercado possuem resistência

mecânica de no máximo 760 MPa, o que impossibilita a aplicação desses materiais no projeto de implementos de escavação.

Outrossim, na figura 5 são mostradas as curvas tensão versus deformação do aço ASTM A-514 e de metais de adição, à esquerda de metal de adição com resistência similar ao metal base e à direita de um material de adição com resistência inferior à do metal base, segundo se verifica:

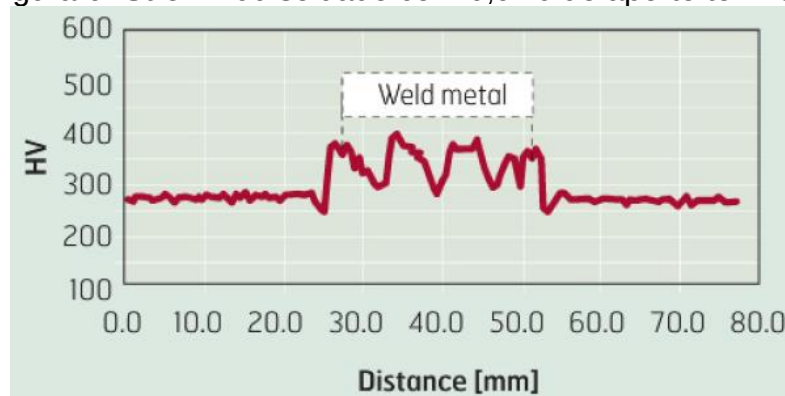
Figura 5 – Aço ASTM A514 soldado com eletrodo E11018 e E7018.



Fonte - (AWS, 2001).

Conforme a figura 6, não se observa grande variação da dureza na ZTA do metal base quando soldado, o que justifica a ampla aplicação destes materiais na confecção de maior parte dos componentes de um implemento.

Figura 6- Strenx700 soldado com 0,9 kJ de aporte térmico.



Fonte-(SSAB - WELDING HANDBOOK A GUIDE TO BETTER WELDING OF HARDOX AND STRENGTH, 2019).

O uso de materiais de elevada resistência permite uma redução considerável no volume de material necessário para a fabricação de um implemento, para as

mesmas condições de operação, quando comparado ao uso de materiais convencionais.

Além disso, aplicação de materiais de alta resistência em implemento como básculas, apresenta vantagens significativas, como os resultados disponibilizados na rede social Facebook da Escó Brasil, na qual foi exposto que a aplicação desses materiais possibilitou transportar 7,8 toneladas a mais de materiais e uma redução de massa do implemento em 18%, comparado aos demais fornecedores de implementos.(WEIR- ESCO, 2020). Vejamos a ilustração do implemento da Escó:

Figura 7 - Implemento com aplicação de aços estruturais.



Fonte –(WEIR- ESCO, 2024b)

2.1.3. Seleção dos materiais AR e estruturais.

Resumidamente a soldabilidade é a capacidade de um material ser unido a outro por soldagem atendendo aos requisitos de projeto. Fatores como a composição química, especialmente a quantidade de carbono, ou condutividade térmica do material influenciam diretamente essa característica. A utilização de equações para o

cálculo do carbono equivalente (CE) é um método amplamente disponibilizado na literatura técnica para avaliar a influência da composição química na soldabilidade. Quando o $CE < 0,40$, o material apresenta baixo risco de fissuração na soldagem, devido a formação de martensita. Por outro lado, quando o $CE > 0,6$ é necessário atenção tanto antes, quanto durante e após a soldagem, no que diz respeito ao controle de temperatura por haver elevado risco de fissuração pela formação de martensita. (BRACARENSE, ALEXANDRE QUEIROZ MARQUES; MODENESI, 2009)

Contudo, na literatura técnica há uma diversidade de equações para o cálculo do carbono equivalente, como, por exemplo, a equação disponibilizada pela instituição IIW:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{P}{3} \quad (1)$$

Nas Tabelas 3 e 4, são disponibilizados os valores de carbono equivalente de aço estruturais e AR calculados pelas equações do IIW, AWS, Yurioka, Beyssó, CET, Graville, e JFE com base em informações coletadas nos Data Sheet dos fabricantes. No cálculo, foram usados os teores máximos de cada elemento químico permitidos por norma, sendo assim o valor mais seguro (Modenesi, 2011). As tabelas também mostram um valor médio para todas as equações. O menor valor de carbono equivalente foi o do aço estrutural Usi SAR 60T e o maior valor foi do Armstrong Ultra, que deve ser evitado na construção do implemento, conforme se analisa:

Tabela 3- Carbono equivalente dos materiais estruturais.

Material	Ceiiw	CET	Ce Yurioka	AWS	Ito-Beyssó	Graville	JFE	Média
Usi SAR 60T	0,48	0,33	0,65	0,35	0,29	0,45	0,31	0,41
Quend 700	0,68	0,43	0,97	0,46	0,39	0,57	0,39	0,56
Strenx 700	0,92	0,54	1,33	0,56	0,46	0,69	0,48	0,71
Dillimax 690	1,03	0,54	1,51	0,56	0,47	0,75	0,53	0,77
Armstrong Ultra 690	1,07	0,57	1,58	0,59	0,48	0,76	0,52	0,8

Fonte - Do autor.

Tabela 4- Carbono equivalente dos materiais de classe AR

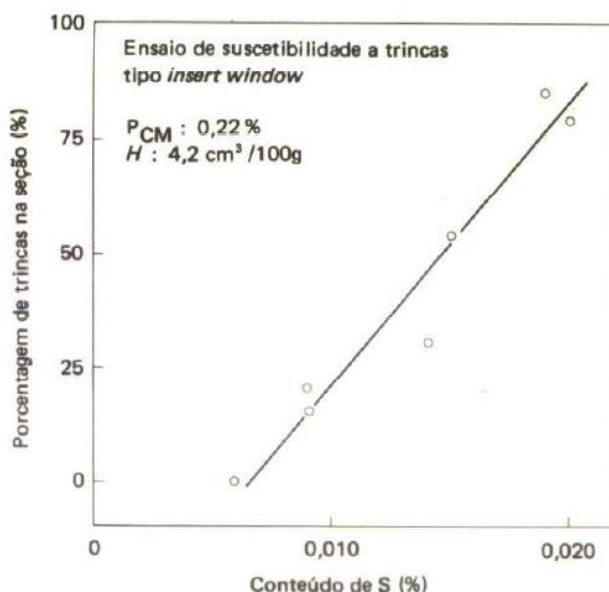
Material	Ceiiw	CET	Ce Yurioka	AWS	Ito-Beyssso	Graville	JFE	Média
UsiRavur	0,74	0,49	1	0,52	0,43	0,63	0,46	0,61
Creusabro Relia 450	0,86	0,48	1,25	0,51	0,45	0,67	0,46	0,66
XAR	0,83	0,49	1,2	0,52	0,45	0,65	0,49	0,66
Quard	0,89	0,52	1,28	0,54	0,46	0,69	0,51	0,70
Dillidur	1,01	0,57	1,45	0,6	0,52	0,76	0,57	0,78
Hardox	1,09	0,63	1,55	0,66	0,57	0,83	0,63	0,85

Fonte- Do autor

Nota-se que dentre os materiais resistentes ao desgaste, o Usi Ravur apresentou o menor valor e o Hardox apresentou o maior valor de CE, sendo que esses materiais apresentam altos valores de carbono equivalente, ou seja, $CE > 0,6$ em média.

Okumra e Taniguchi afirmam que aços que apresentam 0,020% de enxofre na composição química podem apresentar até 75% de trincas na seção soldada com base no ensaio de suscetibilidade a trincas, como mostra a figura 8:

Figura 8- Relação entre Influência da quantidade de enxofre em % (porcentagem) e as trincas.



Fonte- (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Cumprir destacar que o risco de decoesão lamelar pela presença do enxofre, dentre os aços estruturais, o aço estrutural SAR 60T é o menos indicado para o projeto, em razão de apresentar teor nominal de 0,3% de enxofre, já o Dillimax 690 T, com 0,005% de enxofre é o mais indicado.

Considerando o carbono equivalente, a resistência mecânica e o menor risco de decoesão lamelar, o aço estrutural mais adequado para o projeto do implemento seria o Quend 700.

Já para os materiais AR, os mais resistentes à falha por decoesão lamelar seriam o Creusabro Relia 450, contendo 0,005% de enxofre, seguido do XAR com 0,07% de enxofre. Os demais materiais poderiam ser aplicados no projeto, pois todos têm 0,01% de enxofre em sua composição nominal conforme documentos técnicos dos respectivos fabricantes.

Com base nos cálculos de carbono equivalente e considerando a resistência à decoesão lamelar, o Creusabro Relia 450 seria o mais indicado para o projeto.

Uma falha típica por decoesão lamelar é mostrada na figura:

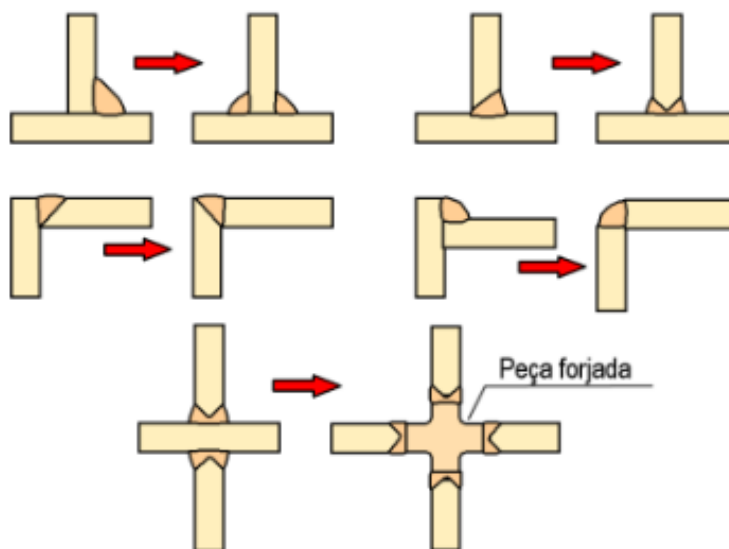
Figura 9 - Decoesão Lamelar iniciando na raiz da solda.



Fonte - (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Segundo (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012), a seleção adequada de chanfros é uma alternativa para minimizar a fissuração por decoesão lamelar, como demonstra a figura 10:

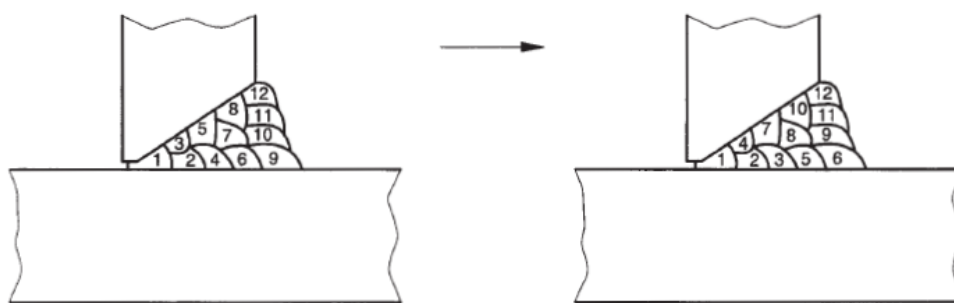
Figura 10 – Proposta de Juntas para contornar a fissuração Lamelar.



Fonte – (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

O amanteigamento é um método sugerido pela DIN, aplicado no processo de soldagem para minimizar a decoesão lamelar, alterando a sequência de passes, quando não são aplicáveis os métodos anteriores, como mostra a figura 11, não sendo necessário um preparo anterior para sua execução, de acordo se verifica:

Figura 11- Amanteigamento de juntas soldadas.

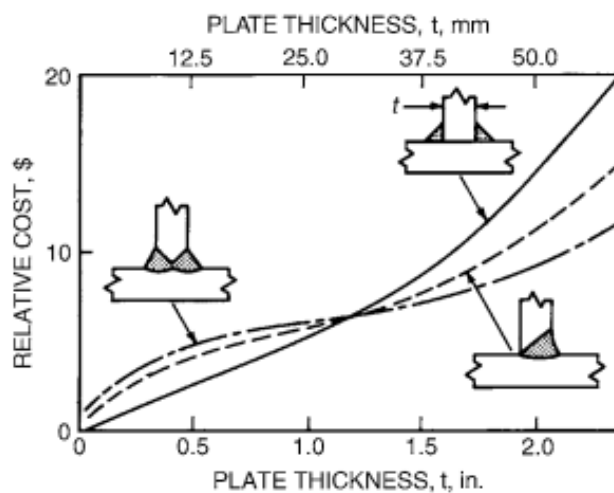


Fonte - (DIN, 2001).

Portanto, aspectos econômicos também devem ser considerados antes de selecionar o tipo de chanfro a ser usado em um projeto. Conforme ilustra a figura 12, o Welding Handbook afirma que as juntas em T com penetração total em espessuras inferiores a aproximadamente 30 mm apresentam maior custo de fabricação que as juntas de penetração parcial. Os custos de fabricação desses dois tipos de juntas invertem quando a espessura do metal base ultrapassa os 30 mm.

A junta de ângulo com chanfro do tipo Meio V, apresenta um custo intermediário quando comparado às outras juntas conforme a figura 12, contudo se não observado as recomendações da DIN apresentadas na figura 11, não é indicada sua aplicação em vista da maior suscetibilidade do metal no surgimento da decoesão lamelar conforme a figura 10, se não ocorrer a aplicação da recomendação DIN seria financeiramente e tecnicamente recomendado juntas de ângulo com filete duplo para espessuras inferiores a aproximadamente 30 mm, e para espessuras superiores a 30 mm juntas de ângulo em K, segundo se apresenta:

Figura 12 - Relação entre espessura e custos de soldagem.



