

**Avaliação das técnicas de soldagem com e sem tecimento aplicadas no reparo de
trincas em escavadeiras hidráulicas.**

Autores: Leonardo Viana Dias

William Faggioni

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Modenesi

Belo Horizonte

2018

Leonardo Viana Dias

William Faggioni

**Avaliação das técnicas de soldagem com e sem tecimento aplicadas no reparo de
trincas em escavadeiras hidráulicas.**

Monografia apresentada ao curso de
Especialização de Engenharia de Soldagem,
como requisito parcial para obtenção do
grau de especialista em soldagem.

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Belo Horizonte

2018

Leonardo Viana Dias

William Faggioni

**Avaliação das técnicas de soldagem com e sem tecimento aplicadas no reparo de
trincas em escavadeiras hidráulicas.**

Monografia apresentada ao curso de
Especialização de Engenharia de Soldagem,
como requisito parcial para obtenção do grau
de especialista em soldagem.

Aprovados em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo José Modenesi

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense

Prof. Dr. Silvério Ferreira da Silva Júnior

Prof. MSc. Marcelo Teodoro Assunção

Agradecimentos

Agradecemos ao professor orientador Paulo Modenesi, pela oportunidade de sermos orientados por ele, que é um profissional admirável em aspectos acadêmicos, profissionais e pessoais.

Também somos gratos ao professor Alexandre Bracarense, que nos acompanhou durante todo o curso, e que certamente nos acompanhará por toda nossas carreiras na área da soldagem.

É importante também agradecer às famílias e amigos, pela compreensão, apoio e estrutura, em especial Moara que ajudou na escrita e desenvolvimento de partes do trabalho.

Por fim, agradecemos a Deus, por nos dar capacidade, tranquilidade, sapiência, saúde e demais condições para levarmos esses bons anos adiante, com força suficiente para não desistirmos.

RESUMO

A soldagem é um processo de união presente na maioria dos setores industriais, atuando tanto na produção quanto na manutenção de peças/equipamentos, dadas sua versatilidade e praticidade de execução. Processos de soldagem aplicados na manutenção de escavadeiras hidráulicas possibilitam aumentar a vida útil do equipamento, economizar custos e evitar paradas. Alguns fabricantes recomendam para a manutenção de escavadeiras o uso da técnica operatória de tecimento, enquanto outros recomendam que os cordões sejam feitos de forma filetada, gerando dúvidas sobre qual técnica executar em termos de produtividade, custos e propriedades resultantes. Nesse trabalho foram feitos procedimentos de soldagem em chapas ASTM A36, utilizadas em braços de escavadeiras hidráulicas, realizando enchimento de chanfros em V por técnicas de soldagem com e sem tecimento. Na soldagem com tecimento, menos passes foram necessários e menos material foi depositado para realizar o enchimento do chanfro, tornando essa técnica mais eficiente do que a filetada. A microestrutura formada e a dureza dos conjuntos soldados encontradas no trabalho foram similares para ambas as técnicas, sendo as zonas fundida e termicamente afetada as de maior dureza em decorrência do resfriamento relativamente rápido na soldagem e da presença de ferrita acicular. As dimensões transversais das diferentes regiões da solda foram estimadas pelo modelo de Rosenthal, e depois confirmadas por medições realizadas após a soldagem. Foram encontrados maiores valores para a soldagem com tecimento. Como uma extensão maior de zona termicamente afetada atua alterando a microestrutura e aliviando tensões de cordões anteriores em enchimento multicamadas, concluiu-se que o melhor seria realizar o enchimento pela técnica de tecimento, e o acabamento de forma filetada.

Palavras-chave: Soldagem de Manutenção, Elaboração de Procedimento de Soldagem, Técnica de Soldagem, Escavadeira.

ABSTRACT

Welding is a joining process of materials of great versatility and easy operation. It is used in most industrial sectors, for both equipment fabrication and their maintenance. Welding processes in the maintenance of hydraulic excavators allow increasing equipment's life, avoiding stops and saving costs. Some producers recommend the use of weaved beads while others prefer stringer beads for maintenance of excavators, creating doubts about which operation is the best considering productivity, costs, and final properties. In this work, ASTM A36 plates used in excavators' arms were welded using different procedures (waving and not-waving) to fill V-grooves. The microstructure of the weld and the hardness profile of the joints were similar for both techniques. Both the fusion (FZ) and the heat-affected (HAZ) zones presented a higher hardness than the base metal due to the high cooling rate and the presence of acicular ferrite. Weaving allowed shorter welding times than stringer beads since that technique required less welding passes to fill the groove. This implied in different weld regions sizes with weaving producing thicker HAZ and larger FZ. The comparison between welds extension was simulated by Rosenthal equation and confirmed by measurements in weld macrographs. In multi-pass welding, the as-welded zone of the weld metal of a previous pass undergoes reheating during a succeeding pass. Hence, an extended HAZ implies in greater stress relief of the weld, what is beneficial for the process. Therefore, it is concluded that the more appropriate practice is filling the groove weaving and using stringer beads for the final passes.

Key-words: Maintenance Welding, Welding Procedure, Welding Technique, Excavator.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Escavadeiras	4
3.1.1. Condições e problemas de serviço	6
3.2 Inspeção	7
3.2. Metalurgia dos aços	9
3.2.1. Soldabilidade dos aços	12
3.3. Parâmetros de Soldagem e seus Efeitos	12
3.3.1. Corrente (I)	12
3.3.2. Tensão (U)	13
3.3.3. Velocidade de Soldagem (v)	13
3.3.4. Aporte térmico (Q)	14
3.4. Ciclo Térmico de Soldagem	14
3.4.1. Modelo teórico para previsão do ciclo térmico de soldagem (Rosenthal)	15
3.4. Regiões de uma junta soldada	17
3.4.1. Zona Fundida (ZF)	17
3.4.2. Zona Termicamente Afetada	17
3.4.3. Metal de Base	19
3.5 Soldagem de Manutenção	19
3.5.1 – Soldagem FCAW	21
3.6. Defeitos de Soldagem	22
3.6.1 - Grupo 1: Trincas	22
3.6.2 - Grupo 2: Cavidades: Porosidade	23
3.6.3 - Grupo 3: Inclusões Sólidas	23
3.6.4 - Grupo 4: Falta de fusão e penetração	24
3.6.5 - Grupo 5: Imperfeições de forma e dimensão	24
3.7 Especificação de Procedimento de Soldagem	25
3.7.1 – Material de Base	26
3.7.2 – Processo de soldagem	26
3.7.3 – Preparação da região	26
3.7.4 – Técnica Operatória	28
3.7.5 – Consumíveis de soldagem	28

3.7.6 – Temperatura de pré-aquecimento, interpasse e pós aquecimento	29
3.7.7 – Parâmetros de soldagem	30
3.7.6 – Ensaio Pós Soldagem.....	30
4 METODOLOGIA	32
4.1 Materiais	32
4.2 Procedimento de Soldagem	33
4.3. Inspeção dos Conjuntos Soldados	35
4.4. Preparo das amostras.....	35
4.4.1. Macrografia das soldas.....	36
4.4.2. Micrografia das soldas.....	37
4.5. Mapeamento de dureza	37
4.6. Modelo teórico do ciclo térmico	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1. Procedimento de Soldagem	40
5.3 Análise Metalográfica.....	42
5.3.1 Macrografia	42
5.3.2 Micrografia	44
5.4 Propriedades Mecânicas	46
5.4.1 Ensaio de Dureza	46
5.5 Análise do Ciclo Térmico de Soldagem	50
5.5.1. Efeito do tecimento.....	50
5.5.2. Efeito do pré-aquecimento.....	51
6 CONCLUSÃO	52
7 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

Lista de Figuras

Figura 1. Primeira patente de uma escavadeira. Fonte: LEOD 1925.	4
Figura 2. Primeira escavadeira totalmente hidráulica fabricada no mundo. Modelo Demag B504. Fonte: HADDOCK, 2007.	5
Figura 3. Escavadeiras com equipamento de trabalho a) Backhoe Attachment e b) Front Shovel Attachment. Fonte: KOMATSU, 2016 MODIFICADO.	5
Figura 4. Simulação de impacto do equipamento de trabalho na rocha e análise por elementos finitos da caçamba. Fonte: Informação de serviço BMJP17-011 – KOMATSU.	6
Figura 5. Simulação e análise da torção por elementos finitos do equipamento de trabalho da escavadeira hidráulica. Fonte: Informação de serviço BMJP17-011 – KOMATSU.	6
Figura 6. Principais pontos de sobrecarga em uma escavadeira hidráulica BHA. Fonte: Informação de serviço BMJP17-011 – KOMATSU.	7
Figura 7. Pontos recomendados para inspeção visual. Fonte: PC2000-8 Manual de operação e manutenção - KPAM043000.	8
Figura 8. Diagrama Ferro Carbono. Fonte: MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012.	9
Figura 9. Curva TTT esquemática de um aço eutetóide. Fonte: COLPAERT, 2008.	11
Figura 10. Mudança no aspecto da zona fundida (mantendo a tensão constante) quando a corrente é: (a) muito baixa; (b) muito elevada; (c) intermediária. Fonte: METALS HANDBOOK, 1993.	13
Figura 11. Mudança no aspecto da zona fundida (mantendo a corrente constante) quando a tensão é: (a) muito baixa; (b) muito elevada. Fonte: Adaptado de METALS HANDBOOK, 1993.	13
Figura 12. Ciclo térmico em soldagem – esquemático. Fonte: CASTRO, 2017.	15
Figura 13. Parâmetros para medida da diluição na seção transversal de uma solda (a) sobre chapa, e (b) de topo. Fonte: MODENESI et al., 2012.	17
Figura 14. Relação das regiões da ZTA com o diagrama de fases. A: GGZTA; B:GFZTA; C:ICZTA+SCZTA. Fonte: MODENESI, 2014.	18
Figura 15. Trinca estável no braço da escavadeira hidráulica. Fonte: Autor.	19
Figura 16. Trinca instável no semibraço da escavadeira hidráulica. Fonte: Autor.	20
Figura 17. Processo de soldagem FCAW.	21
Figura 18. Diferentes posicionamentos de trincas (a) longitudinal; (b) transversal e (c) de cratera.	23
Figura 19. Distribuição de poros ao longo do cordão de solda. Fonte: EN ISO 6520-1:2007.	23
Figura 20. Distribuição de diferentes inclusões sólidas no cordão de solda. Fonte: EN ISO 6520-1:2007.	24
Figura 21. Representação de falta de fusão em cordões de solda. Fonte: EN ISO 6520-1:2007.	24
Figura 22. Localização de mordeduras em conjuntos soldados. Fonte: EN ISO 6520-1:2007.	25
Figura 23. Área retirada de trinca. Fonte: Autor.	27
Figura 24. Técnica para remoção de trincas a) não passantes e b) passantes. Fonte: Autor.	27
Figura 25. Chanfro realizado em peça após remoção de trincas. Fonte: Autor.	27
Figura 26. Sequência de Soldagem. Fonte Autor.	28
Figura 27. Localização da retirada de corpos de prova para ensaios em solda de topo. Fonte: ISO 15614-1.	31
Figura 28. Fluxograma da metodologia usada na monografia.	32

Figura 29. Montagem dos materiais de base.	33
Figura 30. Máquina de solda da ESAB.	34
Figura 31. Termômetro de Infravermelho FLUKE 62 MAX.	34
Figura 32. Metodologia para encontrar ângulo de distorção em decorrência da contração da zona fundida.	35
Figura 33. Posicionamento dos cortes das amostras.	35
Figura 34. Cortadora Metalográfica.	36
Figura 35. Regiões e dimensões levantadas nas macrografias.	36
Figura 36. Microscópio ótico com câmera acoplada.	37
Figura 37. Pontos para análise micrográfica.	37
Figura 38. Descrição dos eixos considerados na equação da temperatura de pico. Fonte: CASTRO 2017.	38
Figura 39. Aspecto Visual Cordões Soldados. a) Com tecimento (C1), b) Com tecimento (C2), c) Filetado (F1), d) Filetado (F2).	40
Figura 40. Ensaio de Líquidos Penetrantes dos diferentes conjuntos soldados a) Com tecimento (C1), b) Com tecimento (C2), c) Filetado (F1), d) Filetado (F2).	41
Figura 41. Distorção no corpo de prova da soldagem filetada. Fenômeno similar aconteceu em todas os conjuntos soldados.	41
Figura 42. Macrografia dos conjuntos soldados. a) Amostra com tecimento (C1-1), b) Amostra com tecimento (C1-2), c) Amostra com tecimento (C2-1), e d) Amostra com tecimento (C2-2).	42
Figura 43. Macrografia dos conjuntos soldados. a) Amostra filetada (F1-1), b) Amostra Filetada (F1- 2), c) Amostra Filetada (F2-1), e d) Amostra Filetada (F2-2).	43
Figura 44. Micrografias com aumento de 200x das regiões do último cordão de solda a) Metal Base, b) Interface Metal Base/ZTA, c) Interface ZTA/ZF, d) Interface ZTA/ZF, e e) Zona Fundida.	45
Figura 45. Micrografias das diferentes regiões de passes intermediários de soldagem. a) aumento de 200x da ZTA revenida, b) aumento de 200x da Zona fundida revenida, c) aumento de 100x da Interface da Zona Fundida revenida e Zona Fundida não revenida.	46
Figura 46. Microdureza Vickers para conjunto soldado com Tecimento C1.	47
Figura 47. Microdureza Vickers para conjunto soldado com Tecimento C2.	47
Figura 48. Microdureza Vickers para conjunto soldado Filetado F1.	48
Figura 49. Microdureza Vickers para conjunto soldado Filetada F2.	48
Figura 50. Panorama das regiões onde foram feitos os ensaios de dureza da amostra feita com tecimento “C1” a) 1 mm da superfície, b) 10mm da superfície.	49
Figura 51. Panorama das regiões onde foram feitos os ensaios de dureza da amostra filetada “F2” a) 1 mm da superfície, b) 10 mm da superfície.	49
Figura 52. Simulação por Rosenthal das temperaturas alcançadas utilizando técnica de soldagem a) com tecimento a temperatura ambiente $T = 25^{\circ}\text{C}$, b) com tecimento com pré-aquecimento $T = 165^{\circ}\text{C}$, c) filetado a temperatura ambiente $T = 25^{\circ}\text{C}$, d) filetado com pré-aquecimento $T = 165^{\circ}\text{C}$	50

Lista de Tabelas

Tabela 1. Seleção do processo de soldagem conforme Fábrica 1.	20
Tabela 2. Manipulação da solda	28
Tabela 3. Temperaturas de trabalho permitidas	29
Tabela 4. Composição Química Especificada do Aço ASTM A36	33
Tabela 5. Dados dos processos de soldagem.	40
Tabela 6. Extensões das regiões da seção transversal dos conjuntos soldados.	44
Tabela 7. Extensões das Zonas Fundida	51

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é uma operação fundamental para a indústria, dado que possibilita a manufatura de diferentes componentes, com dimensões e geometrias variadas. Seus variados processos atendem a uma vasta gama de necessidades industriais, podendo ter elevada portabilidade, baixo custo, alta produtividade, ao mesmo tempo que podem atender as demandas de propriedades exigidas pelo mercado.