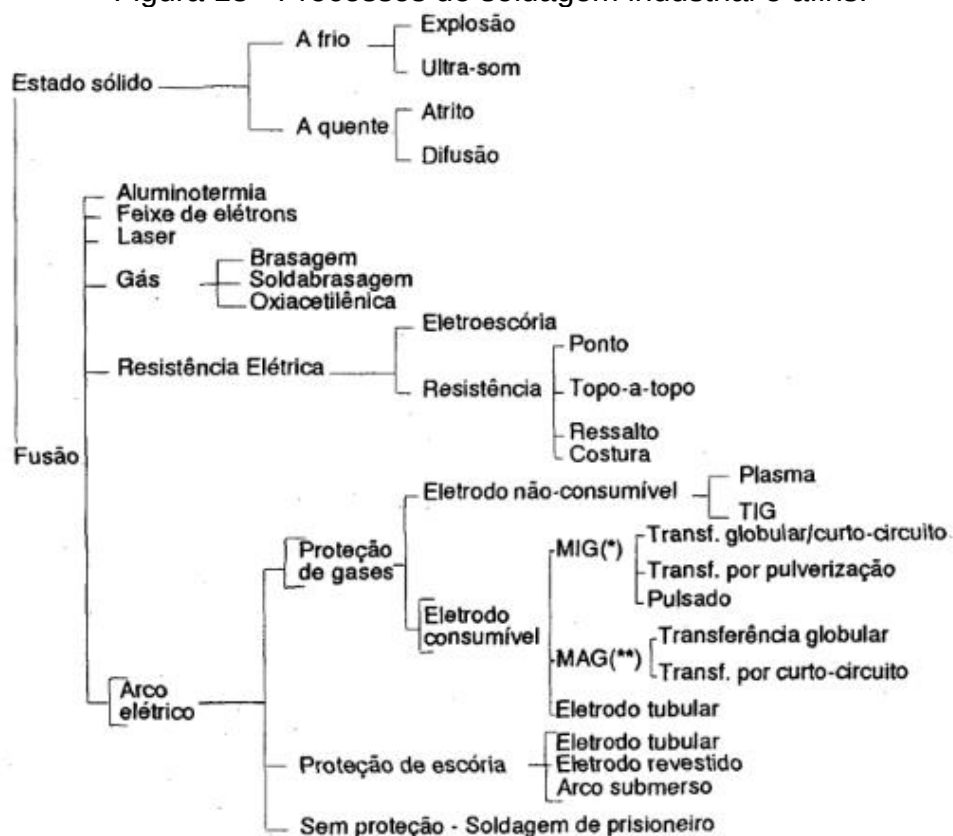
Fonte –(AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001)

2.2. Processos de Soldagem

2.2.1. Introdução

Na prática, estão disponíveis diversos processos para soldagem industrial, particularmente os processos por fusão a arco elétrico, como mostra a figura 13:

Figura 13 - Processos de soldagem industrial e afins.



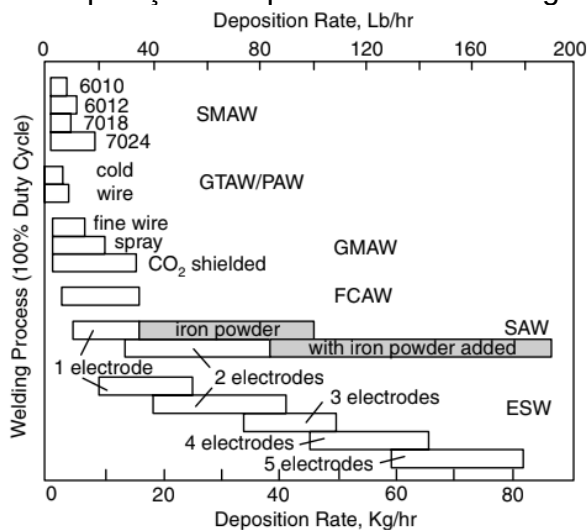
Observ.: (*) com argônio ou hélio.

(**) com argônio, oxigênio, CO₂ ou misturas desses gases.

Fonte –(WAINER; DUARTE BRANDI; DÉCOURT HOMEM DE MELLO, 2004)

Os aços estruturais temperados e revenidos apresentam um limite de escoamento próximo a 700 MPa e são amplamente aplicados em estruturas, nas quais se faz necessária uma elevada razão de resistência/peso. Eles podem ser facilmente soldados por processos convencionais como SMAW, GMAW, SAW e FCAW (MODENESI, 2011). A figura 14 mostra a taxa de deposição dos processos citados, que pode variar de 2 a 80 kg/h, vejamos:

Figura 14-Taxa de deposição dos processos de soldagem mais comuns.

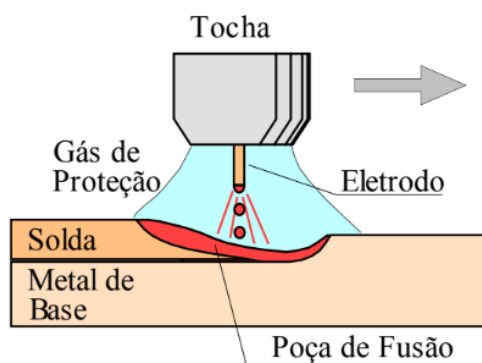


Fonte - (KOU, 2002).

Para a soldagem dos aços temperados e revenidos, os processos GMAW e FCAW seriam os mais indicados, por apresentarem um equilíbrio adequado entre a energia de soldagem e deposição do metal de adição. Nesse caso, um baixo aporte térmico é necessário para maximizar a resistência na junta soldada, juntamente a uma seleção adequada de metal de adição e uma criteriosa observância dos procedimentos de soldagem. O tecimento do cordão deve ser evitado, bem como baixas velocidades de resfriamento. O tecimento, caso seja inevitável, deve ser de no máximo 2 vezes o diâmetro do arame. (Modenesi, 2011)

Assim sendo, o processo GMAW se destaca na indústria por alguns fatores como a alta produtividade, devido à alta taxa de deposição, elevado fator de ocupação dos operadores e pela facilidade de robotização do processo. (MARQUES, P. V. MODENESI, P. J. e BRACARENSE, A.Q., 2009). A figura 15 ilustra esse processo:

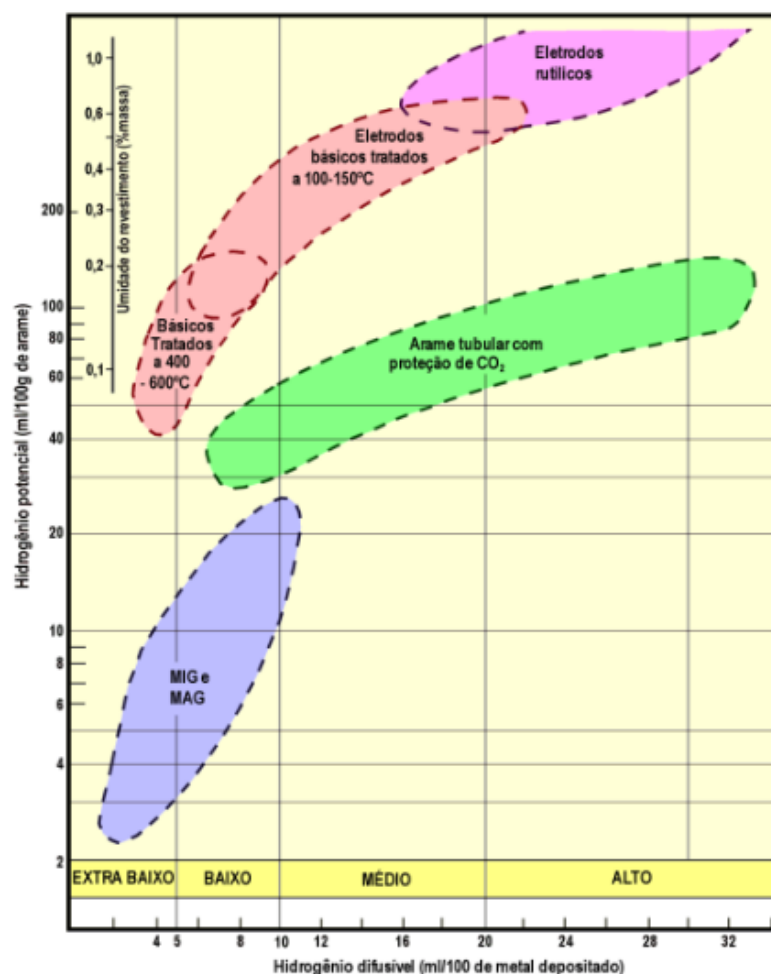
Figura 15 - Processo de soldagem GMAW.



Fonte - (MODENESI; MARQUES, 2022).

No que se refere ao processo de soldagem MIG MAG, são observadas as menores níveis de hidrogênio difusível, enquanto na aplicação de arame tubular protegido por CO_2 há maior difusividade de Hidrogênio no metal de adição durante a soldagem, conforme figura 16:

Figura 16 – Nível de hidrogênio difusível dos processos de soldagem.



Fonte – (MODENESI, 2021).

Tendo em vista todo o exposto acima, o processo GMAW é o mais adequado para confecção do implemento.

2.2.2. Seleção do Metal de adição

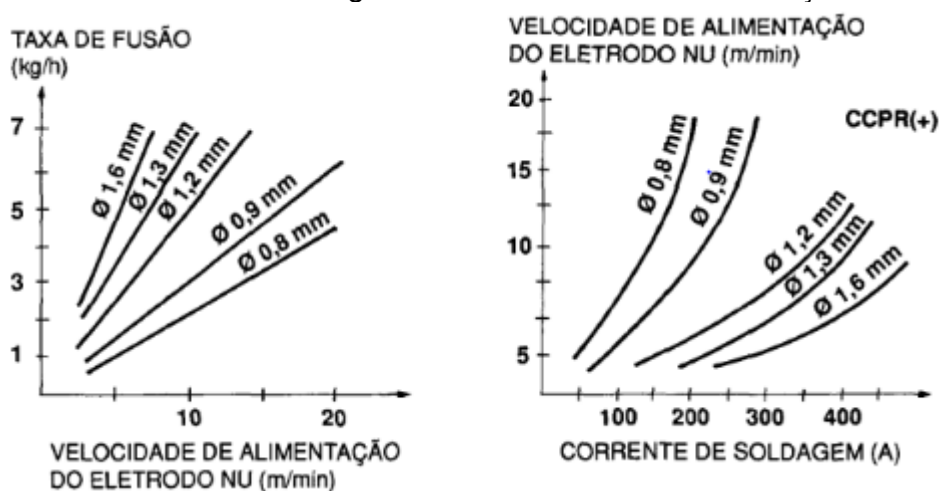
A escolha do diâmetro do arame de solda deve considerar tanto a produtividade quanto as características microestruturais do metal base. Quanto menor a energia de soldagem, menor a zona afetada pelo calor (ZAC), o que reduz os danos ao material auxiliando obter uma microestrutura mais refinada.

A Figura 17 mostra a relação entre corrente, velocidade de alimentação e taxa de deposição. O arame de Ø 1,6 mm apresenta a maior taxa de fusão dentre os

demais, o que favorece a produtividade, permitindo uma soldagem mais rápida e eficiente enquanto o arame de $\varnothing 0,8$ mm apresenta o oposto. No entanto, ao comparar o arame de $\varnothing 1,6$ mm com os arames de diâmetros menores, observa-se que, para alcançar a mesma taxa de fusão, é necessário aumentar a velocidade de alimentação do arame.

Dentre os distintos diâmetros apresentados, o arame de $\varnothing 1,2$ mm se destaca por oferecer resultados equilibrados, com uma combinação otimizada de corrente e taxa de deposição em relação aos demais diâmetros. Esse equilíbrio torna o arame de $\varnothing 1,2$ mm a melhor escolha dentro da faixa de diâmetros mostrada na Figura 17, proporcionando uma boa relação entre produtividade e controle do processo de soldagem.

Figura 17 - Relação entre a os diâmetros dos arames com taxa de deposição Kg/h, corrente de soldagem e a velocidade de alimentação.



Fonte -(WAINER; DUARTE BRANDI; DÉCOURT HOMEM DE MELLO, 2004)

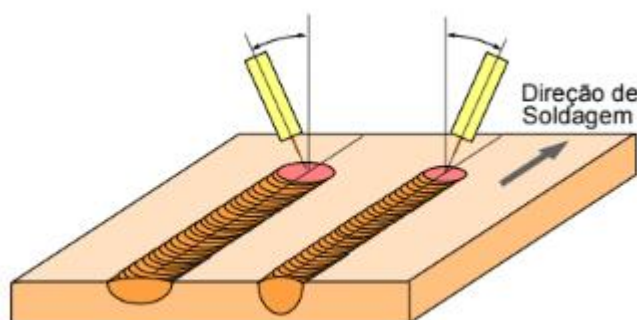
Por conseguinte, ao buscar o equilíbrio entre a produção e a conservação das propriedades mecânicas do metal base o arame mais adequado seria o arame de $\varnothing 1,2$ mm.

2.2.3. Influência dos parâmetros e técnicas de soldagem na morfologia do cordão

Algumas técnicas operatórias e parâmetros de soldagem influenciam diretamente a morfologia do cordão, como a inclinação da tocha em relação ao metal base, a progressão de soldagem, a seleção dos gases de proteção, a polaridade do eletrodo etc.

Destarte, certas condições, a posição de progressão da tocha influencia diretamente na morfologia do cordão. Na progressão “puxando”, há maior penetração do metal de adição no metal base, em decorrência do direcionamento da coluna de plasma sobre a poça fundida, região já aquecida pelo processo, de modo diverso a progressão da tocha “empurrando”, promove menor penetração do metal de adição, em decorrência da aplicação de calor em região “fria”, consumindo energia para fundir os materiais, reduzindo a penetração, a depender da espessura do material e do objetivo, esta técnica deve ser considerada. Vejamos o exemplo abaixo:

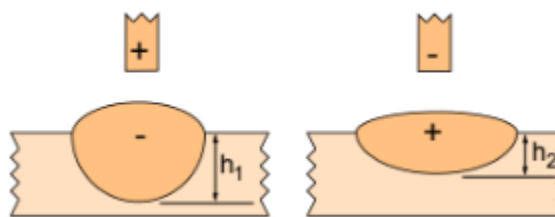
Figura 18 - Efeito da inclinação da tocha de soldagem na morfologia do cordão.(MIG/MAG)



Fonte - (MODENESI; MARQUES, 2022).

Nota-se que a polaridade é outro parâmetro que influencia na penetração do cordão de solda no metal base, conforme apresentado na figura 19, onde o eletrodo negativo favorece uma boa molhabilidade e baixa penetração do metal de adição, ideal para revestimento de chapas, enquanto o inverso promove excelente penetração e estreitamento do cordão. (Villani, Modenesi, 2022)

Figura 19 -Morfologia do cordão com a variação da polaridade no processo MIG/MAG.

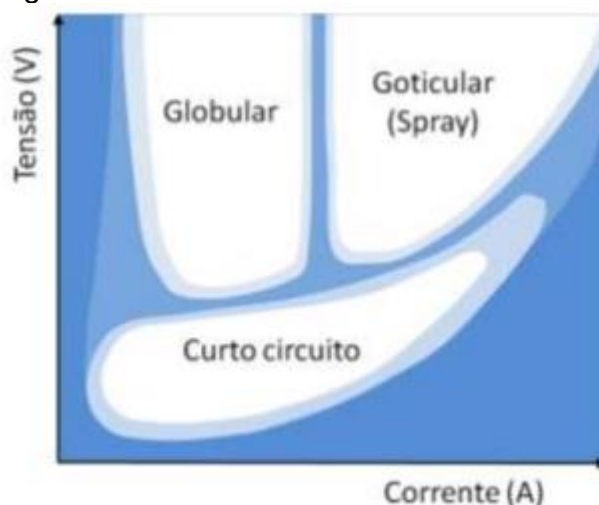


Fonte - (MODENESI; MARQUES, 2022)

2.2.3.1. Modos de transferência metálica

O processo MIG/MAG assim como outros processos de soldagem, possibilita diferentes modos de transferência metálica, sendo as mais genéricas a transferência metálica por Curto Circuito, Globular e Spray. Ilustra-se:

Figura 20 -Modos de transferência metálica.



Fonte - (PAULO J. MODENESI, 2012)

Dessa maneira, para reduzir defeitos de soldagem como respingos e melhorar a produtividade pela maior velocidade de alimentação, a região de transição entre o modo de transferência globular e Spray seria recomendada para a soldagem do implemento, tendo em vista o menor tempo dedicado ao acabamento, assim como bom aspecto visual.

Entretanto, para soldagem sobre cabeça é recomendada a transferência metálica por meio do curto-circuito apenas com a redução da tensão, sendo possível obter excelente controle da poça de fusão fora de posição não sendo necessário movimentar o implemento durante sua confecção, o que eliminaria um desperdício de produção, a movimentação.

2.2.3.2. Seleção do Gás de proteção

Uma adequada seleção do gás de proteção favorece a obtenção de uma transferência metálica por spray em menores correntes de soldagem, já que não é desejável durante a operação por questões estéticas a transferência globular, por possuir como característica o excesso de respingos durante o processo, sendo necessário retrabalho para remoção destes posteriormente antes de enviar ao cliente. Como decorrência da menor corrente de soldagem é possível abrandar mudanças severas na microestrutura do metal base, pela menor energia de soldagem.

Salienta-se que alguns gases de proteção possuem maior e menor potencial de ionização, o que para abertura do arco é necessário empregar maior ou menor corrente durante o processo de soldagem, tendo como consequência maior ou menor energia de soldagem, pois quanto maior o potencial de ionização de um gás, maior é a temperatura para tornar esse gás condutor, ou seja, plasma, sendo importante a redução da corrente de soldagem para atenuar as modificações severas das características micro estruturais do metal base, sendo esta seleção mais eficiente quando aplicada em conjunto com outras técnicas. (MPROJ-4 O ARCO ELÉTRICO DE SOLDAGEM)

Em virtude dos métodos Lean largamente empregados na indústria, o excesso de movimentação de uma peça em processo de fabricação é uma ação, a qual o cliente não paga, portanto, é caracterizada como um desperdício.

Contudo, o conhecimento sobre o comportamento dos gases durante a soldagem se faz importante, pois a depender das dimensões da peça, a soldagem

será executada desde a posição plana até a sobre cabeça, sendo alguns gases apresentando menor densidade, indicados para soldagem sobre cabeça, e os mais densos, indicados para soldagem plana, quando limitado a uso de um gás de proteção para todas as posições é preciso entender que os gases mais densos precisariam de maior vazão quando aplicados em soldagem sobre cabeça, enquanto o menos denso, em soldagem sobre cabeça, não é necessário maior vazão.

No entanto, o gás de proteção com menor potencial de ionização seria bem aplicado em soldagem fora de posição, em razão da necessidade de menor energia de soldagem para favorecer o controle da poça de fusão fora de posição.

Tabela 5 - Propriedade dos gases de proteção.

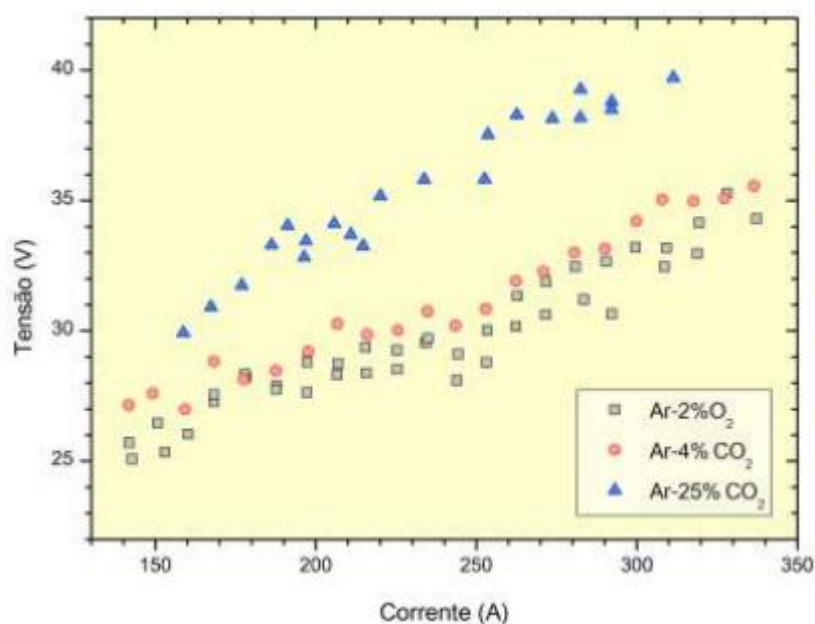
Gas	Chemical Symbol	Molecular Weight (g/mol)	Specific Gravity with Respect to Air at 1 atm and 0°C	Density (g/L)	Ionization Potential (eV)
Argon	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	1.53	1.978	14.4
Helium	He	4.00	0.1368	0.178	24.5
Hydrogen	H ₂	2.016	0.0695	0.090	13.5
Nitrogen	N ₂	28.01	0.967	1.25	14.5
Oxygen	O ₂	32.00	1.105	1.43	13.2

Fonte – (KOU, 2002).

Apresentada a seguir, a figura 21 demonstra 3 variações de misturas de gás, onde as misturas com maior concentração de dióxido de carbono, 25% para uma mesma corrente de operação, exigem maior tensão do arco, enquanto a mistura com apenas 4% de dióxido de carbono já se observa menor tensão no arco.

Na mistura onde há 2% de Oxigênio é possível visualizar a menor tensão de soldagem, devido à menor energia de ionização quando comparado ao dióxido de carbono, que por consequência ajuda na obtenção de uma menor energia de soldagem na confecção de um implemento.

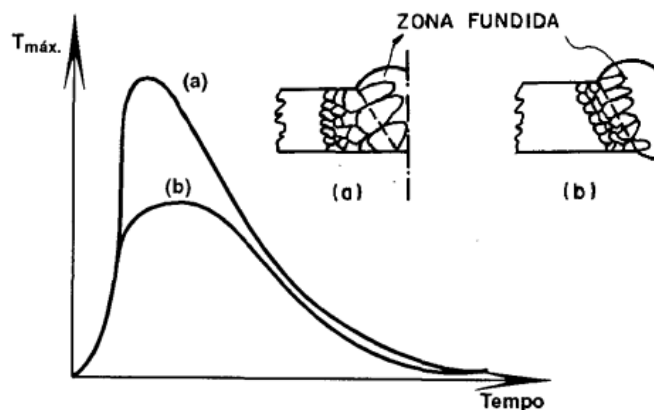
Figura 21- Influência do gás de proteção na variação da tensão de soldagem.



Fonte - (PAULO J. MODENESI, 2012)

Com menor tensão e corrente necessária para a formação da coluna de plasma através da atmosfera gasosa de Ar-2%O₂, há o refino dos grãos do metal base, enquanto o oposto ocorre com grãos formados sob a proteção gasosa do Ar-25%CO₂, podendo ser visualizado na figura 22, a formação de grãos grosseiros quando há maior energia de soldagem, curva (a), se comparado a curva (b) se observa em decorrência da menor energia de soldagem, grãos refinados. Os grãos refinados tendem a apresentar maior resistência mecânica quando comparados a grãos grosseiros. (CALLISTER, 2010)

Figura 22 - Influência do aporte térmico no refino de grão.



Fonte - (WAINER; DUARTE BRANDI; DÉCOURT HOMEM DE MELLO, 2004).

Adiante, conforme exposto na tabela 6, adotando a mistura de Ar 5%O₂ é possível obter correntes de transição menores, comparadas com as demais misturas gasosas para um arame de $\varnothing 1,2$ mm.

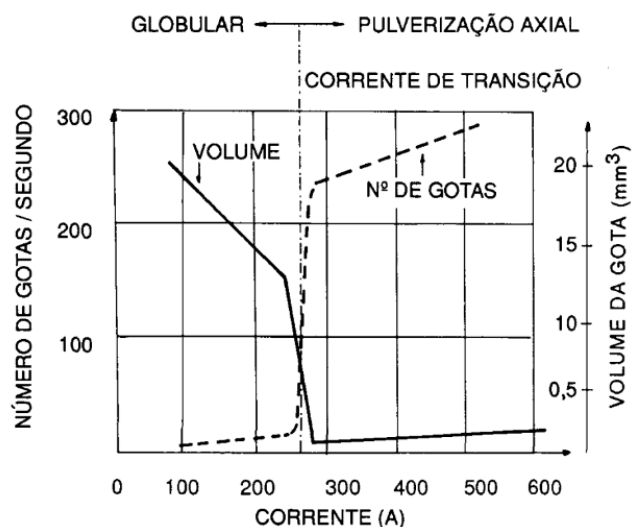
Tabela 6 - Relação entre os eletrodos, corrente de transição, e a composição do gás de proteção.

Diâmetro (mm)	Corrente de Transição (A)	Gás de Proteção	Material
0,6	135	Ar-2%O ₂	Aço baixo Carbono
0,8	150		
0,9	165		
1,2	220		
1,6	275		
0,9	155	Ar-5%O ₂	
1,2	200		
1,6	265		
0,9	175	Ar-8%CO ₂	
1,2	225		
1,6	290		
0,9	180	Ar-15%CO ₂	
1,2	240		
1,6	295		
0,9	195	Ar-20%CO ₂	
1,2	255		
1,6	345		

Fonte -(PAULO J. MODENESI, 2012).

Portanto, para a soldagem fora de posição a transferência por curto circuito ocorreria com correntes de soldagem ainda menores, apenas reduzindo a corrente durante a operação permitindo um bom controle da poça de fusão sobre cabeça.

Figura 23- Método de transferência metálica GMAW arame de Ø1,6 mm.



Fonte-(WAINER; DUARTE BRANDI; DÉCOURT HOMEM DE MELLO, 2004)

2.3. Aporte térmico

Com a definição do gás de proteção, é possível definir alguns parâmetros de soldagem importantes.

A tabela 7 mostra o rendimento térmico dos processos de soldagem sendo o processo GMAW, processo selecionado para este trabalho, com eficiência térmica (η) variando entre 0,75 e 0,95.

Tabela 7- Rendimentos de diferentes processos de soldagem

Processo	Rendimento Térmico (η)
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 - 0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 - 0,50
Laser (LBW)	0,005 - 0,70

Fonte -(MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012)

Em posse da equação de energia de soldagem e as respectivas variáveis $k=0,75$, $U=200$ (A), $I= 28$ (V), $v = 5$ mm/s, tem-se o seguinte valor de energia imputada no metal base:

$$Q = \frac{k * U * I}{v} \rightarrow Q = 0,864 \frac{KJ}{mm} \quad (2)$$

Há, na norma EN1011-2, equações para o cálculo de temperatura de pré-aquecimento e interpasse que dependem do cálculo do carbono equivalente, sendo a equação de pré-aquecimento apresentada abaixo, seguidos do CET do Quend 700 e Creusabro Relia 450:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} em \% \quad (3)$$

$$CET_{QUEND} = 0,455 \quad (4)$$

$$CET_{RELIA} = 0,48 \quad (5)$$

Para calcular a temperatura pré-aquecimento disponibilizada na norma EN1011-2 é necessário avaliar se os requisitos abaixo são atendidos:

- Carbono equivalente (CET) contido entre 0,2 e 0,5%.
- Espessura da chapa (d), variando entre 10 mm e 90 mm.
- Hidrogênio difusível (HD), contido entre 1 e 20ml /100g de metal de solda.
- Energia térmica imputada no material (Q), contida entre 0,5 e 4,0 kJ/mm.

Observa-se que os requisitos básicos são atendidos para a execução do cálculo, foi considerado hidrogênio difusível igual a 2 ml/100g na equação 6, e os resultados foram disponibilizados no Gráfico 1.

$$T_0 = 697 * CET + 160 * \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 * HD^{0,35} + (53 * CET - 32) * Q - 328(C^\circ) \quad (6)$$

Com estes dados é possível definir para qualquer espessura e material selecionado, a temperatura adequada de pré-aquecimento para minimizar a retenção de hidrogênio difusível e a formação de martensita.

2.4. Técnicas para minimizar as tensões residuais e maximizar a vida útil.

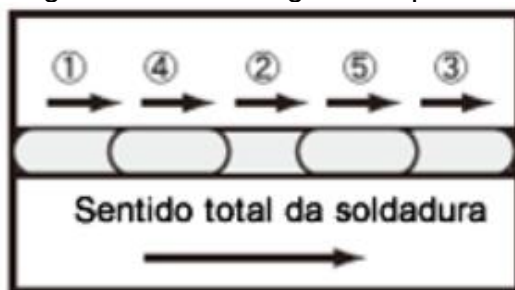
2.4.1. Seleção da sequência de soldagem

A sequência de progressão dos passes e cordões influencia diretamente nas tensões residuais e níveis de distorção no metal base, sendo necessário avaliar no processo a melhor sequência de soldagem para minimizar esses problemas atrelados ao procedimento de soldagem. Há algumas sequências de soldagem que resultam em elevados níveis de tensão e distorção, em contrapartida, há elevadas taxas de deposição e por consequência elevada produtividade, enquanto há outros processos com baixos níveis de distorção e tensão, porém com relativa redução de produtividade pela menor taxa de deposição. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

A sequência de passes corridos é a técnica de soldagem que provoca uma distribuição de tensões assimétricas favorecendo a ocorrência de distorção, quando comparada com as demais sequências de soldagem, contudo, possui a maior eficiência operacional. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

A sequência de passes orientados dentre as demais sequências, apresenta menor distorção, menores valores de tensão residual. Todavia, apresenta baixa eficiência operacional, (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982) não sendo a técnica a seguir interessante do ponto de vista de produção.

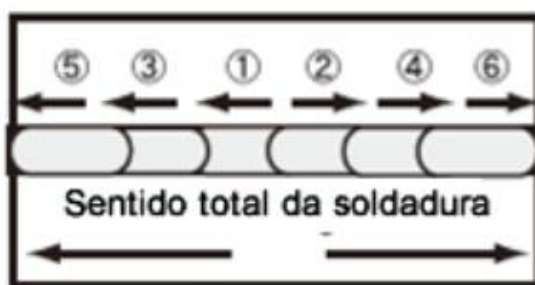
Figura 24-Progressão de soldagem em passes Orientados.



Fonte -(KOBELCO, [s.d.]).

A sequência de soldagem simétrica é indicada quando se faz necessário baixo nível de distorção, mediante distribuição simétrica de tensões residuais. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

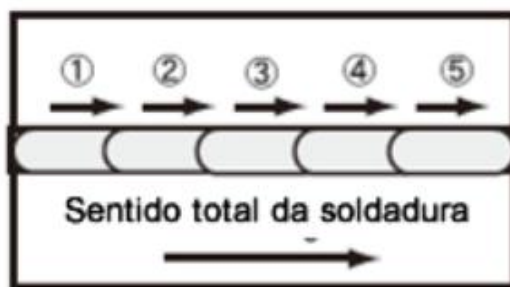
Figura 25- Progressão de soldagem simétrica.



Fonte -(KOBELCO, [s.d.])