Dada a sua versatilidade e seus bons resultados, os processos de soldagem são também amplamente usados para manutenção, aumentando a vida útil de peças e equipamentos, de forma rápida e em campo. Em escavadeiras, a presença de uma falha pode ser crítica para o processo produtivo, e a substituição imediata da escavadeira ou de parte do equipamento de trabalho pode ser inviável, sendo a soldagem uma recorrente solução para a manutenção do equipamento, possibilitando inclusive a promoção de melhorias.

As falhas identificadas nos equipamentos de trabalho das escavadeiras são na maioria trincas ocasionadas por fadiga. As trincas encontradas nas escavadeiras de grande porte que trabalham em Mineração são em sua maioria trincas passantes, ou sejam, atravessam toda a espessura do aço, mas quando a trinca é percebida no início, existe chance da mesma não ser passante, facilitando procedimento de reparo, evitando a abertura de janela de visita para a soldagem interna dentro da estrutura.

Para realizar soldagem de manutenção, é necessário o conhecimento do material a ser soldado, da extensão do reparo, da espessura da peça, e das características do local de trabalho, por exemplo, se o local é aberto ou se existe uma proteção contra intempéries e qual a fonte de energia disponível. Baseados nestes parâmetros, normas, procedimentos e técnicas de soldagem mais adequados para o reparo, é possível definir o processo de soldagem, equipamentos e acessórios necessários para o reparo. A correta execução do procedimento de soldagem é essencial para alcançar a efetividade no reparo.

A não utilização do procedimento recomendado de soldagem e não realização de reparo imediatamente podem comprometer a estrutura, podendo levá-la a uma falha catastrófica, o que inviabilizaria a sua recuperação. Desta forma a utilização da instrução técnica de soldagem é fundamental para o reparo.

Em escavadeiras hidráulicas, as recomendações internas de soldagem de manutenção variam dependendo da fábrica do equipamento. Algumas recomendam o uso de técnica operatória de tecimento, outras recomendam que os cordões sejam feitos de forma filetada, gerando dúvidas para os clientes sobre qual técnica executar pensando em termos de produtividade, custos, e propriedades resultantes.

O foco deste trabalho é estudar as diferenças entre as técnicas com e sem tecimento, e identificar situações que possam justificar a sua utilização. Para isso, foram feitas soldagens utilizando chapas de aço ASTM A36, aço usado na fabricação de escavadeiras. O conjunto soldado foi analisado quanto às diferenças de morfologia dos cordões obtidos através de macrografias e micrográfias, e as diferentes propriedades mecânicas alcançadas em cada caso foram avaliadas mediante ensaio de tração e o levantamento do perfil de microdureza Vickers ao longo do cordão, e foi levantando o consumo e o tempo de soldagem durante os diferentes processos. Foram determinadas as diferenças geradas por cada uma das recomendações de soldagem, e averiguou-se as vantagens e desvantagens das diferentes técnicas quanto a aplicação no reparo de braços de escavadeiras hidráulicas.

2 OBJETIVOS

Avaliar os efeitos da aplicação de diferentes recomendações de técnicas de soldagem (com e sem tecimento), simulando a soldagem de reparo de um braço de escavadeira.

Os objetivos específicos são:

- Verificar eventuais diferenças na morfologia do cordão;
- Analisar a microestrutura formada;
- Verificar a ocorrência e magnitude de distorções;
- Avaliar a aplicabilidade de cada técnica e seu custo benefício.
- Avaliar, por meio da equação de Rosenthal, as previsões das temperaturas de pico alcançadas mediante execução das diferentes técnicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Escavadeiras

As escavadeiras hidráulicas são equipamentos amplamente utilizados na mineração, construção, escavação e silvicultura (PATEL; DALWADI, 2011). Na mineração em específico, esses equipamentos são utilizados para realizar escavação, carregamento e transporte nas frentes de lavra. (RACIA, 2016).

A primeira patente de escavadeira moderna surgiu em 1925 feita por John E. Moleod e James D. Cummings (Figura 1) e foi definida como um anexo à tratores para ser utilizado de modo a se mover da superfície do chão até um nível determinado. A ideia era criar um equipamento capaz de encher valas nas quais foram colocadas tubulações. Antes disso existiam outros projetos de escavadeiras, como as de Close (1864) e Steveley e Bishop (1865), que eram puxadas a cavalo, e foram projetos importantes em construções ferroviárias da época.

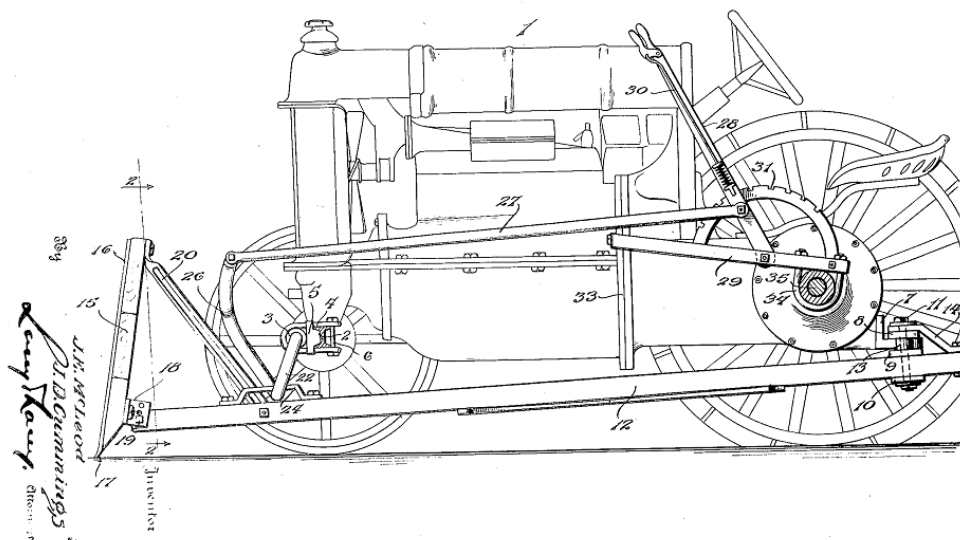


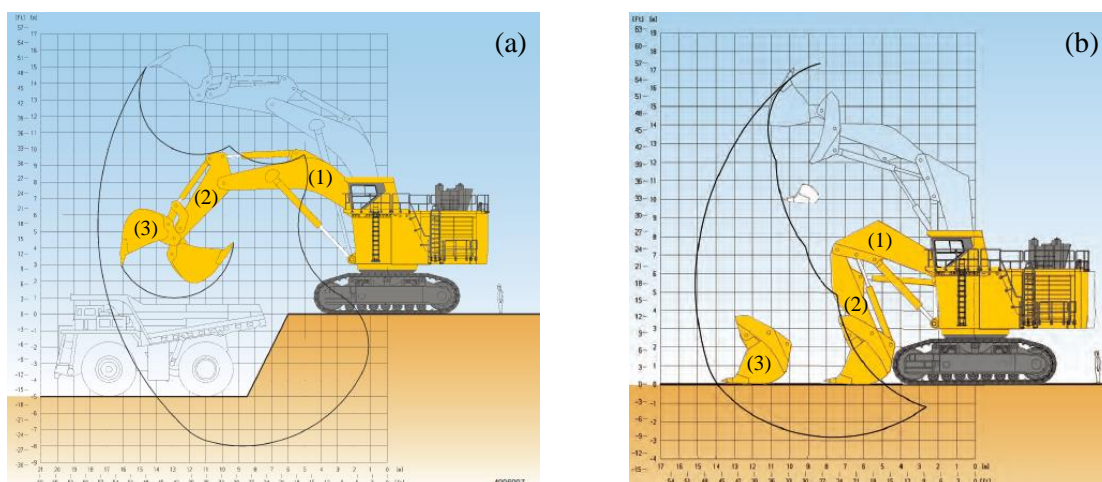
Figura 1. Primeira patente de uma escavadeira. Fonte: LEOD 1925.

A primeira escavadeira totalmente hidráulica foi projetada pela Demag em 1954 (Figura 2). A Demag B504 tinha características avançadas, como a possibilidade de giro de 360°, além da esteira hidráulica com acionamento independente. (HADDOCK, 2007)



Figura 2. Primeira escavadeira totalmente hidráulica fabricada no mundo. Modelo Demag B504. Fonte: HADDOCK, 2007.

Dentre os diversos componentes das escavadeiras modernas, a parte estrutural mais importante para a execução das atividades é o equipamento de trabalho, também conhecido como implemento. O equipamento de trabalho é composto por três partes básicas: (1) Braço (*Boom*), (2) Semibraço (*Stick*) e (3) Caçamba (*Bucket*) (KOMATSU TEN00430-05 2018). O tipo de equipamento de trabalho varia conforme a aplicação da escavadeira, e podem ser do tipo *Backhoe Attachment* (BHA) e *Front Shovel Attachment* (FSA), conforme Figura 3.



(1) Braço; (2) Semibraço ; (2) Caçamba.

Figura 3. Escavadeiras com equipamento de trabalho a) Backhoe Attachment e b) Front Shovel Attachment. Fonte: KOMATSU, 2016 MODIFICADO.

3.1.1. Condições e problemas de serviço

As diferentes partes das estruturas estão sujeitas a corrosão e desgaste devido ao ambiente e as condições de trabalho que a estrutura é submetida (PATEL; DALWADI, 2011). Devido a natureza das operações das escavadeiras, com trabalhos repetitivos, há também a geração de tensões cíclicas, que podem ocasionar danos por fadiga em partes críticas, afetando diretamente a produtividade (PATEL; DALWADI, 2011). Esses danos são agravados com a má utilização do equipamento, como por exemplo a ocorrência de impacto, torção e sobrecarga, acelerando à formação de fissuras na estrutura.

O impacto na escavadeira ocorre em diversas situações como, por exemplo, quando a caçamba se choca contra uma rocha em alta velocidade, gerando tensões na estrutura (Figura 4).

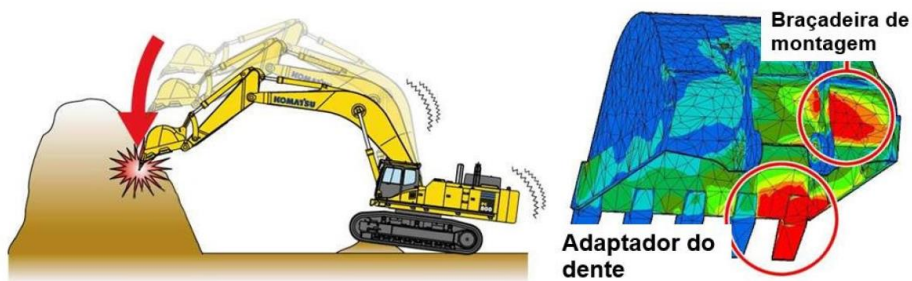


Figura 4. Simulação de impacto do equipamento de trabalho na rocha e análise por elementos finitos da caçamba. Fonte: Informação de serviço BMJP17-011 – KOMATSU.

Já a torção ocorre quando há a utilização do equipamento de trabalho como alavanca, gerando tensões de torção na estrutura (Figura 5).