A sequência de passes progressivos apresenta bons níveis de controle das tensões residuais e distorções, em contrapartida, dentre as sequências de progressão é a mais suscetível ao surgimento de trincas na raiz, quando adotada em estruturas pesadas. (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

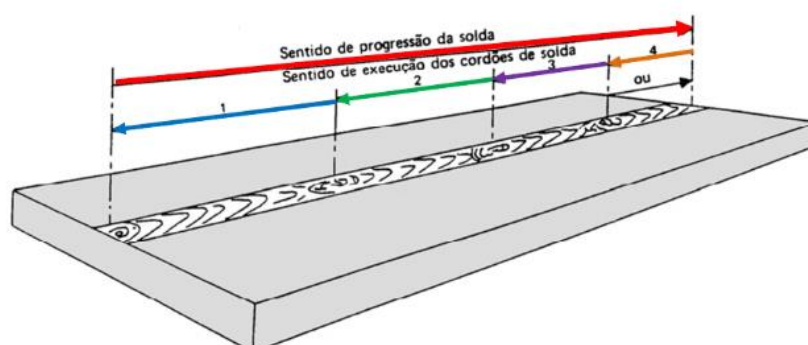
Figura 26-Sequência de soldagem em passos progressivos.



Fonte-(KOBELCO, [s.d.])

A sequência de progressão de ré apresenta boa distribuição de tensões residuais e baixos níveis de distorção, porém, não apresenta altos níveis de eficiência operacional relacionados a taxa de deposição de passes corridos.(OKUMURA; TANIGUCHI, 1982)

Figura 27- Sequência de progressão de ré.



Fonte - Terminologia e técnicas de soldagem (FBTS).

Para aplicação, a sequência mais adequada seria a progressão de ré, apesar de não apresentar os melhores níveis de eficiência operacionais quando comparada aos passes corridos, o equilíbrio entre a produção e as tensões residuais é o mais adequado.

2.4.2. Estudo de procedimentos pós-soldagem

É disponibilizado pelo IIW, recomendações para maximizar a vida útil do equipamento mediante técnicas apresentadas no documento IIW-2142-10.

As técnicas existentes citadas pelo IIW são as técnicas de *Burr Grinding* (Rebarbamento), *Hammer Peening* (Martelamento), *Needle Peening* (Martelamento de agulha), *TIG Dressing*, entre outras.

2.4.2.1. Rebarbamento (*Burr Grinding or Fully bur Machine*)

A técnica de rebarbamento consiste no uso de um equipamento de acionamento elétrico, hidráulico ou pneumático que possua rotação variando de 15.000 a 40.000 rpm. A ferramenta fixada na ponta do equipamento, lima rotativa, é normalmente fabricada com carboneto de Tungstênio. (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013)

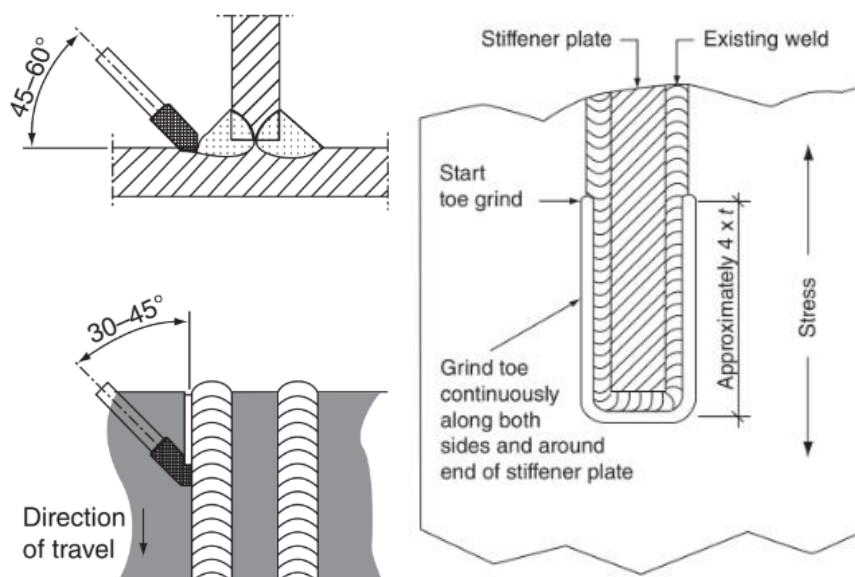
Figura 28 - Equipamento para execução do rebarbamento.



Fonte - (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013).

A técnica consiste em remover minimamente 7% a no máximo 2 mm de profundidade de material na margem da solda, conforme apresentado na figura 31. (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013)

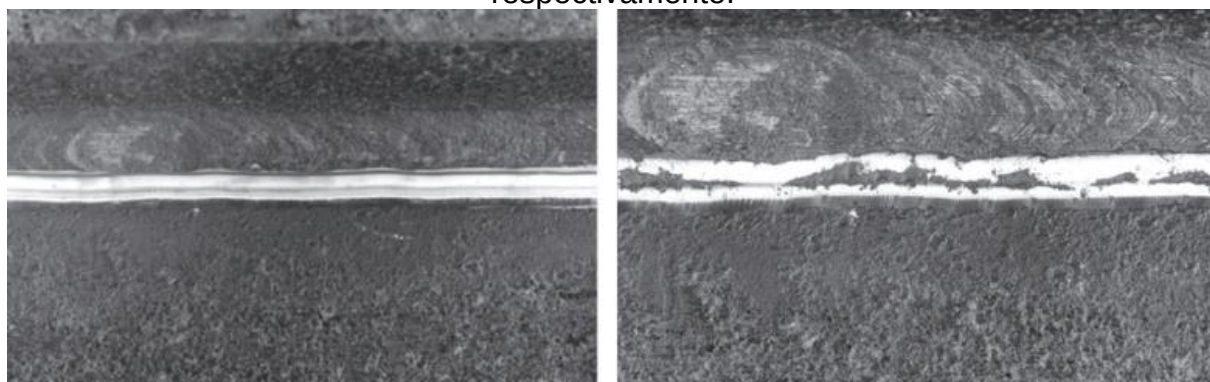
Figura 29 - Técnicas para execução do rebarbamento.



Fonte -(PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013).

Deve-se observar a correta execução da técnica, a imagem à esquerda apresenta a correta execução, enquanto o exemplo à direita apresenta o rebarbamento deficiente, não garantido a maximização da vida útil.

Figura 30 - Correta e incorreta forma de execução do rebarbamento respectivamente.



Fonte (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013)

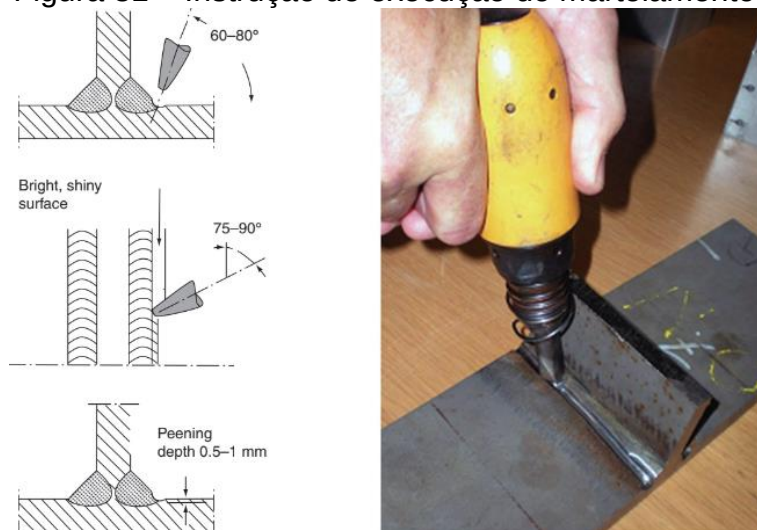
2.4.2.2. Martelamento (*Hammer Peened*)

O martelamento, consiste no processo de golpear a região imediatamente após o metal de adição, o “pé da solda”, visando provocar refinamento na estrutura cristalina e aumentando a resistência mecânica outrora modificada pelo processo de soldagem,

além de eliminar o concentrador de tensão existente em decorrência da morfologia do cordão de solda.

O processo deve ser executado com o instrumento equipado com pistão de 15 a 30 mm de diâmetro e comandado por ar comprimido com uma pressão de 5 a 7 bar, com frequência de 25 a 100 impactos por segundo, com energia de impacto em uma faixa de 5 a 15 Joules. Tipicamente, a massa do equipamento é de 3,5 kg. (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013)

Figura 31 – Instrução de execução do martelamento.

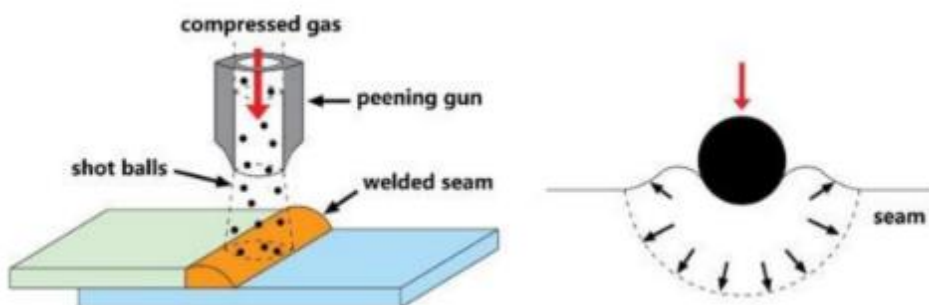


Fonte - (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013)

2.4.2.3. Jateamento de esferas (*shot Peening*)

O processo de jateamento (shot peening) por esferas consiste em executar o jateamento da superfície do metal de solda para promover a distribuição das tensões residuais através da compressão localizada (MPROJ-7).

Figura 32 – Esquema do Processo de jateamento com esferas.



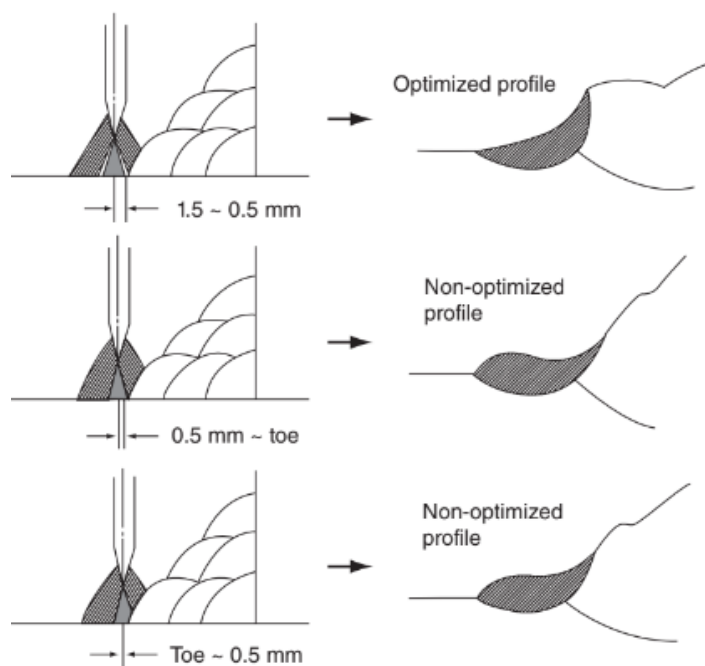
Fonte - MPROJ 07

2.4.2.4. TIG Dressing

O processo TIG dressing consiste no uso do processo de soldagem TIG de forma autógena para refazer o pé da solda para minimizar o concentrador de tensões local e minimizar o surgimento de trincas na junta soldada.

A figura 36 apresenta o aspecto visual adequado após a aplicação do procedimento conforme o 1º exemplo mostrado, não sendo recomendado o 2º e 3º exemplo da mesma figura.

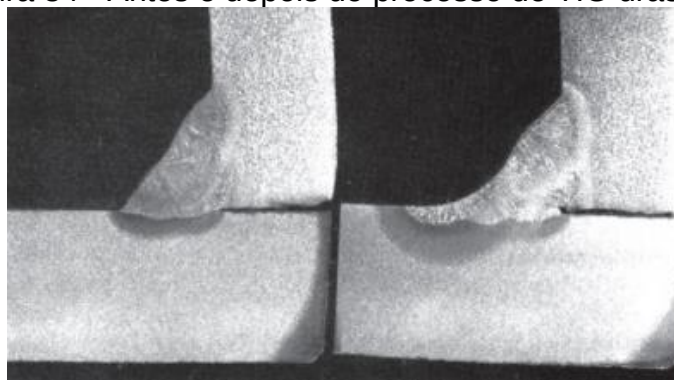
Figura 33 – Recomendações da técnica de TIG Dressing.



Fonte - (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013).

Os corpos de prova apresentados na figura 36 apresentam o aspecto visual recomendado pelo IIW antes e depois da aplicação do TIG dressing.

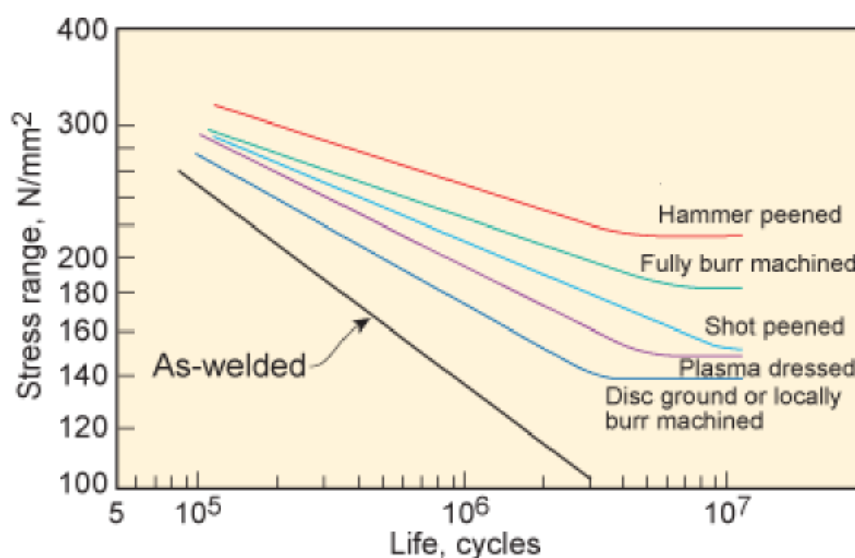
Figura 34 - Antes e depois do processo de TIG drassing.



Fonte - (PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX, 2013).

É possível compreender a influência de algumas técnicas para minimizar a falha por fadiga, observado os resultados apresentados na figura 37, sendo o martelamento, o melhor método apresentado para prevenção da fadiga, dentre os demais métodos mostrados na figura, contudo, para aplicação industrial seria o jateamento de esferas o mais recomendado, devido à agilidade do processo, ficando o martelamento indicado para regiões mais críticas.

Figura 35 - Influência dos diferentes métodos para otimização da resistência a fadiga.



Fonte - MPROJ 07.

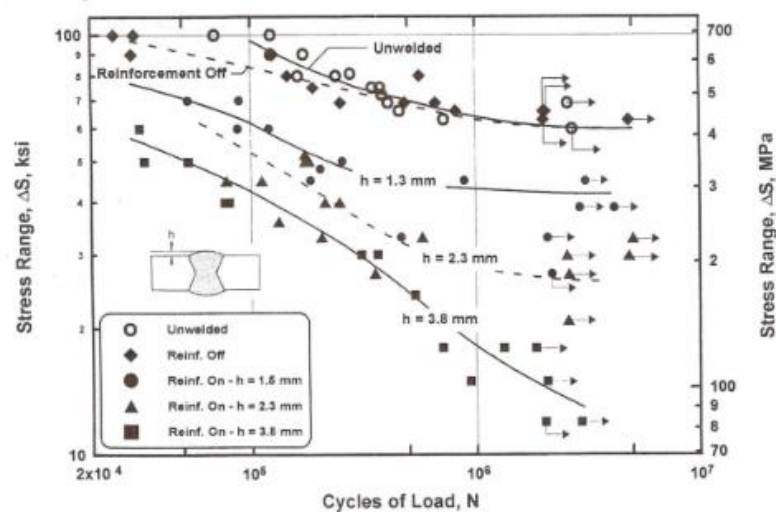
2.4.2.5. Fator de forma. Seleção da altura do Reforço de Solda.

A figura 38 apresenta uma relação entre o reforço de solda h e resistência à fadiga de uma junta soldada.

Em juntas soldadas, onde não há reforço de solda, é observada uma maior resistência à fadiga, essas juntas são representadas pelos losangos de tendência na figura 38, enquanto as juntas que possuem menor resistência a fadiga em decorrência o reforço de solda, são representadas pelos triângulos e quadrados de tendência

Com o maior reforço da solda de topo, com o $h = 3,8$ mm representados no gráfico pelos pontos quadrados, uma menor resistência à fadiga é observada, ficando evidente a necessidade de sempre procurar o menor reforço de solda possível para minimizar a falha por fadiga.

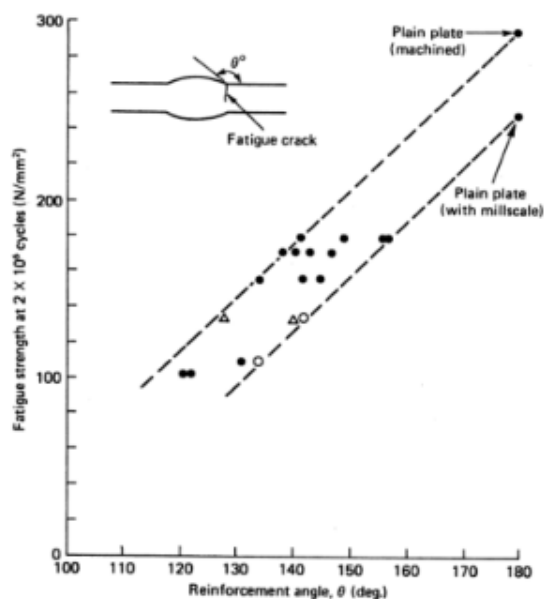
Figura 36- Influência do reforço de solda na resistência à fadiga.



Fonte - MPROJ 07.

A fadiga é atribuída a forma, corroborando com esta afirmação é possível visualizar na figura 39, quando o ângulo formado entre o metal base e o metal de solda tende a 180° , a resistência à fadiga é máxima em distintos métodos de acabamento superficial.

Figura 37 - Influência do ângulo entre a o metal base e o metal de solda na resistência à fadiga.

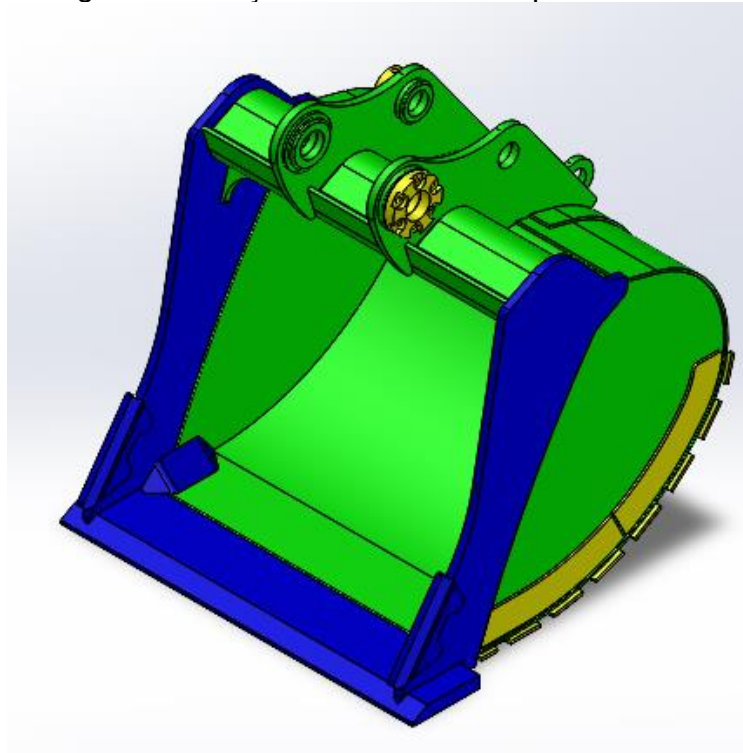


Fonte - MPROJ 07.

2.5. Objeto de estudo, escavadeira PC500.

Foi disponibilizado em cortesia pela Britaço, empresa fabricante de FPS (Ferramenta de Penetração no Solo), e Implementos destinados à extração Mineral, um modelo de implemento para escavação de materiais com densidades baixas, aplicável em máquinas da Marca Komatsu modelo PC500, com capacidade de 3,8 m³, que será objeto de estudo neste trabalho.

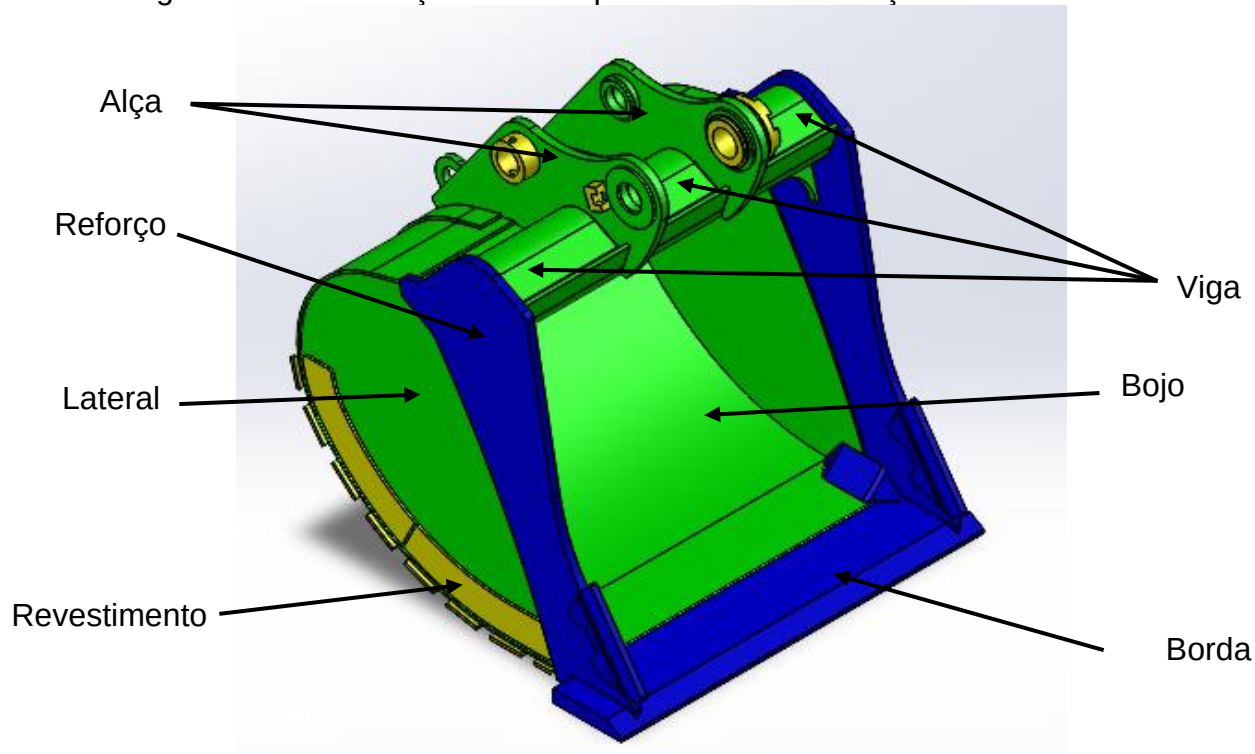
Figura 38 -Caçamba escavadeira para PC500.



Fonte– Disponibilizado pela Britaço.

Uma caçamba escavadeira é composta, de forma geral, pelos seguintes itens conforme apresentação esquemática da figura 41:

Figura 39- Identificação dos componentes de uma caçamba Escavadeira.



Fonte - Cortesia da Britaço.

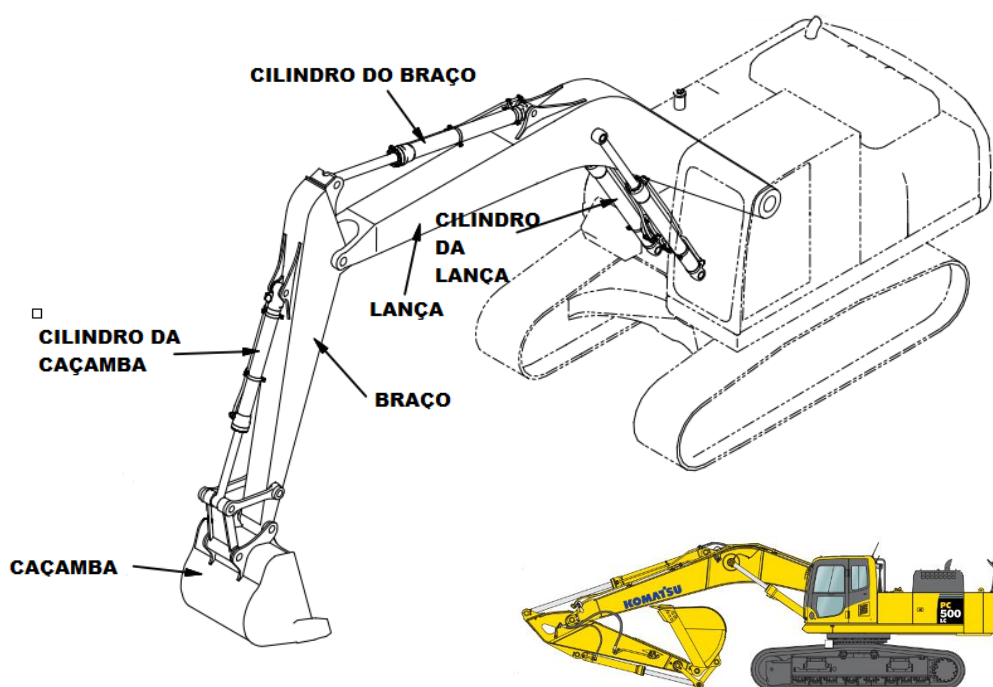
Antes de iniciar a análise das uniões soldadas, se faz necessário compreender as forças envolvidas durante a escavação, para ser possível prever a resistência à fadiga dos componentes do implemento em questão.

Para este levantamento, recorreram-se aos manuais de oficina e Data-Sheet da Escavadeira Komatsu PC-500.

2.6. Forças de escavação

O manual de Oficina Komatsu apresenta um esquema identificando os principais componentes responsáveis pela escavação do equipamento, os quais serão importantes para definição das forças de escavação, conforme representação da figura 42:

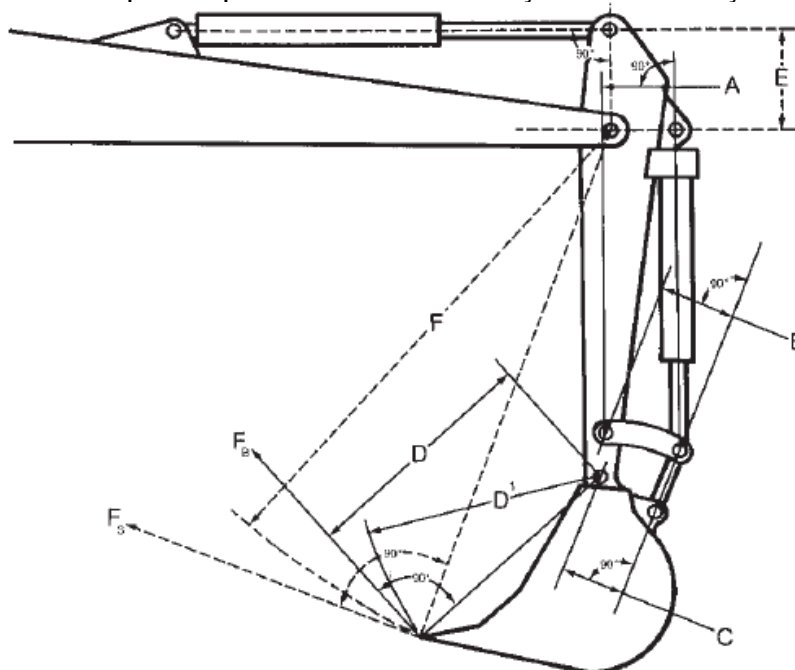
Figura 40- Esquema da caçamba escavadeira.



Fonte -(KOMATSU, 2018)

Em catálogos técnicos de máquinas e equipamentos disponibilizados pelas fabricantes na *WEB* é comum encontrar as forças que o equipamento exerce sobre o implemento em sua operação, segundo informações disponíveis tanto pela Komatsu como Caterpillar, a determinação de forças de escavação segue as normas como a ISO6015 e/ou SAEJ 1179.

Figura 41- Esquema para o Cálculo de forças de escavação.



Fonte: Caterpillar Handbook.

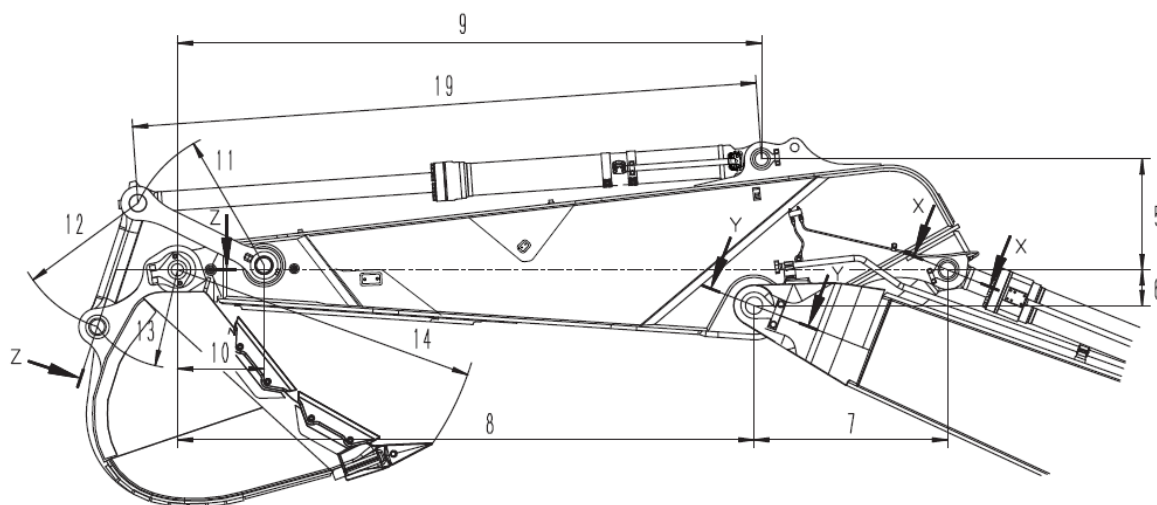
Conforme a norma SAEJ1179 as equações abaixo são destinadas a definir as forças de escavação, sendo a incógnita F_b , a força exercida pelo cilindro da caçamba, e F_s , a força exercida pelo cilindro do Braço.

$$F_b = \frac{(P_{Cil.caçamba} * A_{Áreadopistão})}{D} * \left(\frac{A * C}{B} \right) \quad (7)$$

$$F_s = \left(\frac{(P_{Cil.Braço} * A_{áreadopistão}) * E}{F} \right) \quad (8)$$

No Manual da Loja da Escavadeira Komatsu PC500 são disponibilizadas informações referentes aos dimensionais, tanto do Implemento como do braço da caçamba, conforme demonstrado na figura 44, sendo estas informações importantes para o cálculo das Forças de escavação. Vejamos:

Figura 42- Esquema do Braço da caçamba e do Implemento da PC500.