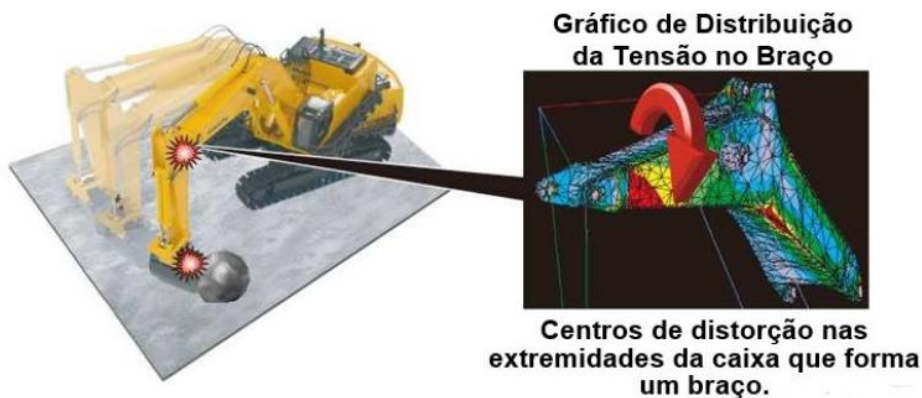


Figura 5. Simulação e análise da torção por elementos finitos do equipamento de trabalho da escavadeira hidráulica. Fonte: Informação de serviço BMJP17-011 – KOMATSU.

Por fim, a sobrecarga em escavadeiras ocorre quando há carga excessiva (acima da capacidade de projeto do equipamento), reduzindo a vida em fadiga do equipamento. Com base em informação de serviço da Komatsu, BMJP17-011, a Figura 6 contém os pontos que são mais solicitados, que são diretamente prejudicados com a sobrecarga.

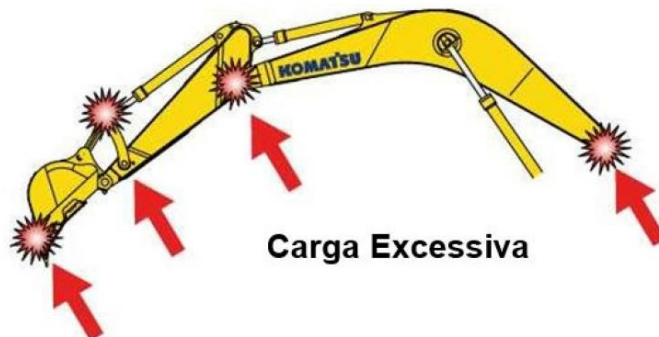


Figura 6. Principais pontos de sobrecarga em uma escavadeira hidráulica BHA. Fonte: Informação de serviço BMJP17-011 – KOMATSU.

3.2 Inspeção

As diferentes partes das estruturas estão sujeitas a corrosão, desgaste, fadiga, e o surgimento de trincas devido ao ambiente e condições de trabalho. Para manter a vida útil estimada da estrutura, ou dar uma sobrevida a ela, é necessário que as não conformidades sejam recuperadas antes que saiam do estado estável para o estado instável, que é catastrófico para qualquer estrutura da escavadeira, com crescimento de trinca na taxa de milímetros por ciclo (HOPPE, 2002).

Para facilitar a identificação de não conformidades na estrutura, é necessária a utilização de ensaios não destrutivos, que são ensaios que não prejudicam o uso posterior dos equipamentos (MODENESI, 2001). Os ensaios não destrutivos mais utilizados na inspeção estrutural de escavadeiras, e que devem ser feitos com periodicidade nos pontos críticos da estrutura, são:

- Inspeção Visual;
- Líquidos Penetrantes;
- Partículas Magnéticas;
- Ultrassom;
- Radiografia.

As regulamentações de diversos países, em conjunto com normas nacionais e internacionais, determinam inspeções e ensaios durante a fabricação e uso de equipamentos que atuam levantando cargas. Vários itens devem ser inspecionados por tempo de operação, ou de serviço (Occupational Safety and Health Branch Labour Department, 2001).

De acordo com o Manual de Operação e Manutenção- KPAM043000 da Komatsu, os pontos críticos da escavadeira, Figura 7, devem ser inspecionados a cada 2000 horas por exame visual. Há fábricas que recomendam também, a cada 4000 horas, que sejam feitos ensaios não destrutivos, como líquidos penetrantes e ultrassom.

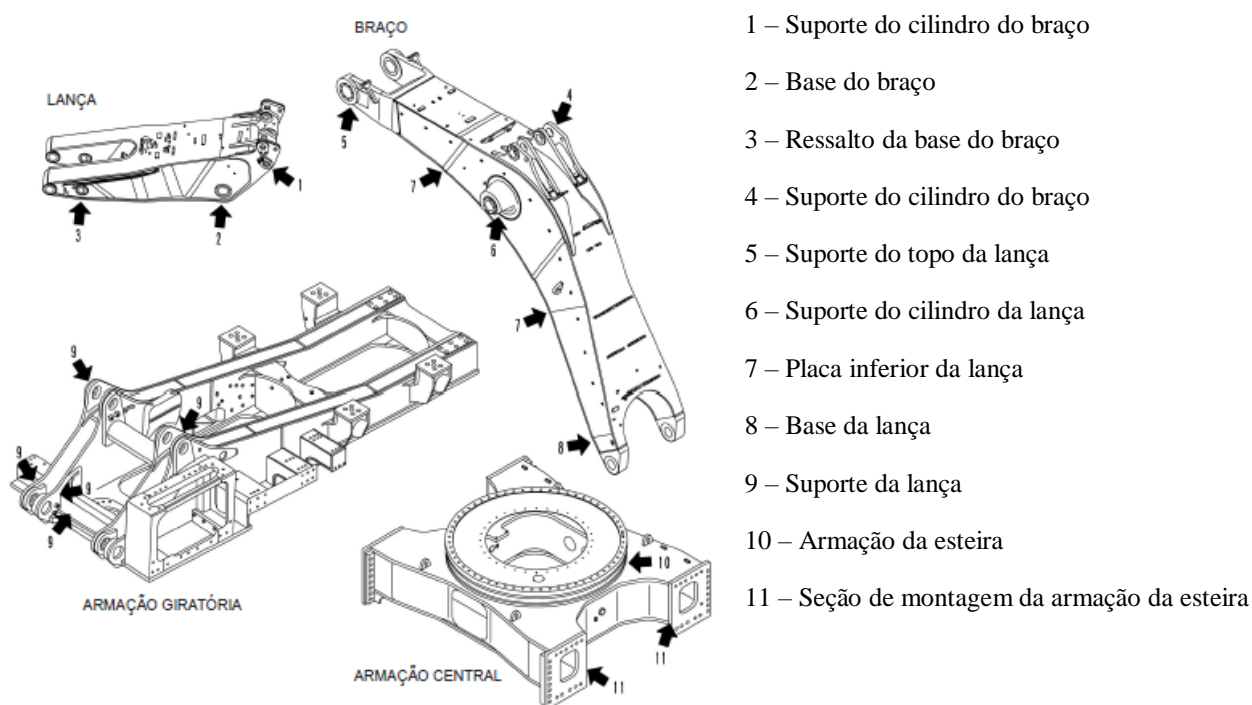


Figura 7. Pontos recomendados para inspeção visual. Fonte: PC2000-8 Manual de operação e manutenção - KPAM043000

As normas utilizadas na realização de inspeções é a alemã CEN/TR 15235 que ajuda a avaliar a significância de imperfeições em qualquer estrutura ou componente soldado em ligas de aço ou alumínio, e a norma EN ISO 5817, que determina um nível de qualidade para imperfeições.

3.2. Metalurgia dos aços

Os aços são ligas de ferro, cujo o principal elemento de liga é o carbono, que pode estar presente até o limite de 2,11%. Dada a alotropia do ferro puro, propriedade que consiste na presença de diferentes arranjos atômicos da rede cristalina com a variação de temperatura, diferentes propriedades mecânicas podem ser obtidas em ligas de mesma composição química, mediante a aplicação de tratamentos térmicos e termomecânicos (CHIAVERINI, 2012).

As diferentes fases do ferro solubilizam diferentes quantidades de carbono (0,0008% na ferrita em temperatura ambiente; 2,11% austenita a 1148°C), além disso, o ferro pode reagir com o carbono, formando carboneto de ferro Fe_3C , conhecido como cementita. Sendo assim, o carbono tem função direta na mudança microestrutural dos aços, e, conseqüentemente nas propriedades mecânicas dos mesmos (CHIAVERINI, 2012).

Dada essa importância do carbono, mesmo que comercialmente os aços possuam outros elementos em sua composição, o principal diagrama estudado para os aços é o diagrama binário Fe-C (Figura 8). Esse diagrama contém as diferentes fases formadas em diferentes temperaturas, dependendo do teor de carbono, considerando uma condição de equilíbrio (CHIAVERINI, 2012).

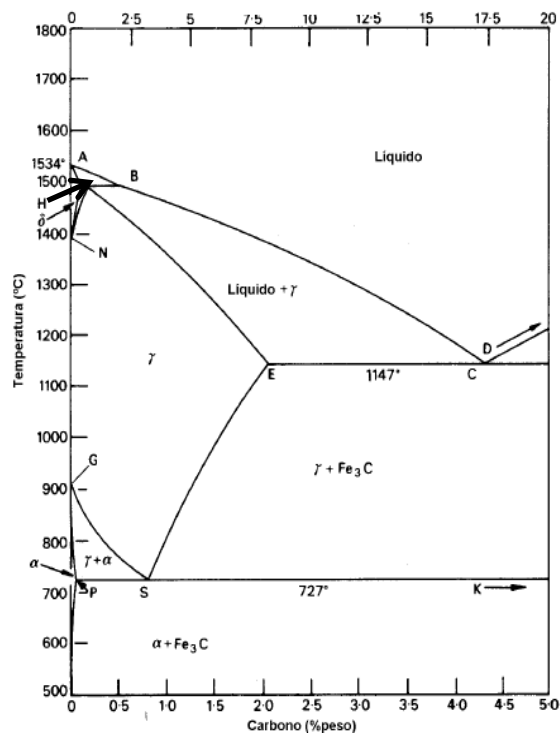


Figura 8. Diagrama Ferro Carbono. Fonte: MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012.

Acima de 2,11% de carbono, a liga passa a ser denominada ferro fundido, que existe com teor de carbono de até 6,67% que é o percentual de carbono da cementita.

O ponto S indicado no diagrama Fe-C é o ponto eutetóide dessa liga, que representa, no resfriamento, a transformação de um sólido (austenita) em dois outros (ferrita e cementita). Pela importância desse ponto em termos das microestruturas que podem ser formadas, os aços podem ser divididos em hipoeutetóides (carbono inferior a 0,77%), eutetóides (carbono em torno de 0,77%) e aços hipereutetóides (carbono acima de 0,77%) (CHIAVERINI, 2012). Esses diferentes aços têm as seguintes microestruturas características:

- Ferrita proeutetóide – Microestrutura presente nos aços hipoeutetóides, cuja a estrutura cristalina é cúbica de corpo centrado (CCC) apresentando boa ductilidade e baixa dureza. Essa microestrutura é formada acima de 727°C, no campo $\gamma + \alpha$, e se mantém estável na temperatura ambiente (CHIAVERINI, 2012; COLPAERT, 2008).
- Cementita proeutetóide – Precipitado de carboneto de ferro (Fe_3C) com estrutura cristalina ortorrômbica presente nos aços hipereutetóides. Apresenta elevada dureza e fragilidade. Essa microestrutura é formada acima de 727°C, no campo $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$, e se mantém estável na temperatura ambiente (CHIAVERINI, 2012; COLPAERT, 2008).
- Perlita – Microestrutura presente nos aços hipoeutetóides, hipereutetóide e eutetóides. Ela é formada por uma base de ferrita com lamelas de cementita, possuindo, portanto, uma maior resistência mecânica devido à cementita presente, e as barreiras a movimentos de discordâncias geradas pelas lamelas intercaladas (CHIAVERINI, 2012; COLPAERT, 2008).

Diferentes temperaturas alcançadas no estado sólido, e diferentes tempos de permanência nas mesmas, ocasionam mudanças estruturais significativas, sendo o fundamento dos tratamentos térmicos. As variações vão do refino ao aumento de tamanho de grão, podendo ocorrer mudanças de espaçamento interlamelar na perlita e diminuição de tensões residuais. Essas alterações afetam diretamente a resistência mecânica, a usinabilidade, a resistência ao desgaste e as propriedades elétricas e magnéticas do material (CHIAVERINI, 2012; COLPAERT, 2008).

Os efeitos do aquecimento na microestrutura dos aços podem ser ainda mais significativos em decorrência da taxa de resfriamento subsequente. Em resfriamentos severos, partindo-se do material na condição austenítica (acima de 727°C), não há tempo para que ocorra as transformações difusionais características da formação da ferrita proeutetóide e da perlita em aços hipoeutetóides. Obtém-se desse modo martensita, formada pela movimentação coordenada dos átomos, sem difusão. A martensita tem estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), sendo supersaturada em carbono, o que lhe confere, em conjunto com o elevado estado de tensões, uma elevada dureza e fragilidade (CHIAVERINI, 2012).

Para avaliar as condições de formação da martensita, podem ser utilizados diagramas de tempo, temperatura e transformação (TTT), conforme exemplificado na Figura 10. Esse diagrama, segundo Colpaert (2008), revela o início e o fim da nucleação e crescimento de diferentes microestruturas em decorrência do tempo em que se permanece a uma dada temperatura, considerando-se o aço previamente austenitizado.