Fonte: Manual de Loja Komatsu.

Não há necessidade de tabelar todas as medidas disponibilizadas pela Komatsu para o cálculo de força, visto que a reduzida quantidade de incógnitas necessárias para este cálculo em conformidade com as informações solicitadas pela norma SAEJ1179, portanto, a Tabela 6 fornece todas as dimensões necessárias, relacionando as posições e as medidas da máquina:

Tabela 8- Dimensões para o Cálculo das Forças de Escavação.

Posição	Dimensões (mm)	Tolerância
5	647,7	± 1
6	208,6	$\pm 0,5$
7	1132,1	± 1
8	3375	± 3
11	823	$\pm 0,2$
13	574,8	--
14	1804	--

Fonte- Adaptado do Manual de Loja da Komatsu

Logo, para determinar a Força exercida pelo cilindro é necessário recorrer ao catálogo técnico da máquina para possibilitar a coleta de informações, como a área do pistão, vazão etc., esses dados coletados estão disponibilizados na Tabela 7:

Tabela 9 - Informações técnicas do sistema hidráulico

Membro	Cilindros (Qtde.)	Ø Haste (mm)	Ø Cilindro (mm)	Curso do Cil. (mm)	Vazão (l/Min)	Pressão (MPa)
Lança	2	115	170	1570	690	37,3
Braço	1	115	185	1985		
Caçamba	1	115	160	1450		

Fonte- Adaptado do Catálogo técnico do Fabricante

Com estas informações e as equações disponíveis na literatura da disciplina de Comandos hidráulicos é possível calcular e determinar as forças de escavação que serão úteis na avaliação estrutural do implemento, conforme Tabela 8:

Tabela 10-Resultados dos cálculos de área, volume, e tempos do sistema hidráulico

Membro	Cilindros (Qtde.)	Área da Haste (mm ²)	Área do Cilindro (mm ²)	Curso do Cil. (mm)	Volume do avanço (m ³)	Volume do recuo (m ³)	Tempo de avanço (s)	Tempo de retorno (s)
Lança	2	10381,625	22686,5	1570	0,035618	0,019319	6,19	3,36
Braço	1	10381,625	26866,625	1985	0,05333	0,032723	4,64	2,85
Caçamba	1	10381,625	20096	1450	0,029139	0,014086	2,53	1,22

Fonte- Do autor

Com os resultados apresentados na Tabela 8, foi possível calcular a força exercida por cada cilindro do equipamento, conforme tabela 9:

Tabela 11-Forças exercida pelos cilindros de cada Conjunto

Membro	Cilindros (Qtde.)	Força de avanço (kN)	Força de Recuo(kN)
Lança	2	1692,4129	917,943675
Braço	1	1002,125113	614,8905
Caçamba	1	749,5808	362,3461875

Fonte- Do autor.

Em posse de todas as informações e cálculos pertinentes é possível determinar precisamente as forças ilustradas na figura 43, conforme a Norma SAEJ1179, sendo esses resultados mostrados na Tabela 10:

Tabela 12 - Forças de escavação da Caçamba Komatsu PC500

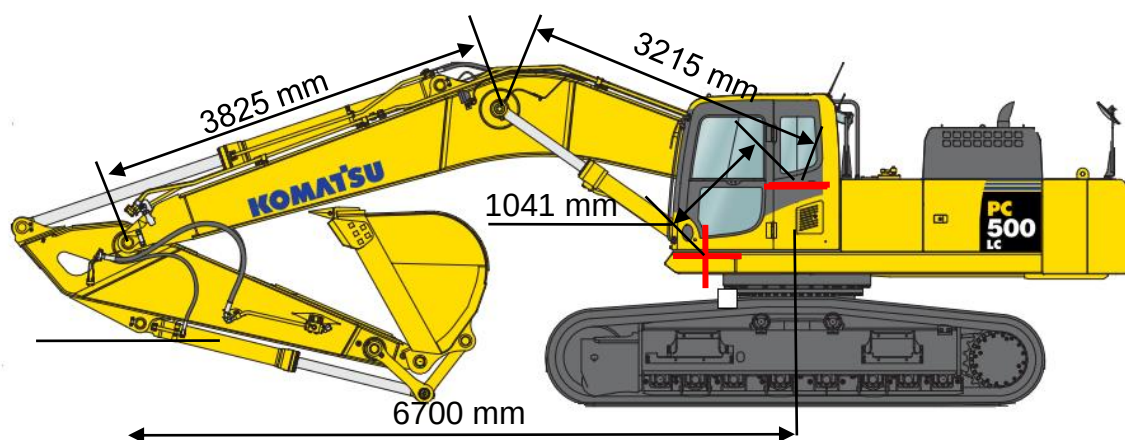
	Avanço	Recuo
Fb (kN)	779,910132	377,0073394
Fs (kN)	222,746348	136,6741655

Fonte - Do autor.

Contudo, a norma não tabela todas as forças exercidas sobre o implemento com base nas equações disponíveis, não sendo observado dessa mesma norma, informações sobre o movimento dos cilindros da lança, que conforme é possível visualizar na Tabela 9, essas forças são as que apresentam maior relevância para os cálculos, devido a sua magnitude em relação as demais, sendo 1692 kN de avanço do cilindro e 917 kN de recuo.

Para uma avaliação mais abrangente de forças que não são apresentados em documentos técnicos da máquina foi necessário fazer alguns levantamentos de campo, de maneira a propiciar a determinação das dimensões da lança do equipamento, os quais não estão disponíveis nos documentos técnicos fornecidos pela fabricante, dessa forma, foram encontradas as medidas conforme a figura 45:

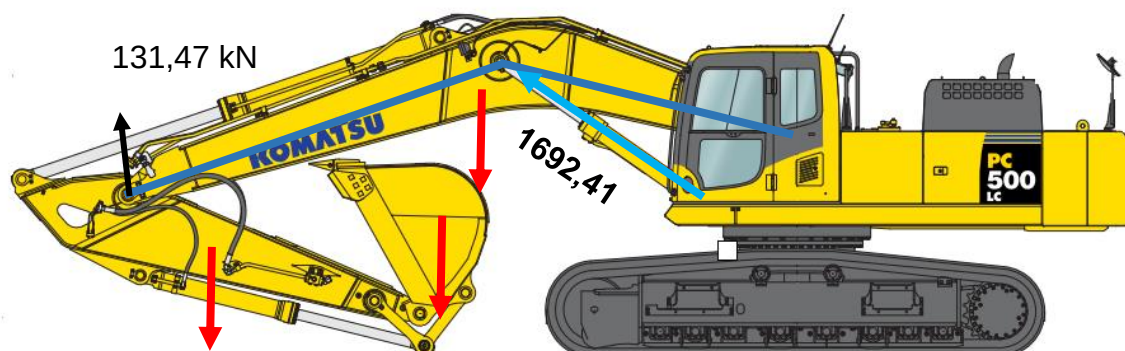
Figura 43 – Dimensões da Lança e Braço.



Fonte – (KOMATSU, 2018)

Mediante essas informações foi possível determinar a força aplicada durante o avanço do cilindro no eixo de ligação da lança e o braço de 131,47 kN, contudo, este componente teria seu valor ainda menor, eis que a força exercida pelo cilindro, em sua maior parte, seria subtraída quando somado vetorialmente com Força peso total do equipamento, representado por vetores vermelhos (Lança, braço, caçamba, material desagregado), subtraindo substancialmente a componente encontrada na ponta da lança, conforme figura 46:

Figura 44 – Forças atuantes na Lança da escavadeira com o cilindro em avanço.



Fonte - (KOMATSU, 2018)

Uma situação em que a força de escavação alcançaria valores máximos, seria durante o recuo do cilindro, pois durante o recuo, as forças gravitacionais que antes

subtraíam a força de avanço, nesta ocasião, atuam somando com a força de recuo, assim como as demais forças do peso da lança, braço, caçamba e material desagregado (rochas, minério, etc).

Com posteriores cálculos, obtém-se na ponta da lança, durante o recuo do cilindro, o vetor de 71,40 kN, que não são “consumidos” por nenhuma força durante a escavação, mas sim, auxiliado pela gravidade atuante no conjunto.

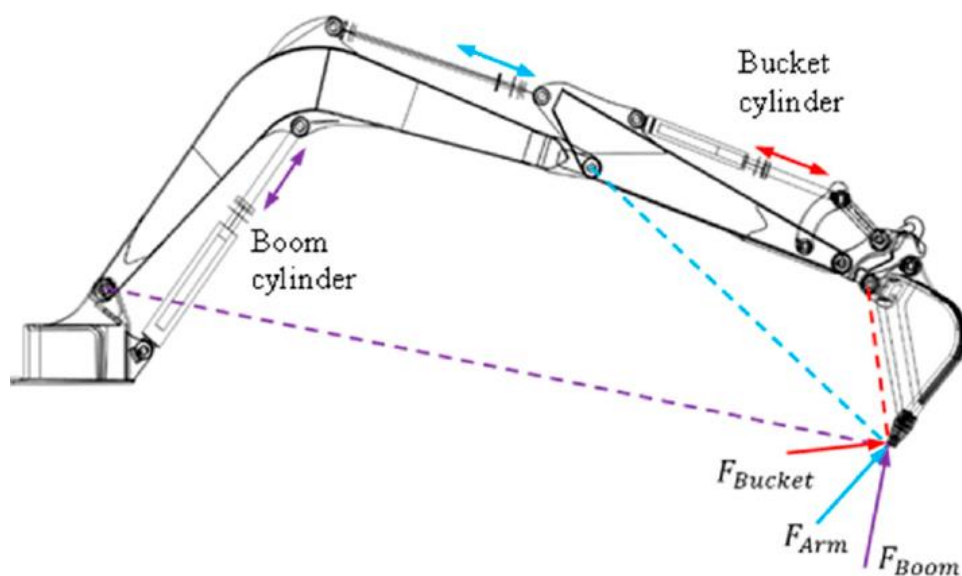
Essa força varia dependendo da configuração de cava e pode oscilar entre o vetor F_b e F_s , conforme mostrado na figura 6, no entanto, o poder destrutivo dessa força oscilante é potencializado quando há o alinhamento do vetor F_b com o vetor força exercida pelo cilindro da lança, sendo assim, com base nos resultados evidenciados para a força máxima aplicada pelo implemento é necessário somar vetorialmente as forças encontradas, resultando em um somatório de 1074,5 kN.

Com auxílio de um software CAD, é possível determinar o ângulo que há entre o Vetor F_b e F_s , sendo este ângulo de aproximadamente de 35,6°.

$$F_y = 1074,5 * \sin 35,6 \rightarrow F_y = 625,49 \text{ kN} \quad (9)$$

$$F_x = 1074,5 * \cos 35,6 \rightarrow F_x = 873,67 \text{ kN} \quad (10)$$

Figura 45- Vetores das Forças de escavação



Fonte -(ABEBE et al., 2024)

É importante salientar que essas forças são resultantes de uma análise estática, contudo, há carregamento e descarregamento, e, portanto, é evidente o surgimento no sistema estudado, acelerações, impulsos, durante a operação real do equipamento, entre outros fenômenos físicos que são responsáveis pelo surgimento de forças adicionais, ficando claro a necessidade de avaliar a vida útil do equipamento relacionando tensões e ciclos.

2.7. Tensões admissíveis

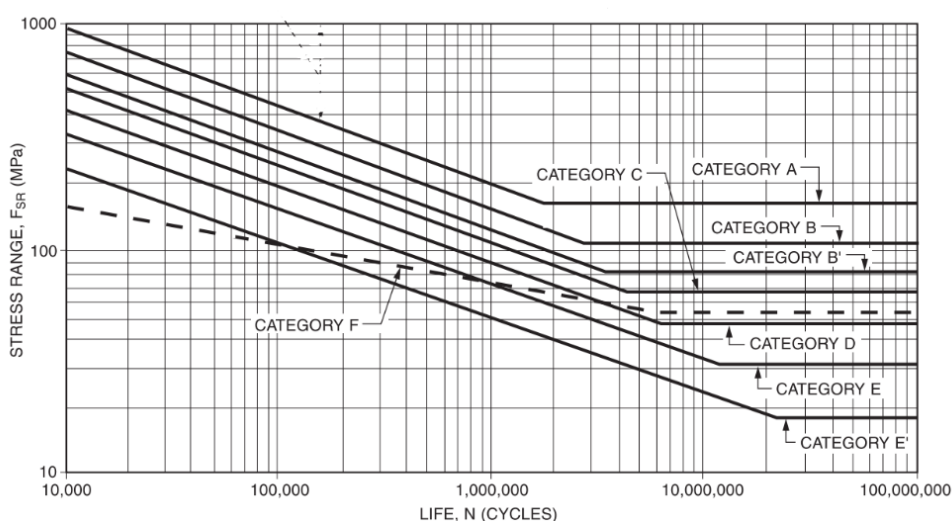
A norma amplamente aplicada no setor de fabricação de implementos é a AWS D14.3 (*Specification for Welding Earthmoving and Construction Equipment*), sendo a D1.1, a norma mais adequada para avaliação e se necessário o dimensionamento dos cordões de solda, o que não é abordado ou especificado na D14.3.

Para o equipamento em estudo, é necessária uma garantia mínima de 3.000 horas de operação, exigida por mineradoras, por meio de documentos disponibilizados durante a formalização de contratos, contudo, essas horas contemplam locomoção para ida e retorno da cava, paradas entre carregamentos de caminhões, entre outras atividades que não sejam de escavação.

Com base nas informações de ciclo hidráulico da escavadeira disponibilizada na Tabela 8, o equipamento executa um ciclo completo de avanço mais recuo de todos os cilindros em aproximadamente 10 segundos, ou seja, supondo que a máquina opere ininterruptamente por 24 horas, o que não é plausível, o equipamento executaria 8640 ciclos neste intervalo, para uma garantia de 3.000 horas líquidas de trabalho, o equipamento executaria 1 milhão e 80 mil ciclos (1.080.000), número que será considerado para o cálculo.