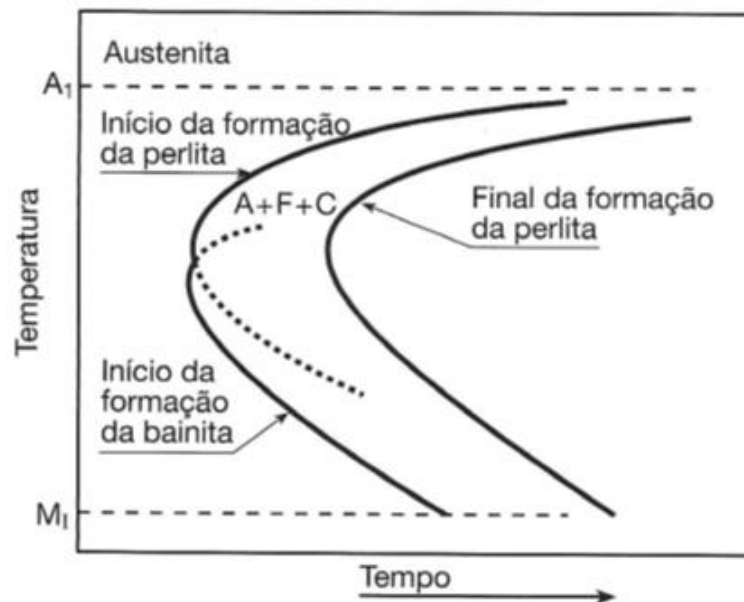


Figura 9. Curva TTT esquemática de um aço eutetóide. Fonte: COLPAERT, 2008.

Altos teores de carbono propiciam a formação de uma martensita mais dura e frágil, pelo aumento da supersaturação de carbono na fase.

3.2.1. Soldabilidade dos aços

O design da junta, o teor de hidrogênio difusivo, a dureza da região afetada termicamente, e as condições de solidificação são alguns dos fatores que devem ser levados em consideração para planejamento da soldagem (DIN EN 1011-2).

Segundo a norma DIN EN 1011-2, dentre outros fatores, o material de base influencia diretamente na formação de trincas por hidrogênio (trinca a frio) em decorrência da possibilidade de formação de microestruturas frágeis. Para evitar que isso ocorra é feito o cálculo de carbono equivalente (Eq. 1), indicando o quão suscetível o material está a essa falha dado sua composição química.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

Com o resultado de CE, medidas podem ser tomadas para minimizar os riscos de formação de microestrutura frágil e, conseqüente, trincas por hidrogênio, dado que carbono equivalente abaixo de 0,40 indica aços com baixa sensibilidade a esse tipo de fissuração (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

3.3. Parâmetros de Soldagem e seus Efeitos

Dentre as variáveis que devem ser controladas em uma operação de soldagem a arco elétrico, podem ser citados a tensão elétrica, a corrente, a velocidade de soldagem, a distância entre o eletrodo e a peça de trabalho, a velocidade de alimentação do arame (para processos com alimentação contínua), o tipo de transferência (para processos que utilizam metais de adição), o ângulo da tocha, entre várias outras.

Essas variáveis, além de influenciar significativamente a geometria e o acabamento do cordão de solda, influenciam as características metalúrgicas da junta e, conseqüentemente, suas propriedades mecânicas.

3.3.1. Corrente (I)

A corrente de soldagem se relaciona diretamente com a quantidade de calor transferida, influenciando diretamente na taxa de deposição de metal de adição. Da mesma forma, esse parâmetro influencia diretamente a penetração da solda, fazendo com que maiores temperaturas sejam alcançadas em regiões mais distantes (MODENESI, 2015;

METALS HANDBOOK, 1993). A Figura 10 ilustra como a variação de corrente de soldagem pode influenciar na morfologia da zona fundida.

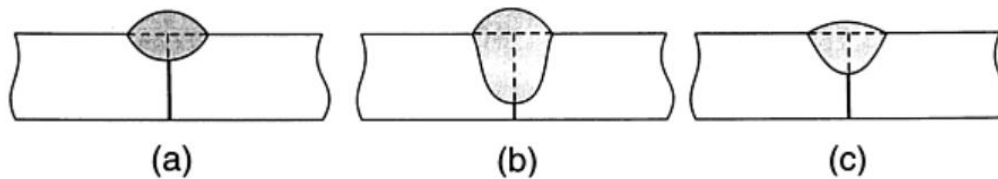


Figura 10. Mudança no aspecto da zona fundida (mantendo a tensão constante) quando a corrente é: (a) muito baixa; (b) muito elevada; (c) intermediária. Fonte: METALS HANDBOOK, 1993

3.3.2. Tensão (U)

A tensão de soldagem tem por sua vez, relação direta com o comprimento do arco, afetando assim a largura do cordão de solda. Tensões maiores resultam em comprimentos maiores de arco, o que aumenta a área da superfície atingida pelo mesmo, gerando cordões mais largos, conforme a Figura 11 (METALS HANDBOOK, 1993).

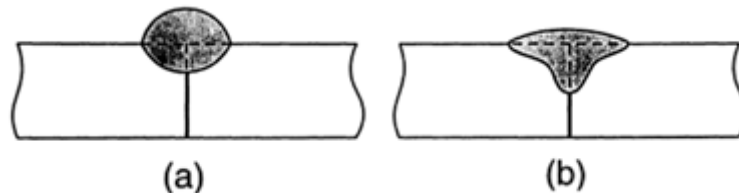


Figura 11. Mudança no aspecto da zona fundida (mantendo a corrente constante) quando a tensão é: (a) muito baixa; (b) muito elevada. Fonte: Adaptado de METALS HANDBOOK, 1993

3.3.3. Velocidade de Soldagem (v)

A velocidade de soldagem é um parâmetro que tem um limite estreito de trabalho, dado demais parâmetros constantes. Aumentar a velocidade de soldagem diminui a quantidade de calor fornecido por comprimento de solda.

Esse parâmetro é frequentemente alterado para aumento de produtividade, porém, seu aumento gera diminuição de penetração, reforço e largura do cordão, o que pode afetar diretamente a qualidade do conjunto soldado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011]. Além disso, o aumento excessivo desse parâmetro pode fazer com que a poça de fusão não consiga acompanhar o arco, que operaria entre a peça não fundida e o eletrodo, resultando em diferente penetração em cada seção da peça.

3.3.4. Aporte térmico (Q)

Os parâmetros de soldagem descritos se associam diretamente no aporte térmico (ou energia de soldagem) do processo, que é definido como a quantidade de calor adicionada no cordão por comprimento de solda. Essa energia pode ser quantificada pela Eq. 2 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

$$H = \eta \cdot \frac{VI}{v} \quad (2)$$

Onde H é a energia de soldagem (J/mm), η é a eficiência térmica do processo, V é a tensão no arco (V), I é a corrente de soldagem (A), e v é a velocidade de soldagem (mm/s).

Quanto maior o aporte térmico, mais calor é fornecido à solda, aumentando a quantidade de material fundido, resultando em uma morfologia de cordões mais largos, profundos e com maiores reforços. Outra consequência de um maior aporte térmico, é aumento do calor fornecido à peça como um todo, gerando uma zona termicamente afetada (ZTA) de maiores dimensões, um resfriamento mais lento, e consequentes mudanças microestruturais no dispositivo soldado.

3.4. Ciclo Térmico de Soldagem

O ciclo térmico de soldagem é a variação de temperatura que ocorre em um determinado ponto da junta durante a soldagem. Essa variação depende do tipo de material base, da geometria e espessura da junta e da energia de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

A caracterização do ciclo térmico se dá pelo valor da temperatura de pico em um dado ponto, tempo de permanência acima de uma determinada temperatura crítica e velocidade de resfriamento como representado pelo gráfico da Figura 12 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Ligas metálicas apresentam temperaturas críticas acima das quais ocorrem transformações microestruturais que podem afetar as suas propriedades mecânicas, o que pode ser usado para caracterizar a ZTA de soldas destas ligas, em conjunto com a velocidade de resfriamento das mesmas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

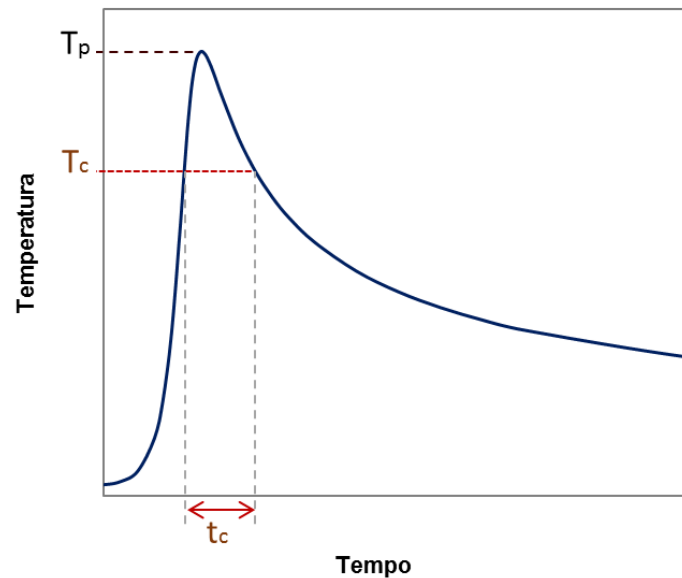


Figura 12. Ciclo térmico em soldagem – esquemático. Fonte: CASTRO, 2017.

3.4.1. Modelo teórico para previsão do ciclo térmico de soldagem (Rosenthal)

Um dos modelos teóricos utilizados para previsão do ciclo térmico de soldagem é o de Rosenthal, que foi feito na década de 30, a partir da solução da equação de balanço de energia (MODENESI 2012):

$$\rho \frac{\delta}{\delta t} (cT) + \rho \vec{v} \cdot \nabla (cT) = \nabla \cdot (k \nabla T) + s \quad (3)$$

Sendo:

ρ = massa específica do material

c = calor específico do material

T = temperatura

t = tempo

v = velocidade de soldagem

k = condutividade térmica do material

s = calor gerado.

Para sua solução, Rosenthal adotou as seguintes considerações (MODENESI 2012):

- Estado quase-estacionário;
- Forma da fonte de calor simplificada;
- Formato simplificado da peça;
- Variação das propriedades físicas com a temperatura desprezível;

Para um passe de penetração total, as variações de temperatura na direção da espessura da chapa são desprezíveis, considerando um fluxo térmico bidimensional (2D) com uma fonte linear de calor. Para esses casos, a equação de fluxo 2D para chapa de largura infinita é dada pela Eq. 4 a seguir:

$$\frac{2\pi(T - T_o)kh}{Q} = \exp\left(\frac{Vx}{2\alpha}\right) K_o\left(\frac{Vr}{2\alpha}\right) \quad (4)$$

Onde: T = temperatura da peça durante a soldagem

T_o = temperatura da peça antes da soldagem

k = condutividade térmica da peça

h = espessura da peça

Q = calor transferido da fonte de calor para a peça

V = velocidade de avanço

α = difusividade térmica da peça, dada por $k/(\rho C)$

K_o = função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero

r = distância radial da origem, dada por $\sqrt{x^2 + y^2}$

Já em uma peça de grande espessura (semi-infinita) a solução analítica de Rosenthal para o fluxo térmico tridimensional segue a Eq. 5.

$$\frac{2\pi(T - T_o)kR}{Q} = \exp\left[\frac{-V(R - x)}{2\alpha}\right] \quad (5)$$

Onde: R = distância radial da origem, dada por $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

As simplificações adotadas fazem com que o modelo perca exatidão, porém esse modelo é muito utilizado, sendo uma base de análises de fluxo térmico por possibilitar uma resolução facilitada das características do fluxo de calor em soldagem.

3.4. Regiões de uma junta soldada

Em diferentes pontos da seção transversal de uma junta soldada, diferentes ciclos térmicos são alcançados, com valores de temperatura de pico que podem ser usados para definir regiões desta junta. Dado o ciclo térmico, é possível separar a estrutura soldada em zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base.

3.4.1. Zona Fundida (ZF)

Zona fundida é a região que ocorre a fusão e mistura dos materiais de adição e de base. É possível estimar a proporção de material de base fundido (B) e metal de adição (A) que integram a zona fundida, encontrando o coeficiente de diluição, (δ), que é definido pela Eq. 6, a partir do cálculo das áreas do cordão (Figura 13) (MODENESI, 2012).

$$\delta = \frac{B}{A + B} \cdot 100 \quad (6)$$



Figura 13. Parâmetros para medida da diluição na seção transversal de uma solda (a) sobre chapa, e (b) de topo. Fonte: MODENESI et al., 2012

3.4.2. Zona Termicamente Afetada

Zona termicamente afetada é a região adjacente à linha de fusão, onde a temperatura de pico é suficientemente alta para causar transformações no estado sólido, alterando a microestrutura e propriedades do metal base (MODENESI, 2012). A Figura 14 relaciona as diferentes temperaturas de pico alcançadas na seção soldada, com a microestrutura do aço nessa temperatura, possibilitando a previsão da microestrutura encontrada ao longo da ZTA, dividindo-a em regiões de granulação grosseira, granulação fina, ZTA intercrítica e ZTA subcrítica. (MODENESI, 2014).