Porém, para a avaliação estrutural do implemento, será avaliada a classe da junta soldada e a respectiva tensão admissível para os ciclos definidos acima, com base no Gráfico 1, exposto no código da AWS D1.1 2020 seção 2:

Gráfico 1-Relação entre Ciclos de vida e tensão admissível para diferentes categorias de uniões soldadas



Fonte - (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020)

Em análise da tabela exposta e do implemento fornecido é possível determinar a classe das juntas dos componentes, onde é possível visualizar que para as juntas da categoria C deve haver uma tensão de no máximo 109,74 MPa para $1,08 \times 10^6$ de ciclos.

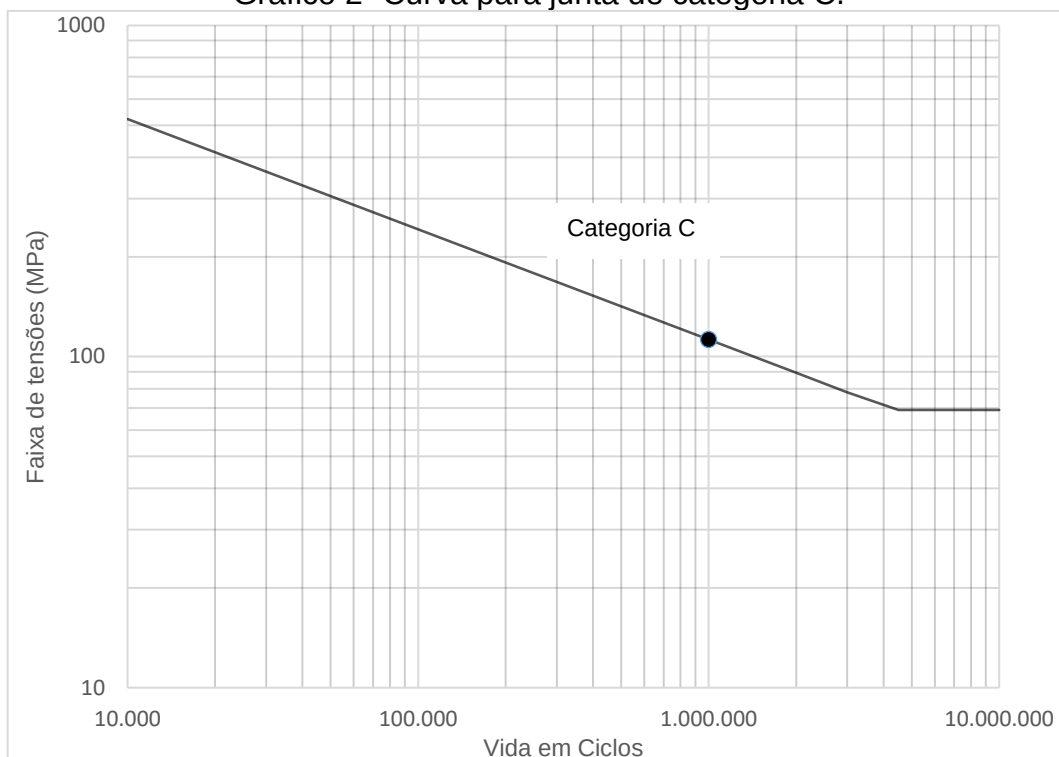
Tabela 13-Tensões admissíveis regiões críticas da caçamba escavadeira em relação a classe da junta.

Regiões unidas	Classe AWS	Tensão admissível para 1×10^6 ciclos (MPa)
Viga + Alça	C	109,74
Viga + Reforço		
Reforço + borda		

Fonte- Do autor

De modo a simplificar a visualização das informações do Gráfico 1, construiu-se o Gráfico 2, contendo apenas as curvas pertinentes para avaliação do implemento e as indicações das tensões de cada categoria para a quantidade de ciclos estipulada anteriormente.

Gráfico 2- Curva para junta de categoria C.



Fonte- Do autor

2.8. Avaliação da resistência à fadiga das principais juntas estruturais soldadas do implemento

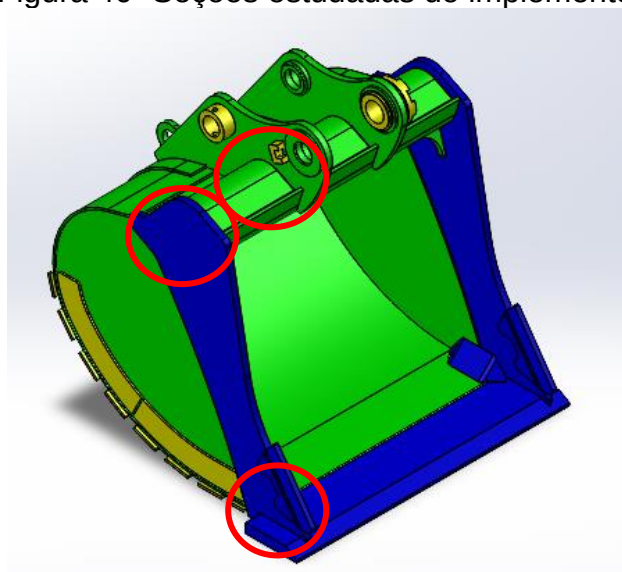
Para este trabalho, adotou-se a filosofia de avaliação das juntas soldadas sobre o método das tensões admissíveis e com base nas forças decompostas anteriormente é perceptível que surge na estrutura do implemento tensões cisalhantes primárias, bem como secundárias.

$$\tau' = \frac{F}{A} \quad (11)$$

$$\tau'' = \frac{M * r}{J} \quad (12)$$

As juntas analisadas serão das seguintes secções do implemento, conforme apontados na figura 48, sendo as regiões do reforço e borda, reforço e viga, alça e viga, regiões estruturalmente críticas de um equipamento de escavação.

Figura 46- Seções estudadas do implemento.

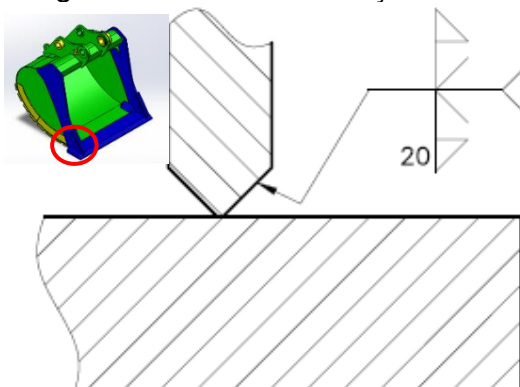


Fonte – Cortesia Britaço

2.8.1. Junta da Borda e reforço

Analisando a Junta compreendida entre borda e reforço é observado que as tensões atuantes na região, por simetria do implemento, são iguais a 537,25KN.

Figura 47-Junta do reforço e borda.



Fonte – Britaço.

As propriedades tanto da secção soldada quanto do reforço estão na Tabela 14 e serão de suma importância para os cálculos das tensões a que os elementos estão submetidos.

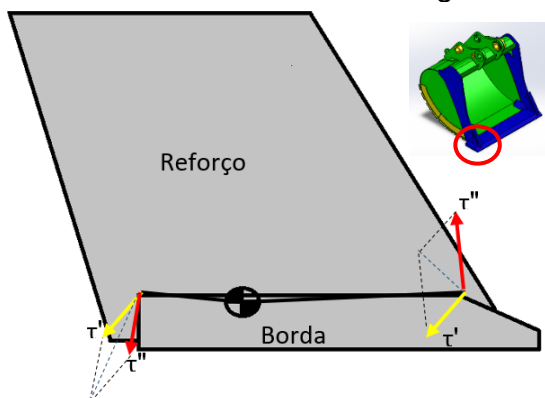
Tabela 14-Propriedades da secção estudada.

		Reforço	Solda
Área (mm ²)		10706,1	21946,1
Momento de inércia	ix	70447030,175	144407166,842
	ly	1295090,152	11155220,918
Momento polar de inércia (mm ⁴)	J	71742121,327	155562387,76

Fonte - Do autor.

Com os dados informados é possível calcular as tensões resultantes máximas e determinar a resistência em fadiga da junta do implemento.

Figura 48 - Esquema das tensões atuantes na região entre reforço e borda.



Fonte- Do autor.

Tabela 15-Tensões normais e cisalhantes atuantes.

Tensão	Reforço	Solda
τ' (MPa)	50,18	24,48
τ'' (MPa)	778,54	359,04
Resultante(MPa)	750,43	345,63
Tensão de amplitude (MPa)	375,215	172,815
Ciclos	$27,4036 \times 10^3$	$280,481 \times 10^3$

Fonte - Do autor

Com os resultados de tensão informados na Tabela 15, a tensão atuante na região é de 750MPa, sendo possível visualizar a criticidade da região, pois o reforço resistiria a aproximadamente 30 mil ciclos, enquanto a solda a 300 mil ciclos, resultados inferiores ao esperado contratualmente.

Desta feita, uma sugestão de melhoria para a junta apresentada pela Britaço seria o chanfro assimétrico, tendo como principal objetivo atenuar as concentrações de tensões provenientes do centro do implemento, conforme figura 51 e a aplicação dos procedimentos pós-soldagem apresentados anteriormente.

Figura 49- Fluxo de tensões atuantes na região do reforço e borda do implemento.



Fonte -Do autor.

2.8.2. Junta da Viga e reforço

Analizando a junta compreendida entre reforço e viga, com aplicação de softwares CAD, foi possível calcular os momentos de inércia da secção estudada, conforme tabela a seguir, sabendo que a espessura do material é de 19,05 mm:

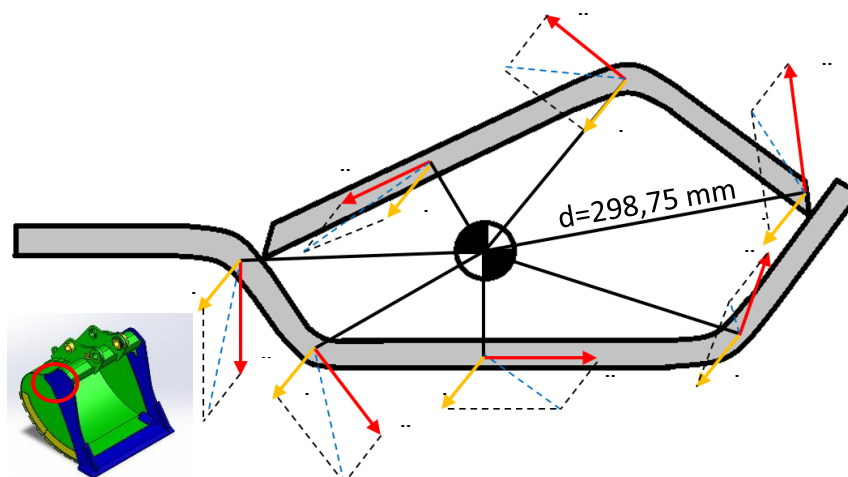
Tabela 16-Propriedades da secção estudada.

		Viga	Solda
Área (mm ²)		28000	51300,08
Momento de inércia (mm ⁴)	I _x	237.309.746,955	537597182,59
	I _y	1.042.799.722,474	2059275315,752
Momento polar de inércia (mm ⁴)	J	1280109469,429	2596872498,342

Fonte - Do autor.

Nesta secção, foi encontrada a maior distância do centroide da viga, com medida de 298,75 mm, conforme demonstrado na figura 52:

Figura 50 – Apresentação das tensões cisalhantes primárias e secundárias.



Fonte- Do Autor.

A distância do centroide da região até o ponto de aplicação de força é de 1720,93 mm (Distância da borda até o centro da secção analisada), com isso, é possível determinar a tensão cisalhante primária e secundária máxima agindo no ponto mais distante do centro tendo como a resultante obtida através da regra do paralelogramo. Os resultados foram disponibilizados conforme Tabela 15:

Tabela 17-Tensões normais e cisalhantes atuantes e os respectivos ciclos.

Tensão	Reforço	Solda
τ' (MPa)	19,14	10,47
τ'' (MPa)	205,11	106,36
Resultante(MPa)	201,25	104,27
Tensão de amplitude (MPa)	100,625	52,135
Ciclos	$1.420,793 \times 10^3$	$10.215,519 \times 10^3$

Fonte - Do autor.

Conclui-se destes resultados que a região da solda resistiria a mais de um milhão de ciclos, enquanto a região do metal base resistiria a menos de duzentos mil ciclos.

2.8.3. Junta da alça e viga

Na Região compreendida entre a viga e alça o procedimento a ser executado para obtenção de dados sobre as propriedades da região da solda, conforme tabela 16, para uma perna de solda de 30 mm é igual aos procedimentos anteriores.

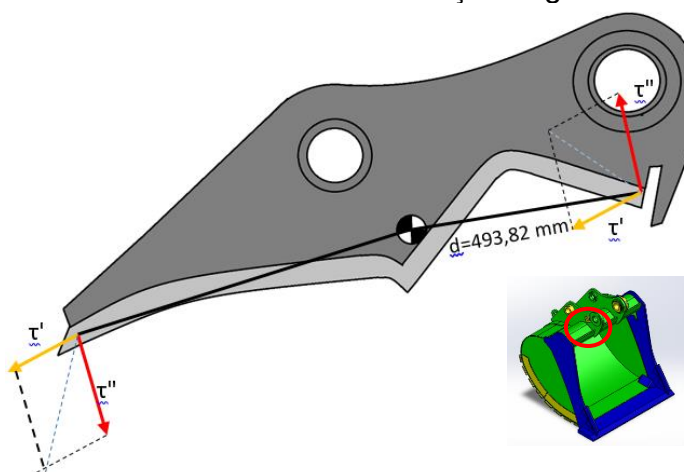
Tabela 18-Propriedades da secção estudada.

Solda			
Área (mm ²)			34.451,362
Momento de inércia (mm ⁴)	I _x		49807573,395
	I _y		3050091045,390
Momento polar de inércia (mm ⁴)	J		3099898618,784

Fonte - Do autor.

A tensão de tração máxima se encontra no início da solda, com distância de 493,82 mm do centroide da solda, enquanto a compressão máxima ocorre ao fim da solda, nos moldes da figura 53:

Figura 51- Representação do ponto de tensão normal e compressiva máxima atuando na solda da alça e viga.



Fonte- Do Autor.

A distância do centroide da solda até o ponto de aplicação da força é de 1872,131 mm. Com este dado é possível determinar o valor das tensões atuantes na região, conforme disposto na Tabela 19:

Tabela 19-Tensões normais e cisalhantes atuantes e os respectivos ciclos.

Tensão	Solda
τ' (MPa)	15,59
τ'' (MPa)	160,22
Resultante(MPa)	155,58
Tensão de amplitude (MPa)	77,5
Ciclos	$7.500,504 \times 10^6$

Fonte - Do autor.

Esta região atende os requisitos contratuais e os supera, porquanto a resistência à fadiga é de aproximadamente 7 vezes a prevista não sendo necessário nenhuma intervenção importante após a soldagem.