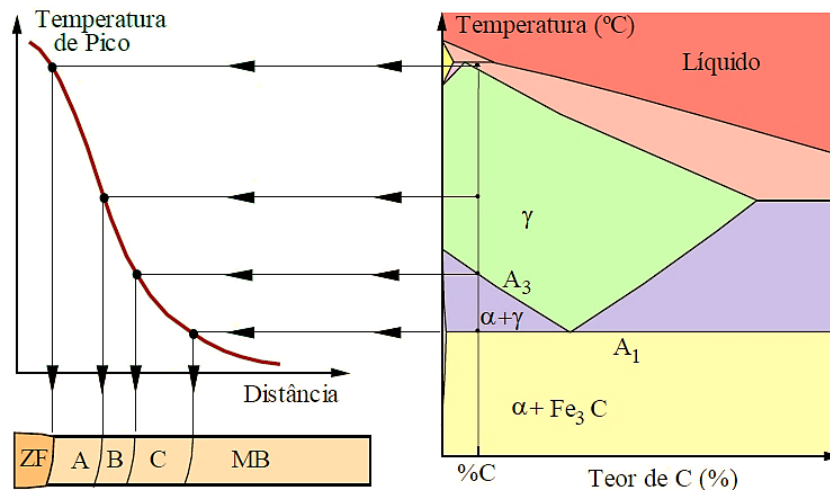


Figura 14. Relação das regiões da ZTA com o diagrama de fases. A: GGZTA; B:GFZTA; C:ICZTA+SCZTA. Fonte: MODENESI, 2014.

A – Região de granulação grosseira (GGZTA):

Na região de granulação grosseira o metal de base é aquecido acima da temperatura de crescimento do grão austenítico ($\cong 1200^{\circ}\text{C}$ para aços estruturais), possuindo assim um elevado grão austenítico, resultando em um aumento da temperabilidade do material.

B – Região de granulação fina (GFZTA):

Já na região de granulação fina a temperatura de pico alcançada está entre a temperatura de crescimento de grão e a temperatura de início de formação da ferrita (A_3), o que resulta em microestrutura de granulação fina, similar à de materiais normalizados.

C – Região intercrítica (ICZTA):

A região intercrítica as temperaturas se situam entre A_3 e A_1 , levando uma transformação parcial em austenita no aquecimento, resultando em áreas não transformadas, com a microestrutura original do metal base, e áreas com microestrutura resultante da transformação da austenita.

D – Região subcrítica (SCZTA):

A região subcrítica é a região onde as temperaturas de pico não atingem a temperatura eutetóide, mas que pode apresentar alguma mudança microestrutural.

3.4.3. Metal de Base

Por fim, o metal de base é a região mais afastada da poça de fusão, onde as temperaturas de pico não são altas o suficiente para causar mudança microestrutural significativa (MODENESI, 2012).

3.5 Soldagem de Manutenção

A soldagem de manutenção é um procedimento muito utilizado pela indústria, por possibilitar a reutilização de um equipamento ou componente de forma rápida e barata, aumentando sua vida útil sem atrapalhar a produção. Normalmente essa soldagem é utilizada para o reparo de defeitos na solda, reparo de componentes com falha, ou para o reparo de componentes desgastados (ASM HANDBOOK, 1993).

Para a execução da soldagem de manutenção, o conhecimento do histórico do componente é uma ferramenta útil, porém, nem sempre é possível. Dados como a função do equipamento, a composição do material, suas propriedades mecânicas, e sua forma de obtenção (fundido, soldado ou forjado), podem contribuir muito para que a operação seja bem-sucedida (ASM HANDBOOK, 1993).

Escavadeiras hidráulicas podem ser submetidas ao esforço excessivo na estrutura, acima da capacidade de projeto devido à sobrecarga nos ciclos de carregamento e operações incorretas. O resultado destas não conformidades é a nucleação e o surgimento das trincas, reduzindo a vida útil da estrutura.

Normalmente as fissuras tem um caráter estável (Figura 15), parando de propagar caso o esforço seja suspenso. Mesmo em serviço, esse tipo de trinca se propaga lentamente em relação a uma falha final e instável (HOPPE, 2002). Entretanto, a falta de inspeção e identificação da trinca no início, pode levar uma trinca inicialmente estável para a propagação instável, isto é, sem controle (Figura 16).

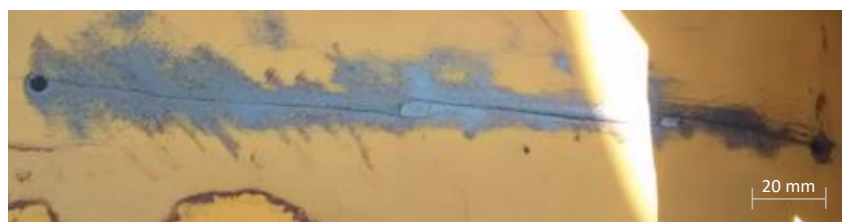


Figura 15. Trinca estável no braço da escavadeira hidráulica. Fonte: Autor



Figura 16. Trinca instável no semibraço da escavadeira hidráulica. Fonte: Autor

Para o reparo por soldagem desses diferentes tipos de trincas, recomenda-se a elaboração de uma Instrução Execução e Inspeção de Soldagem (IEIS), baseado na Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) de fabricação da escavadeira, tal qual seria feito para um componente novo. De todo modo, além das parametrizações consideradas por norma, é importante uma análise crítica do reparo, levando em consideração o tipo de material, o tipo de fissura, a localização e acesso do ponto a ser reparado e o local para execução da soldagem (ASM HANDBOOK, 1993).

Mediante essas análises, em conjunto com a EPS, o processo de soldagem pode ser escolhido. A Tabela 1 contém as características de diferentes processos de soldagem de acordo com as condições do processo.

Tabela 1. Seleção do processo de soldagem conforme Fábrica 1.

Parâmetro ou Característica	Processo				
	SMAW	GTAW	GMAW	FCAW	SAW
Qualidade de Solda	4	5	5	4	5
Taxa de Deposição	2	1	4	4	5
Trabalho em Campo	5	1	2	5	1
Manutenção do Equipamento	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Médio
Emissão de Gases	Alto	Baixo	Médio	Alto	Muito Baixo
Controle de Calor	5	1	4	4	3
Visibilidade do Arco	4	5	3	3	1
Variedade de Metais Soldáveis	5	5	4	4	2

1 – Ruim; 2 – Razoável; 3 Satisfatório; 4 – Bom; 5 - Excelente.

Fonte: ASM HANDBOOK (Modificado).

Dentre os processos possíveis para o reparo de escavadeiras em campo, um dos mais utilizados é o FCAW com o arame E71-T1 e gás de proteção Ar (25%) + CO₂ (75%).

3.5.1 – Soldagem FCAW

A soldagem com arame tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*) é um processo de soldagem cujo aquecimento e fusão dos materiais ocorre pelo arco elétrico estabelecido entre o eletrodo tubular consumível e a peça de trabalho (Figura 17). O eletrodo tem alimentação contínua, e no seu interior contém um fluxo de soldagem, que atua protegendo o arco e o cordão de solda, além de possibilitar a adição de elementos de liga, refinar metal de solda e estabilizar o arco (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2011).

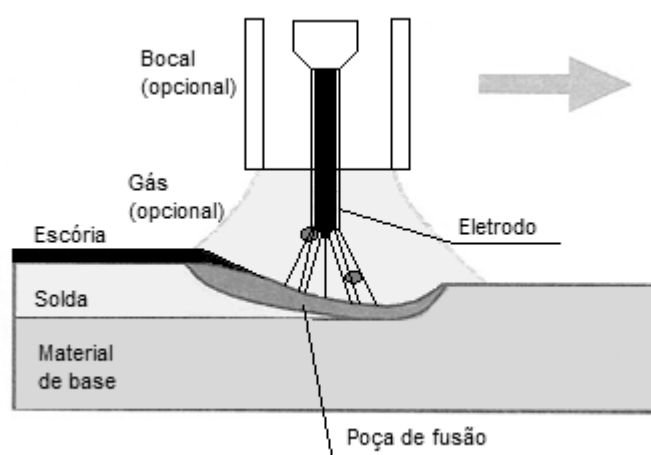


Figura 17. Processo de soldagem FCAW.

Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011 - modificado.

O processo de soldagem por arame tubular tem duas variações básicas. Uma em que o arco e o cordão de solda são protegidos somente pelo fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo e outro em que essa proteção é suplementada por um gás fornecido por uma fonte externa (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2011).

Esse tipo de soldagem supera algumas limitações do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) como a possibilidade de escorificação de impurezas, melhor estabilidade do arco, possibilidade de adição de elementos de liga, proteção eficiente com menor vazão de gases, menor quantidade de respingos, cordão com melhor aspecto, e uma melhor possibilidade de trabalho em campo, pela não necessidade da proteção gasosa.

Os arames tubulares são classificados pela AWS de acordo com o uso do gás de proteção, tipo de corrente, posições de soldagem, composição química, propriedades

mecânicas do cordão, e se o enchimento é convencional (Flux Cored), ou de pó metálico (Metal Cored).

- Flux Cored – Arames tubulares cujo enchimento é feito principalmente com o fluxo convencional, que tem como função desoxidante, escorificante, estabilização do arco e adicionar algum elemento de liga.
- Metal Cored – Arames tubulares cujo o enchimento é feito principalmente com pó de ferro e/ou ferro-ligas e pouco fluxo a base de minerais. São vantajosos em soldagens mecanizadas em altas velocidades, e, para soldagem de aços carbono e baixa liga, permitem uma transferência de metal bastante suave em atmosferas protetoras a base de argônio e CO₂, produzindo pouquíssima escória.

A escória que é produzida ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2011).

3.6. Defeitos de Soldagem

Os processos de reparo devem seguir os procedimentos e normas relativas aos processos de soldagem para reduzir a chance do surgimento das descontinuidades, que podem se tornar um defeito, que impossibilitam o atendimento dos requisitos mínimos necessários. Para classificar os defeitos nas escavadeiras, a norma mais utilizada é a EN ISO 6520-1:2007. Para verificação dos critérios de aceitação dessas descontinuidades, faz-se uso da norma EN ISO 5817:2007, ou a AWS D1.1.

Dentre os defeitos descritos na norma EN ISO 6520-1:2007, os mais encontrados no reparo das escavadeiras estão divididos em cinco grupos: trincas, poros, inclusões sólidas, falta de fusão e imperfeições sólidas.

3.6.1 - Grupo 1: Trincas

As trincas são identificadas conforme a sua posição, tamanho e direção. Na Figura 18 são apresentadas diferentes classificações com base no posicionamento da trinca.

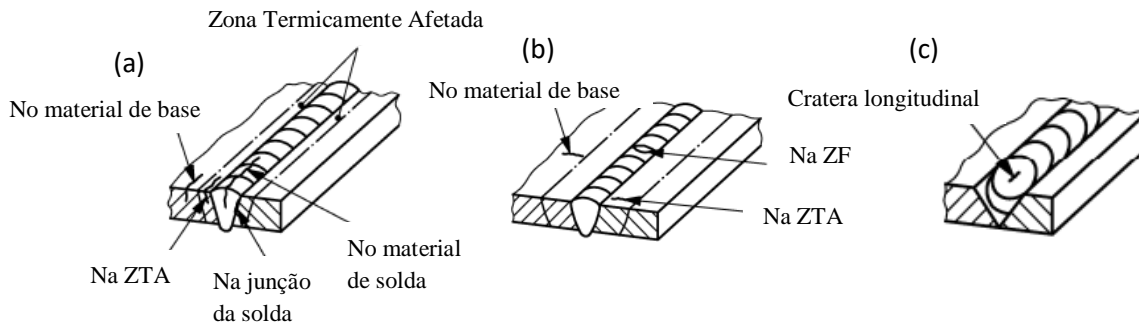


Figura 18. Diferentes posicionamentos de trincas (a) longitudinal; (b) transversal e (c) de cratera.

Fonte: Norma EN ISO 6520-1:2007

Uma falha recorrente do grupo 1 é a presença de trincas a frio, que surgem na posição 1013, que é uma trinca tipicamente presente na ZTA, ocasionada pela falta de controle de temperatura no preaquecimento para controle da taxa de resfriamento e promoção da saída do hidrogênio difusivo.

3.6.2 - Grupo 2: Cavidades: Porosidade

A presença de porosidade se deve ao aprisionamento durante a solidificação de gases gerados na soldagem, o que pode ser induzido pela presença de contaminantes como óleo, graxa, sujeira, oxidação e umidade na superfície do metal. A Figura 19 ilustra os diferentes tipos de distribuição de poros segundo a norma EN ISO 6520-1:2007

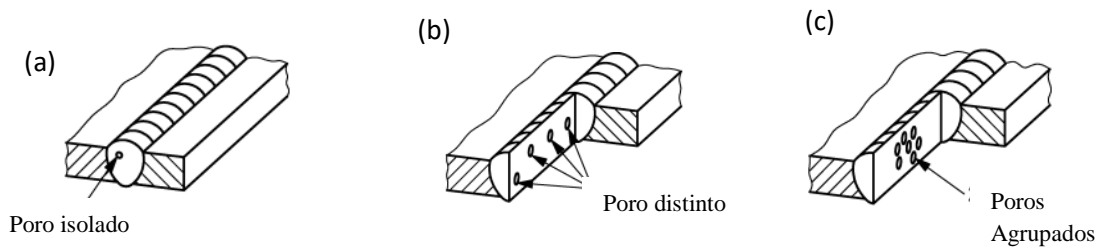


Figura 19. Distribuição de poros ao longo do cordão de solda. Fonte: EN ISO 6520-1:2007

3.6.3 - Grupo 3: Inclusões Sólidas

As inclusões sólidas (Figura 20) são compostas por partículas aprisionadas durante à soldagem, devido a presença de contaminantes na região da solda e contaminação no material de adição. Estes contaminantes são compostos por óxidos e material não metálico e podem causar a fragilização da solda.

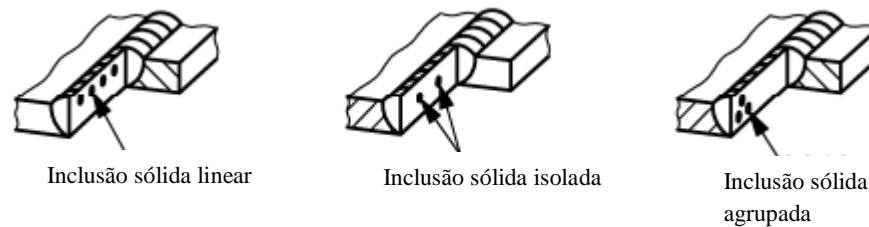


Figura 20. Distribuição de diferentes inclusões sólidas no cordão de solda. Fonte: EN ISO 6520-1:2007

Falhas na preparação da superfície, como limpeza e remoção dos óxidos, a utilização de material de adição contaminado, falha na proteção dos gases na soldagem, técnica de soldagem inadequada, e a falta de limpeza entre os passes são fatores que podem favorecer a ocorrência dessas falhas.

3.6.4 - Grupo 4: Falta de fusão e penetração

A falta de fusão ou fusão incompleta do cordão de solda (Figura 21) pode gerar concentradores de tensão que podem levar à formação de trincas e a não união entre as partes. Este tipo de não conformidade está relacionado ao controle inadequado dos parâmetros de soldagem, por exemplo, tensão e corrente, a especificação incorreta dos consumíveis e imperícia no processo de soldagem.

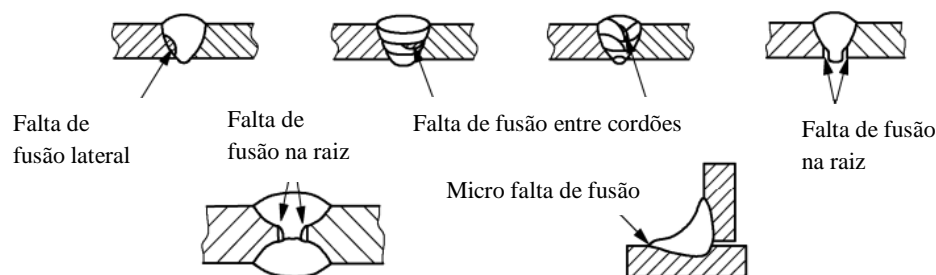


Figura 21. Representação de falta de fusão em cordões de solda. Fonte: EN ISO 6520-1:2007.

3.6.5 - Grupo 5: Imperfeições de forma e dimensão

O grupo das imperfeições de forma e dimensão são formadas pelas mordeduras, crateras, perfuração, reforço excessivo, respingos, convexidade excessiva, penetração excessiva, convexidade na raiz, desalinhamento, etc. A Figura 22 ilustra as mordeduras segundo a norma EN ISO 6520-1:2007.

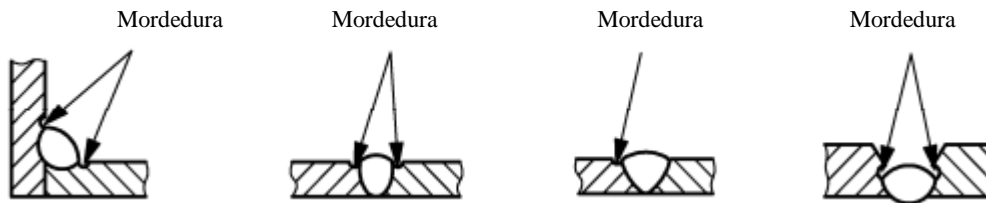


Figura 22. Localização de mordeduras em conjuntos soldados. Fonte: EN ISO 6520-1:2007.

3.7 Especificação de Procedimento de Soldagem

O procedimento de reparo deve conter todas as informações necessárias para a execução do reparo, que são baseadas em normas e em técnicas de reparo conhecidas desenvolvidas pelo fabricante do equipamento.

Para reparo de trincas, a soldagem deve levar em consideração os seguintes quesitos (ASM HANDBOOK, 1993):

- Localizar a trinca, definindo seu início e fim;
- Identificar o material;
- Preparar a região a ser soldada (chanfro, acesso e limpeza);
- Fazer ensaio não destrutivo para assegurar que a trinca foi retirada;
- Selecionar processo de soldagem e consumível;
- Travar a peça de modo a evitar distorções durante a soldagem, ou fazer uma pré-deformação;
- Especificar os parâmetros de soldagem, assim como pré e pós aquecimento;
- Estabelecer sequência de soldagem, de modo a balancear as tensões inerentes a soldagem;
- Caso seja feita usinagem, prever um sobremetal.

Uma especificação de procedimento de soldagem é um documento técnico que define os parâmetros a serem aplicados para a realização de uma operação de soldagem, funcionando como um roteiro para a soldagem que será realizada (ISO 15609-1).

No caso das soldagens de manutenção, recomenda-se o uso da EPS de fabricação do componente, entretanto, a EPS nesses casos tende a conter recomendações extras e previsões de problemas a serem enfrentados durante a soldagem, e técnicas para minimiza-los.

Segundo a ISO 15614-1, para preparar a EPS, deve-se fazer uma EPS preliminar, com todas as informações que deverão estar contidas na EPS final. A partir da EPS preliminar é feita uma qualificação desse procedimento, sendo feitos ensaios para avaliar se as condições de soldagem atendem aos requisitos da aplicação, sendo elaborado um Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem (RQPS), para só então os dados serem utilizados em uma EPS.

Para a soldagem de manutenção de escavadeiras, além das normas, existem diversas recomendações específicas feitas pelos fabricantes. Conforme o modelo do equipamento, os procedimentos de recuperação têm similaridades entre si, mas em alguns pontos variam de acordo com o tipo de aço e a localização do reparo.

3.7.1 – Material de Base

Conhecer o material base é importante para otimizar o procedimento de soldagem e minimizar as chances de ocorrer qualquer problema durante a sua execução. Dentro da norma ISO 15608, há uma classificação dos diferentes materiais e dimensões para classificação do procedimento.

3.7.2 – Processo de soldagem

Para a execução da soldagem, é importante a escolha adequada do processo com base nas condições que a solda será realizada. A norma ISO 4063 separa os diferentes processos de soldagem em grupos.

No caso da soldagem de manutenção, o posicionamento do equipamento e as dimensões da junta são fundamentais nessa escolha. São importantes também as questões de limpeza e preparação da junta (ISO 15609). Qualquer material estranho (sujeira, tinta, ferrugem e depósitos de carbono resultantes de cortes realizados) deve ser removido antes da realização das soldas e todas as áreas e superfícies a serem soldadas devem ser limpas com uma esmerilhadora para assegurar que quaisquer materiais estranhos foram removidos. Cuidado especial deve ser tomado com tintas, pois o hidrogênio da tinta é absorvido pela solda e pode causar trinca a frio.

3.7.3 – Preparação da região

A norma ISO 3834-2 deixa a cargo do fabricante os testes que devem ser aplicados no processo, para garantir o atendimento ao contrato. Na soldagem de reparo, é importante

que toda a descontinuidade seja mensurada por ensaios não destrutivos, e seja então retirada por completo antes da soldagem. Há fabricantes que recomendam o desbaste da área trincada removendo 30 mm de material da estrutura além das duas extremidades da trinca (Figura 23).

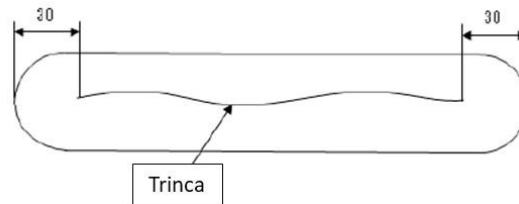


Figura 23. Área retirada de trinca. Fonte: Autor.

Para trincas não passantes, o mesmo fabricante recomenda remover de 3 a 5 mm de profundidade além da trinca para removê-la completamente (Figura 24a). Caso a trinca seja passante, deve-se remover a trinca de um lado, deixando 2 a 3mm para evitar que a solda atravesse a chapa, para só depois realizar a goivagem no lado oposto, com 3 a 5mm além da trinca para remove-la completamente, para depois preencher a chapa (Figura 24b).

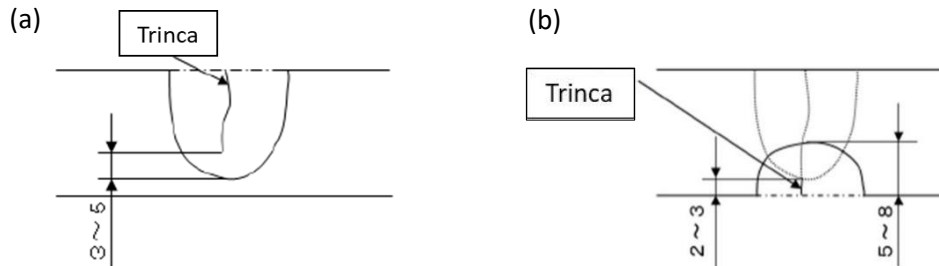


Figura 24. Técnica para remoção de trincas a) não passantes e b) passantes. Fonte: Autor.

Já existem fabricantes que recomendam a manufatura de chanfro em V para remoção de trincas, com ângulo mínimo de 40° (Figura 25).

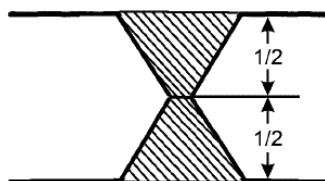


Figura 25. Chanfro realizado em peça após remoção de trincas. Fonte: Autor.

Após a remoção da trinca, deve-se realizar acabamento com uma lixadeira para remover a camada de carbono que ficou na peça, dado a remoção por goivagem, evitando

fragilização da região soldada. Além disso, deve-se fazer inspeção por ultrassom para assegurar que a trinca foi removida completamente.

3.7.4 – Técnica Operatória

Outro ponto importante é a técnica operatória de soldagem. A norma ISO 15609-1 define ser aplicável o uso de tecimento, contudo, cabe ao fabricante decidir sobre esse uso. A tabela 2 indica os tipos de manipulação de tocha recomendados por um fabricante de escavadeiras.

Tabela 2. Manipulação da solda

Posição	Tipo de Soldagem	Manipulação	
Plana	Filete Horizontal		
	Primeira camada de junta de topo	Com face de raiz	
		Sem face de raiz	
	Camadas superiores de junta de topo	Camadas superiores gerais	
Quando inclinado transversalmente			
Vertical	Soldagem de Fillete		
	Soldagem com Junta de topo		
Sobre-Cabeça	Soldagem de Fillete		
	Soldagem com Junta de topo		

Fonte: Recomendações Komatsu.

Uma vez o reparo iniciado, a peça deverá ser trabalhada até que se finalize o procedimento. Qualquer reparo na soldagem poderá ser feito enquanto a temperatura estiver de acordo com a de pré-aquecimento. A sequência de soldagem que deverá ser seguida está representada na Figura 26.

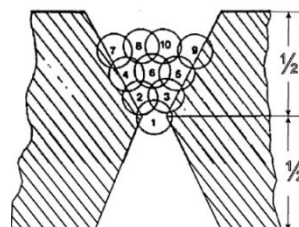


Figura 26. Sequência de Soldagem. Fonte Autor.

3.7.5 – Consumíveis de soldagem

Com a escolha do processo de soldagem, a escolha dos consumíveis se faz possível. Deve-se pensar, no caso dos metais de adição, no tipo de consumível, nas dimensões e armazenamento dos mesmos (ISO 15609). É importante também avaliar a região em

que será feita a solda, e determinar a necessidade do gás de proteção, que deve ser escolhido seguindo a norma EN 439.

3.7.6 – Temperatura de pré-aquecimento, interpasse e pós aquecimento

A ISO 13916 é utilizada para especificação das temperaturas utilizadas durante o processo de soldagem, cuja escolha depende do material de base utilizado, da quantidade de hidrogênio difusivo e da espessura do material a ser soldado (ISO EN 1011-2).

Recomenda-se também que, após a soldagem, deve-se manter a temperatura de pré-aquecimento por pelo menos 15 minutos e depois deve se resfriar a área lentamente a no máximo 50°C/h. A Tabela 3 contém as temperaturas de pré-aquecimento, interpasse e velocidade de resfriamento utilizadas em diferentes materiais e espessuras em soldas de manutenção.

Tabela 3. Temperaturas de trabalho permitidas

Material	Profundidade do chanfro (mm)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Temperatura do passe (°C)	Temp. de resfriamento (°C/hr)
S355 (X60)	-10	20	220	50 graus no máx.
S460	10-20	50		
1)	>20-50	100		
	>50	150		
S690	-10	50	150	
	>10-20	100	180	
	>20	150	220	
HB 400	-40	20	220	
(Dillidur; XAR, Hardox)	>40-70	75		
	>70-100	100		
	>100	150		
HB 500	-20	50	180	
(Dillidur; XAR, Hardox)	>20-30	100	220	
	>30-40	125		
	>40-60	150		
	>60	175		
GS24Mn6	<10	50	150	
GS18NiMoCr36	<10-20	100	180	
	>20	150		
GS22NiMoCr56	<10	50	150	
	<10-20	100	180	
	>20	150		
ESCO Ferro Fundido		150	230	
Ferro fundido				
Hensley				
42CrMo4		320	350	
30CrNiMo8		280	320	

3.7.7 – Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem deverão ser determinados de acordo com todos os demais parâmetros já pré-definidos. No caso de soldagem FCAW, por exemplo, parâmetros importantes de serem determinados são (ISO 15609-2):

- Distância bico de contato peça (DBCP);
- Velocidade de soldagem;
- Tensão;
- Vazão do gás (se for usado);
- Velocidade de alimentação de arame.