2.9. Avaliação da tensão admissível do metal de adição.

Mesmo avaliando a resistência à fadiga de uma junta não é dispensável avaliar as tensões admissíveis para o metal de adição e determinar qual classe é mais apropriada para cada região.

Os eletrodos destinados ao processo de soldagem anteriormente selecionado são da Classe AWS A5.28, de acordo Tabela 20:

Tabela 20- Classificação dos Eletrodos GMAW e respectiva resistência mecânica.

Classe AWS	Consumível	Resistência (MPa)
AWS A5.28	ER70S-X	482,63
	ER80S-X	551,58
	ER90S-X	620,53
	ER100S-X	689,48
	ER110S-X	758,42

Fonte - Do autor.

A AWS D1.1 2020 apresenta no capítulo 4 as tensões admissíveis recomendadas, normais, cisalhantes e compressivas para cada classe de eletrodo

consumível com base na penetração do metal de adição no metal base, sendo os mais comuns aplicados Partial Joint Penetration (PJP) e Complete Joint Penetration (CJP).

Tabela 21- Tensão admissível para soldas de penetração parcial (PJP).

Consumível	Tensão Cisalhante admissível	Tensão normal admissível
ER70S-X	144,78	434,367
ER80S-X	165,47	496,42
ER90S-X	186,159	558,47
ER100S-X	206,844	620,53
ER110S-X	227,52	682,57

Fonte - Do autor

Tabela 22- Tensão admissível para soldas de penetração total (CJP).

Consumível	Tensão Cisalhante admissível	Tensão normal admissível
ER70S-X	144,78	482,63
ER80S-X	165,47	551,58
ER90S-X	186,159	620,53
ER100S-X	206,844	689,48
ER110S-X	227,52	758,42

Fonte - Do autor

Verifica-se que com base nestas informações e resultados calculados anteriormente, na região compreendida entre a viga e reforço, atua uma tensão cisalhante máxima de 201,25 Mpa, conforme tabela 17, sendo a junta classificada como de penetração total. O recomendado é aplicar o eletrodo ER110S-X.

De modo diverso, na região do reforço e borda, atua uma tensão normal máxima na solda de 750MPa, local onde é encontrada uma junta de penetração total, indicando a aplicação do ER110S-X

E a última região analisada, a junta compreendida entre alça e viga, é uma junta de penetração parcial e dentre todas as juntas analisadas, apresenta a menor tensão atuante, superando em 7 vezes os ciclos determinados contratualmente, devido a tensão cisalhante no local ser de 155,58 MPa, podendo ser aplicado nesta região eletrodos com resistência igual ou superior ao ER80S-X

3. Resultados e discussões

No que tange a processos, foi elaborada a Tabela 21, na qual é informado todos os parâmetros a serem adotados na fabricação do implemento, contudo, qualquer mudança de material ou insumos para a soldagem, como gás de proteção etc., deve ser feita revisão de todos os parâmetros.

Tabela 23 – Processo, Parâmetros, técnicas e materiais selecionados para a confecção do implemento.

	Processo de Soldagem	
	GMAW	
Soldagem	Metal de adição	Diâmetro Ø 1,2 mm Especificação ER110S-X ER80S-X
	Gás de proteção	Ar 5%O ₂
	Polaridade	Eletrodo positivo
	Tensão	26 -28 V
	Corrente	≤200 A
	Técnica operatória	Puxado / Avante
	Sequência de soldagem	Progressão de ré
	Reforço do cordão de solda em juntas de topo (h)	0 mm
Metal base	Estrutural	Quend 700
	AR (Material de desgaste)	Creusabro Relia 450
Temperatura de soldagem	Pré-aquecimento	Depende da espessura
	Temperatura de interpasse	Depende da espessura
Processamento Pós soldagem	Técnica	Martelamento (Hammer Peened) /Jateamento

Fonte – Do Autor.

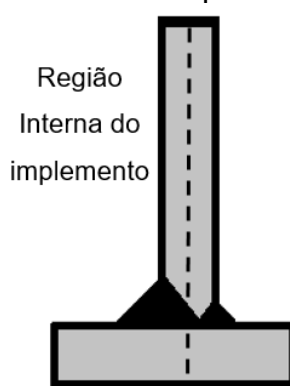
No processamento pós-soldagem, a aplicação de Martelamento pode ser aplicada em região crítica, como a região compreendida entre a borda e o reforço.

Para as demais uniões soldadas, o tratamento superficial através do **Shot Peening** (Jateamento de esferas) pode ser aplicado nas demais uniões soldadas para a agilidade e redução de custos operacionais, em decorrência da velocidade de execução.

Sobre o implemento estudado fez-se algumas sugestões de melhoria do projeto das uniões soldadas de pontos críticos do implemento com o objetivo de minimizar a propensão a falhas durante a operação, conforme exposto adiante.

A região da borda e reforço é a região mais crítica do implemento a melhor alternativa para atenuar a fadiga é o aumento da área soldada, contudo, aplicando a técnica do martelamento no contorno da solda, é possível aumentar a longevidade do implemento apenas com essa ação, conforme apresentado na figura 37. Ademais, uma segunda sugestão, diz respeito a uma mudança simples no chanfro do reforço, que pode ser significativa para aumentar a disponibilidade do implemento, em razão da redução da concentração de tensão em decorrência da mudança branda de forma da solda, nos termos da figura 54:

Figura 52 - Proposta de novo chanfro para região da borda e reforço.

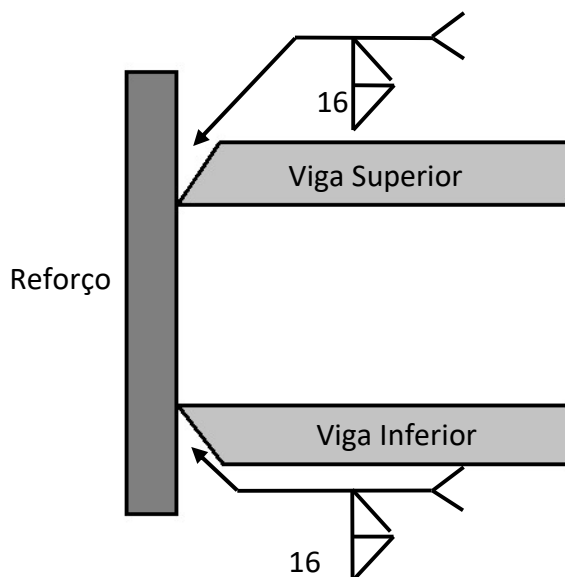


Fonte – Do Autor.

Sobre a região do reforço e viga é apresentada uma ilustração que sugere uma mudança, não em virtude das tensões cisalhantes, mas em razão da redução de etapas de produção. Sendo sugerido a soldagem totalmente externa, conforme a figura 55, e não dos dois lados de cada componente, como é proposto pelo projeto cedido, sendo necessário 2 processos de montagem, permitindo com a mudança a

montagem dos dois componentes em apenas um processo juntamente a alça eliminando desperdícios produtivos.

Figura 53-Proposta de junta.



Fonte - Do autor.

No que se refere a região da viga e alça não é necessária nenhuma sugestão de mudança, tendo em vista a longevidade estimada para a região.

4. Conclusão

Para o engenheiro especialista em soldagem, é de grande importância saber analisar e avaliar as cargas provenientes da operação para garantir a resistência estática e de fadiga das uniões soldadas. A escolha adequada de materiais, processos, parâmetros e técnicas é essencial para otimizar custos e aumentar a durabilidade do produto.

Este estudo mostra que, embora os aços AR tenham boa resistência à tração, não são recomendados para componentes estruturais devido à formação de grãos grosseiros na zona afetada pelo calor (ZTA) após a soldagem, o que reduz a dureza e a resistência à tração, tornando essa área propensa à falha sob esforço mecânico.

Minimizar a ZTA é fundamental, e a seleção cuidadosa dos parâmetros de soldagem, gás de proteção e arame é crucial. O processo GMAW (MIG/MAG) foi escolhido pela alta taxa de deposição, e o arame de Ø 1,2 mm foi selecionado por equilibrar corrente e taxa de deposição. O gás Ar-2%O₂ foi escolhido por reduzir a energia de soldagem, minimizando danos térmicos ao metal base. Para soldagens sobre cabeça, a operação com curto-circuito pode ser ajustada apenas pela corrente.

A sequência de soldagem, que controla tensões residuais e distorções, é essencial para reduzir os efeitos da fadiga. A sequência com progressão de ré é a mais eficaz para distribuir as tensões residuais, aumentando a vida útil do implemento.

A escolha do eletrodo de alta resistência é crucial. Embora o ER110S-X, conforme a AWS D1.1, pareça ideal para mitigar os efeitos da fadiga, as equações de tensão indicam que, para aumentar a resistência à fadiga, o que realmente importa é o aumento da área resistente, e não a resistência mecânica do metal de adição. Assim, a seleção do eletrodo deve ser baseada nas tensões máximas calculadas para cada região do componente, priorizando o incremento da área resistente.

A região entre o reforço e a borda da junta é particularmente crítica e exige cuidados especiais durante a execução da soldagem. De acordo com os cálculos, essa junta não atinge 1 milhão de ciclos, mas cerca de 27 mil ciclos. Aumentar a área do reforço poderia ampliar esse número, mas é importante destacar que essa área sofre desgaste abrasivo intenso devido à constante troca de componentes, como bordas e seções do reforço. Isso torna desnecessário um número excessivo de ciclos para garantir a funcionalidade do implemento. Para essa região crítica, foi recomendada a utilização de uma junta de ângulo assimétrica, que suaviza a transição do fluxo de tensões, reduzindo os concentradores de tensão e, assim, moderando os efeitos da fadiga.

Para a região compreendida entre reforço e viga, foi proposto uma junta que elimina processos e ainda colabora para o aumento da vida útil do equipamento quando comparado ao projeto original Britaço.

Para garantir a longevidade do implemento, é essencial que o operador evite escavar apenas com um dos lados, pois isso pode comprometer a vida útil e isentar o fabricante de responsabilidades por reparos.

Embora todos os cálculos tenham sido realizados, a validação do projeto em software de elementos finitos continua essencial. No entanto, é fundamental que os resultados obtidos no software sejam próximos, se não idênticos, aos apresentados neste trabalho. Alinhado com a filosofia de Avelino Alves Filho, cito: "Se o engenheiro não sabe modelar o problema sem ter o computador, ele não deve fazer tendo o computador" (AVELINO ALVES FILHO, 2005, prefácio).

Apesar de seguir toda a literatura, é imprescindível preparar e avaliar um corpo de prova, que deve passar por ensaios destrutivos e não destrutivos para validar a teoria. Esse processo visa garantir a qualidade da EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) e do subsequente RQPS (Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem), assegurando, assim, o desempenho do implemento em operação.

Por fim, caso haja divergências significativas nos resultados, é necessária a revisão completa de todos os cálculos apresentados neste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

ABEBE, Misganaw; CHO, Yonggeun; HAN, Seung Chul; KOO, Bonyong. Mitigating Measurement Inaccuracies in Digital Twins of Construction Machinery through Multi-Objective Optimization. Gunsan, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3347>.

AMERICAN WELDING SOCIETY (ORG.). **Welding Handbook - Welding Science and Technology- Volume 1**. 1ª ed. Miami, FL: American Welding Society, 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Structural Welding Code— Steel D1.1. *In*: (American Welding Society, Org.) 2020, United States. **Anais [...]**. United States: American Welding Society, 2020. p. 621.

AVELINO ALVES FILHO, Prof. Dr. **Elementos Finitos A base da tecnologia CAE/Análise Dinâmica**. 6ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2005.

AWS. **Welding Handbook -WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY**. 9ª ed. Miami, FL: American Welding Society, 2001. v. 1

BRACARENSE, ALEXANDRE QUEIROZ MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José. **SOLDAGEM - FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA - COLEÇÃO DIDÁTICA**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. Disponível em: <http://www.martinsfontespaulista.com.br/soldagem-fundamentos-e-tecnologia-colecao-didatica-290799.aspx/p>.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma introdução**. 8ª ed. New York: Jhon Willey & Sons LTD., 2010.

DIN. Recommendations for welding of metallic materials- EN1011-2. *In*: (Deutshes Institute Fur Normung, Org.) 2001, Berlin- Alemanha. **Anais [...]**. Berlin- Alemanha p. 56.

KOBELCO. **O ABC da soldadura por arco**. [s.d.]. Disponível em: https://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC_2006-03.html.

KOMATSU. **Manual de Oficina Komatsu**. JapãoKomatsu, , 2018.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2ª ed. New Jersey: Jonh Willey & Sons, 2002.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. 1ª ed. Belo Horizonte: Paulo José Modenesi, 2021.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução a metarlugia da soldagem**. 1ª ed. Belo Horizonte: Paulo José Modenesi, Paulo Villani Marques, Dagoberto B. Santos, 2012.

MODENESI, Paulo José.; MARQUES, Paulo Villani. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo HorizontePaulo José Modenesi, Paulo Villani Marques, , 2022.

MODENESI, Paulo José. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo HorizontePaulo José Modenesi., , 2011.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982.

PAULO J. MODENESI. **Introdução à Física do Arco Elétrico**. 1ª ed. Belo Horizonte: Paulo José Modenesi, 2012.

PJ HAAGENSEN E SJ MADDOX. **IIW Recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joint**. 1ª ed. Sawston- Cambridge: International Instititu of Welding, 2013.

RAPTOR. **Caçamba CAT-7495**. 2021. Disponível em: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6757409688322641920/>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SSAB. **Tipos e tamanhos de baldes**. 2024a. Disponível em: <https://www.ssab.com/en/support/how-to-design/bucket-design/bucket-types-and-bucket-sizes>. Acesso em: 23 jul. 2024.

SSAB. **Pegada de Carbono**. 2024b. Disponível em:

<https://www.ssab.com/en/support/how-to-design/bucket-design/carbon-footprint>.

Acesso em: 23 jul. 2024.

SSAB - WELDING HANDBOOK A GUIDE TO BETTER WELDING OF HARDOX AND STRENX. **Welding Handbook A Guide To Better Welding Of Hardox And Strenx**. Second Edi ed. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://www.ssab.com/-/media/Handbooks/Welding Handbook/ssab-welding-handbook-ed2.pdf](https://www.ssab.com/-/media/Handbooks/Welding%20Handbook/ssab-welding-handbook-ed2.pdf).

WAINER, Emílio.; DUARTE BRANDI, Sérgio; DÉCOURT HOMEM DE MELLO, Fábio. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blusher LTDA., 2004.

WEIR- ESCO. Báscula Esco Ultralight. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=152997839573577&set=pb.100057406991328.-2207520000>.

WEIR- ESCO. **Materiais de desgaste Esco para carregadeiras de mineração**. 2024a. Disponível em: <https://www.global.weir/pt-BR/product-catalogue/surface-mining-wear-parts/wheel-loader/esco-wear-materials-for-mining-wheel-loaders/>. Acesso em: 27 jul. 2024.

WEIR- ESCO. **Carrocerias de Caminhão ESCO**. 2024b. Disponível em: <https://www.global.weir/pt-BR/product-catalogue/haul-truck-bodies/esco-ultralight-truck-bodies/>. Acesso em: 27 jul. 2024.