3.7.6 – Ensaios Pós Soldagem

Após o processo deve-se inspecionar toda a solda após o total resfriamento à temperatura ambiente. Uma inspeção final da solda deve ser feita 24 horas após o fim do reparo com o objetivo de detectar trincas induzidas por hidrogênio.

Caso imperfeições superficiais sejam encontradas, elas devem ser removidas por esmerilhamento, no caso de reparo de escavadeiras (até 1,5 mm). Grandes falhas devem ser removidas de com um novo procedimento de reparo.

A norma ISO 3834-2 determina como procedimentos de inspeção pós soldagem para verificar a concordância com os critérios de aceitação, os seguintes tópicos:

- Inspeção Visual;
- Uso de ensaios não destrutivos;
- Verificação de dimensões;
- Análise de dados dos tratamentos térmicos.

No caso de uma EPS, seguindo a norma ISO 15614-1, a partir do corpo de prova da Figura 27, deve-se fazer os seguintes de: tração; dobramento; impacto; dureza; e análise macrográfica. Todos seguindo as respectivas normas.

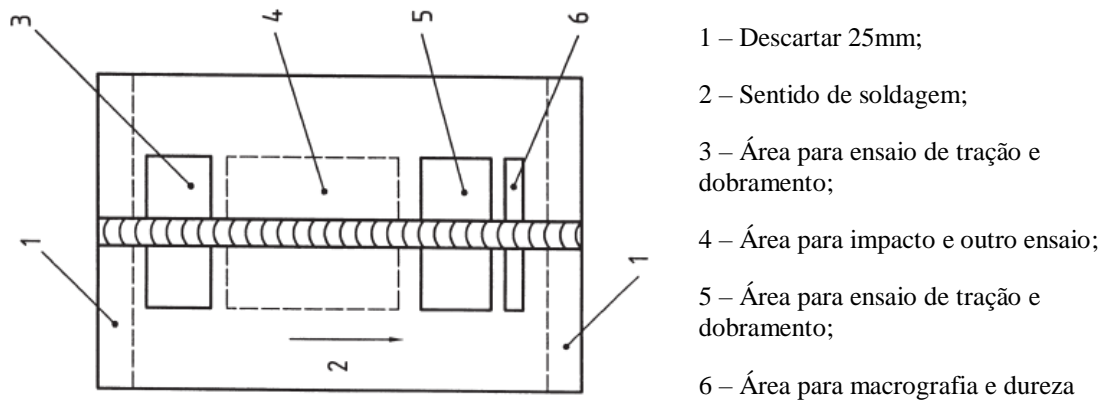


Figura 27. Localização da retirada de corpos de prova para ensaios em solda de topo. Fonte: ISO 15614-1

4 METODOLOGIA

Para a análise das diferenças de estrutura e propriedade dos conjuntos soldados de chapas ASTM A36 utilizando técnicas operatórias com e sem tecimento, seguiu-se o fluxograma apresentado na Figura 28.

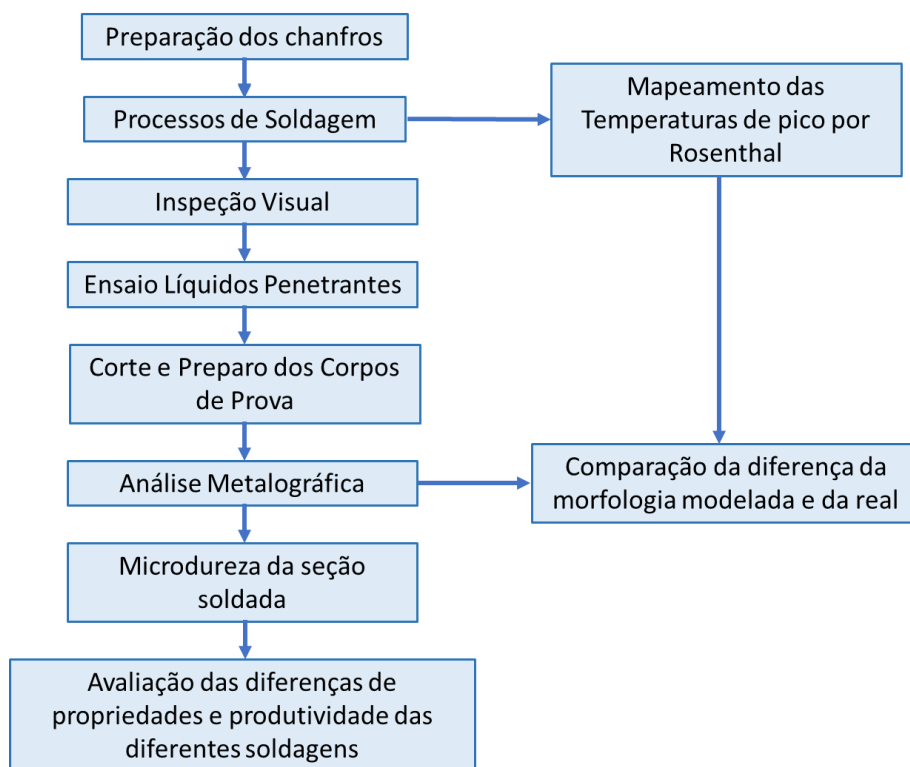


Figura 28. Fluxograma da metodologia usada na monografia.

Com essa metodologia foi possível avaliar as morfologias dos cordões obtidos com as diferentes técnicas de soldagem, além de verificar o perfil de dureza das regiões soldadas. Também foi possível comparar a morfologia prevista pelo cálculo de ciclo térmico de Rosenthal, com o encontrado no conjunto soldado.

4.1 Materiais

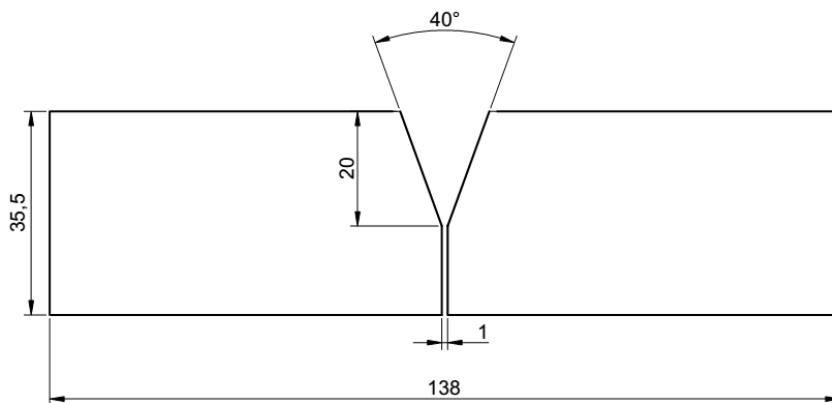
O material de base utilizado foi o aço ASTM A36, tal qual usado no braço de escavadeiras hidráulicas, o que ocorre dado sua boa soldabilidade, boa conformabilidade, e tensões de escoamento e tenacidade suficientes para atender as demandas dessas aplicações. Esse aço pode ter carbono equivalente de até 0,29, recomendando-se alguns cuidados durante a soldagem. Sua composição química segundo a norma ASTM A36/A36M pode consultada na Tabela 4.

Tabela 4. Composição Química Especificada do Aço ASTM A36

C, max, %	Mg, %	P, max, %	S, max, %	Si, %	Cu, min, %
0,26	0,80 – 1,20	0,04	0,05	0,15 – 0,40	0,20

Fonte: ASTM A36/A36M, 2018.

Para padronização do processo oito chapas do aço foram cortadas na dimensão final de 68,5x35,5x255mm. Após o corte as chapas foram usinadas para produzir quatro juntas chanfradas com as dimensões de acordo com a Figura 29. Tanto o corte quanto a usinagem foram feitos pela empresa Ipromec LTDA.

**Figura 29.** Montagem dos materiais de base.

As medidas utilizadas para o chanfro foram escolhidas com base nas recomendações dos fabricantes para manutenção de escavadeiras, onde é feito chanfro em V com o ângulo mínimo de abertura de 40°. Para a soldagem ser representativa em relação ao que é feito em braços de escavadeira, utilizou-se metade da espessura da chapa como altura do chanfro.

Para a realização da soldagem, foi utilizado como metal de adição o arame tubular ESAB E71T-1 de 1,2mm de diâmetro, comum em operações de manutenção, e como gás de proteção o CO₂.

4.2 Procedimento de Soldagem

Foi utilizado para a soldagem pelo processo FCAW a máquina ESAB ARISTO MIG Super Pulse (Figura 30). A solda foi realizada por soldador da empresa Komatsu Ltd., experiente em soldagens de reparo em escavadeiras.



Figura 30. Máquina de solda da ESAB.

Os parâmetros de soldagem foram definidos seguindo as recomendações das fábricas de escavadeira e a experiência do soldador na manutenção desses equipamentos. A tensão usada foi de 27V, a velocidade de alimentação do arame foi de 6,9m/min, e a vazão do gás utilizada foi de 18L/min.

Todas as amostras foram pré-aquecidas a 165°C em forno Mufla, e a temperatura de interpasses foi abaixo de 230°. Essas temperaturas foram verificadas com termômetro de infravermelho FLUKE 62 MAX (Figura 31).



Figura 31. Termômetro de Infravermelho FLUKE 62 MAX.

Foram preenchidas 2 juntas utilizando técnica operatória de tecimento, e outras 2 juntas de forma filetada. Para a comparação da produtividade dos procedimentos, os tempos de arco aberto em cada passe executado foram medidos.

4.3. Inspeção dos Conjuntos Soldados

Após a realização das soldas, os cordões foram inspecionados de forma visual, e por líquidos penetrantes, assegurando a não ocorrência de trincas superficiais em decorrências da operação de soldagem. Foram utilizados como líquido penetrante visível o METAL CHEK VP30, e o revelador SPOTCHECK SKD-S2.

As juntas foram pesadas utilizando balança Balmak ELP 6/15/30 para a determinação da massa de metal depositado. O ângulo de distorção foi medido pela análise das imagens da seção transversal, seguindo o esquema da Figura 32, utilizando o software Photoshop, de modo a avaliar qual procedimento favoreceria um maior nível de tensão residual no processo de manutenção real.

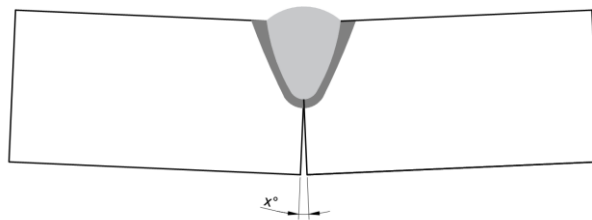


Figura 32. Metodologia para encontrar ângulo de distorção em decorrência da contração da zona fundida.

4.4. Preparo das amostras

As chapas soldadas foram cortadas em quatro linhas no sentido transversal da solda (Figura 33). Para o corte foi utilizado a serra fita Manrod MR 122.

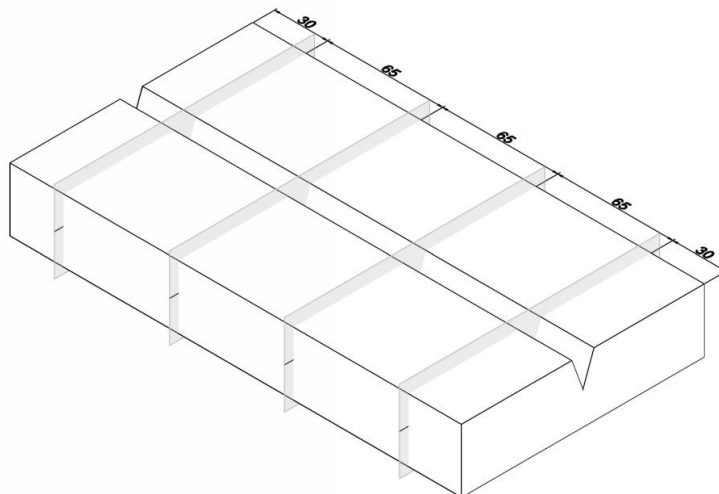


Figura 33. Posicionamento dos cortes das amostras.

Após o corte, as extremidades foram descartadas. As seções transversais das soldas foram analisadas a 65 mm da extremidade cortada, sendo obtidas, portando, 2 amostras para cada conjunto soldado.

As amostras tiveram seu tamanho reduzido utilizando cortadora metalográfica CM40 (Figura 34), facilitando a execução das operações de lixamento e polimento. Nessa operação serão mantidas as faces obtidas no primeiro corte.



Figura 34. Cortadora Metalográfica.

Para as análises micrográficas foi feito lixamento com lixas de 100# a 1200#, seguido de ataque com reagente Nital 10%. Para as análises micrográficas, foram utilizadas lixas de 100# a 2000#, seguido de polimento em pano com pasta de diamante de 9, 3 e 1 μ m como abrasivo e ataque com reagente Nital 3%. Tanto o lixamento quanto o polimento foram feitas em politrizes TECLAGO PL02 E.

4.4.1. Macrografia das soldas

As seções atacadas foram fotografadas para a análise macrográfica. As imagens foram editadas e processadas através do software Photoshop, para o dimensionamento dos cordões, seguindo o esquema da Figura 35.

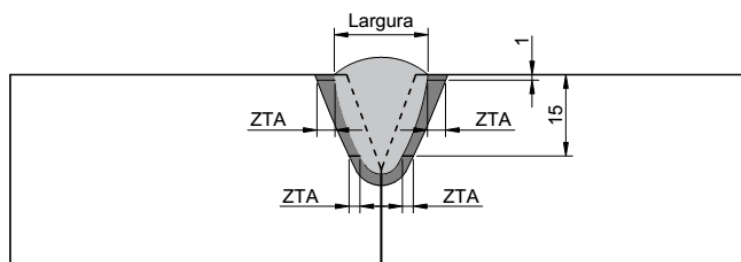


Figura 35. Regiões e dimensões levantadas nas macrografias.

Utilizando o mesmo software, foi também avaliada em termos comparativos a área das zonas fundidas sem reforço de cada condição, possibilitando uma análise indireta da diluição, dado que todos os chanfros tinham a mesma área a ser preenchida.

4.4.2. Micrografia das soldas

Foram obtidas imagens com aumento de 200 vezes, utilizando microscópio ótico AXIO Scope. A1 (Figura 36) com câmera AxioCam ERc5s acoplada. Retirou-se imagens das regiões de Metal Base, ZTA revenida, Zona Fundida Revenida, ZTA não revenida e Zona Fundida não revenida, possibilitando análise da microestrutura formada em cada região, correlacionando-as com as propriedades mecânicas encontradas.



Figura 36. Microscópio ótico com câmera acoplada.

4.5. Mapeamento de dureza

Após as análises micrográficas, as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers utilizado microdurômetro SHIMADZU, modelo HMV – 2T com carga de 300 gf e tempo de 10 s. As durezas foram retiradas seguindo o esquema da Figura 37, com espaçamento entre cada endentação de 0,25 mm.

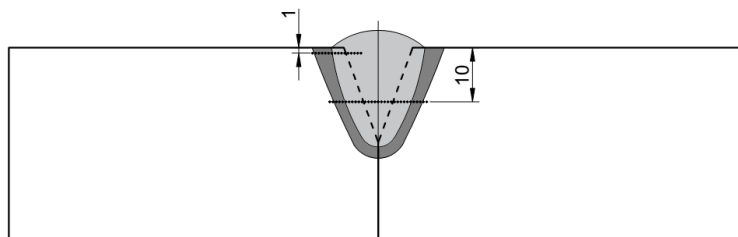


Figura 37. Pontos para análise micrográfica.

O perfil de microdureza realizado a 1 mm de profundidade foi feito para garantir a obtenção de valores de dureza na ZTA em uma região não alterada por passes posteriores. Já o perfil realizado a 10 mm de profundidade foi feito de modo a tentar levantar os valores de dureza para ZTA e Zona Fundida em região tratada termicamente pelos passes posteriores.

Com os resultados das endentações realizadas foi possível levantar o perfil de dureza para cada junta soldada, mostrando a variação de propriedades nas diferentes regiões: Metal Base, ZTA revenida, Zona Fundida Revenida, ZTA não revenida e Zona Fundida não revenida.

4.6. Modelo teórico do ciclo térmico

A fim de prever alterações na morfologia da solda para as diferentes técnicas de soldagem, foi utilizada a equação de cálculo de temperaturas de pico (Eq. 7).

$$T_{pico} = T_o + \frac{P}{2\pi kR} \exp\left(\frac{-v}{2\alpha}\right) (x + R) \quad (7)$$

Esta equação foi utilizada porque, apesar da chapa soldada ser espessa, ela não se enquadra para o modelo 3D de Rosenthal (Eq. 6), mas não é fina o suficiente para o modelo 2D (Eq. 5), sendo essa uma solução intermediária.

Foi considerada para a equação os valores médios dos parâmetros de soldagem, e aplicação de fonte unidirecional (Figura 38). Sendo assim, a diferença das técnicas com e sem tecimento se dá pelo maior tempo necessário para execução do passe de soldagem, resultando em uma velocidade menor do processo.

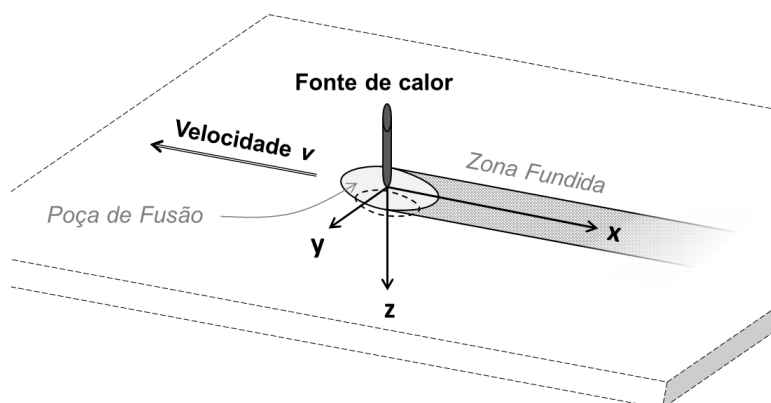


Figura 38. Descrição dos eixos considerados na equação da temperatura de pico. Fonte: CASTRO 2017.

Para cada técnica operatória foram consideradas duas situações: com pré-aquecimento ($T_o = 165^\circ\text{C}$) e sem pré-aquecimento ($T_o = 25^\circ\text{C}$), a fim de também avaliar o efeito desse procedimento na morfologia da seção soldada.

As temperaturas de pico foram calculadas no Excel, e plotadas no sigmaPlot em um gráfico de contorno, evidenciando faixas de valores por cores distintas. As faixas de temperatura de pico foram definidas para evidenciar as diferentes regiões características de uma junta soldada (Figura 14).

Os demais dados utilizados na equação foram (dois pontos)

Tensão de soldagem: 27V

Rendimento térmico: 80%

Condutividade térmica do aço: $45\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$

Calor específico do aço: $630\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$

Densidade do aço: $7800\text{kg}/\text{m}^3$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Procedimento de Soldagem

A partir dos procedimentos de soldagem, obteve-se os dados da Tabela 5.

Tabela 5. Dados dos processos de soldagem.

Cordão	Número de Passes	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Tempo Médio (s)	Tempo Total (s)	Deposição (kg)	Aporte Térmico (Q)
Tecimento 1 (C1)	5	27,1	169,4	155,8	779	0,305	2,80
Tecimento 2 (C2)	5	27,2	181,4	153,8	769	0,296	2,98
Filetado 1 (F1)	7	27,2	184,9	124,7	873	0,32	2,46
Filetado 2 (F2)	9	27,1	181,0	99,2	893	0,335	1,91

Com os dados da Tabela 5, comparando-se os passes individuais de solda, é possível observar que a soldagem com tecimento foi mais lenta do que a filetada. Entretanto, para o preenchimento completo do chanfro, foi necessário um maior número de passes na soldagem filetada, resultando em um tempo total de soldagem de até 15% maior do que o necessário para a soldagem com tecimento. Além disso, o processo de soldagem FCAW exige limpeza entre passes, reduzindo ainda mais a produtividade da soldagem filetada como resultado do maior número de passes usado.

A análise visual (Figura 39) indicou que ambas as técnicas possibilitaram a produção de cordões de solda com uma boa aparência, sendo que, na soldagem filetada, foram necessários mais passes de acabamento de modo a evitar regiões sem reforço, o que levou a uma maior largura da solda. Foi também perceptível na soldagem filetada um maior número de respingos, comportamento cuja explicação não foi encontrada.

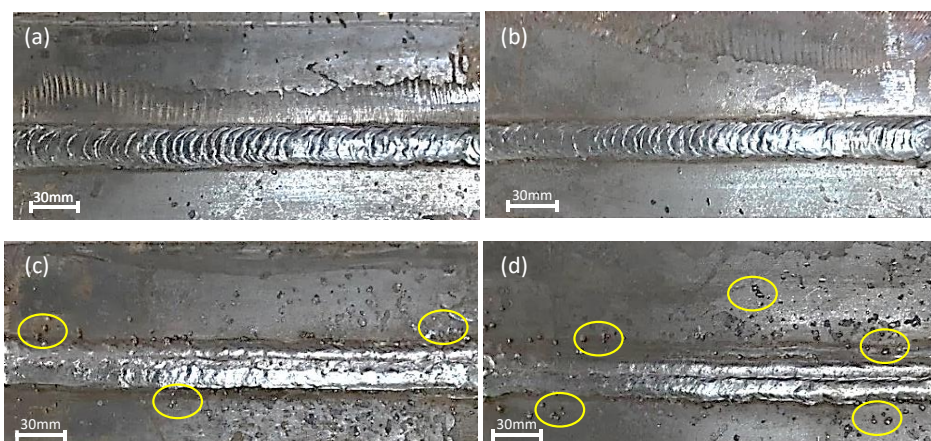


Figura 39. Aspecto Visual Cordões Soldados. a) Com tecimento (C1), b) Com tecimento (C2), c) Filetado (F1), d) Filetado (F2).

Quanto ao ensaio por Líquidos Penetrantes dos conjuntos soldados (Figura 40), é possível notar uma boa qualidade de ambos conjuntos, sem a presença de descontinuidades superficiais.

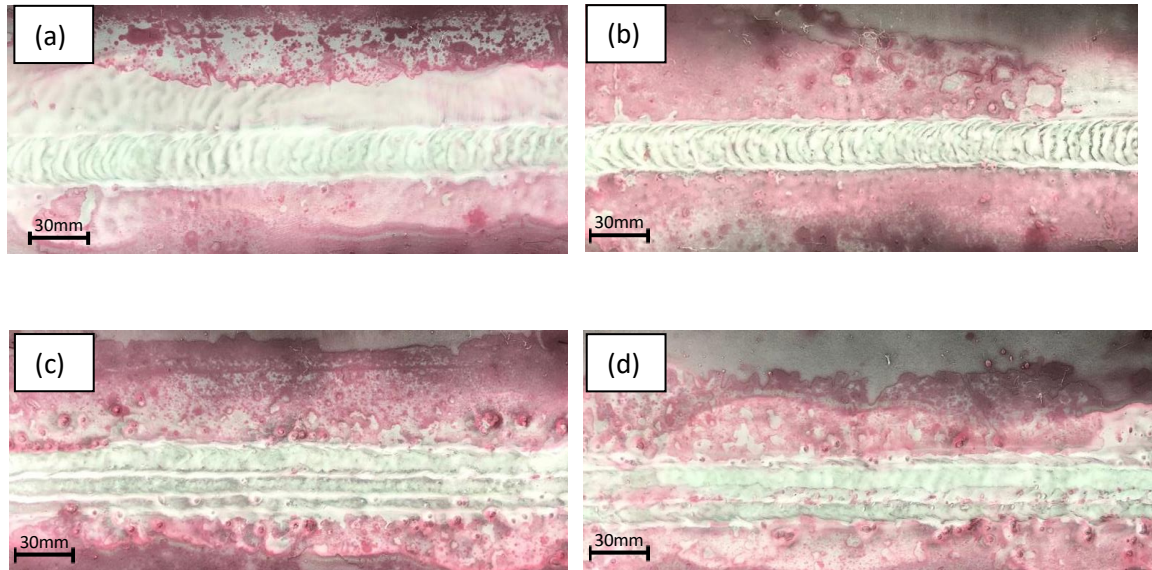


Figura 40. Ensaio de Líquidos Penetrantes dos diferentes conjuntos soldados a) Com tecimento (C1), b) Com tecimento (C2), c) Filetado (F1), d) Filetado (F2).

Outro aspecto importante do processo é a distorção observada nos corpos de prova em decorrência da contração térmica durante a soldagem (Figura 41), o que aliviou tensões residuais e evitou uma possível formação de trincas que poderiam ocorrer em serviços reais de manutenção dada a maior restrição existente nesses casos.

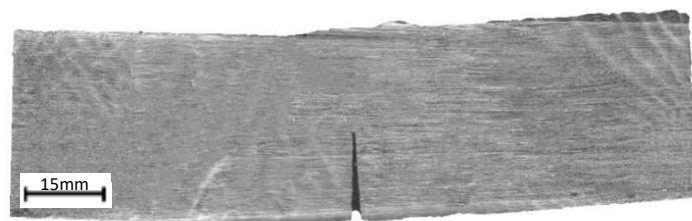


Figura 41. Distorção no corpo de prova da soldagem filetada. Fenômeno similar aconteceu em todas os conjuntos soldados.

O ângulo de distorção de todos os corpos de prova ficou próximo aos 5°, não tendo diferenças significativas entre os mesmos.

5.3 Análise Metalográfica

5.3.1 Macrografia

Pela macrografia das soldas é possível perceber que, em todos os casos houve uma falta de penetração, o que ocorreu em decorrência do chanfro de baixa abertura realizado, dificultando o processo.

A Figura 42 é referente aos corpos de prova feitos com tecimento, e, com exceção do problema da raiz, não foi observada nenhuma outra descontinuidade presente. É possível notar o revenimento que os passes subsequentes de solda fazem nos cordões anteriores, o que atua aliviando tensões na ZTA, e alterando a microestrutura bruta de fusão da Zona Fundida. Onde não ocorre esse efeito, é perceptível nas imagens a presença de grãos colunares na Zona Fundida, que constituem uma estrutura que tende a apresentar uma menor tenacidade (Marques, 2011).

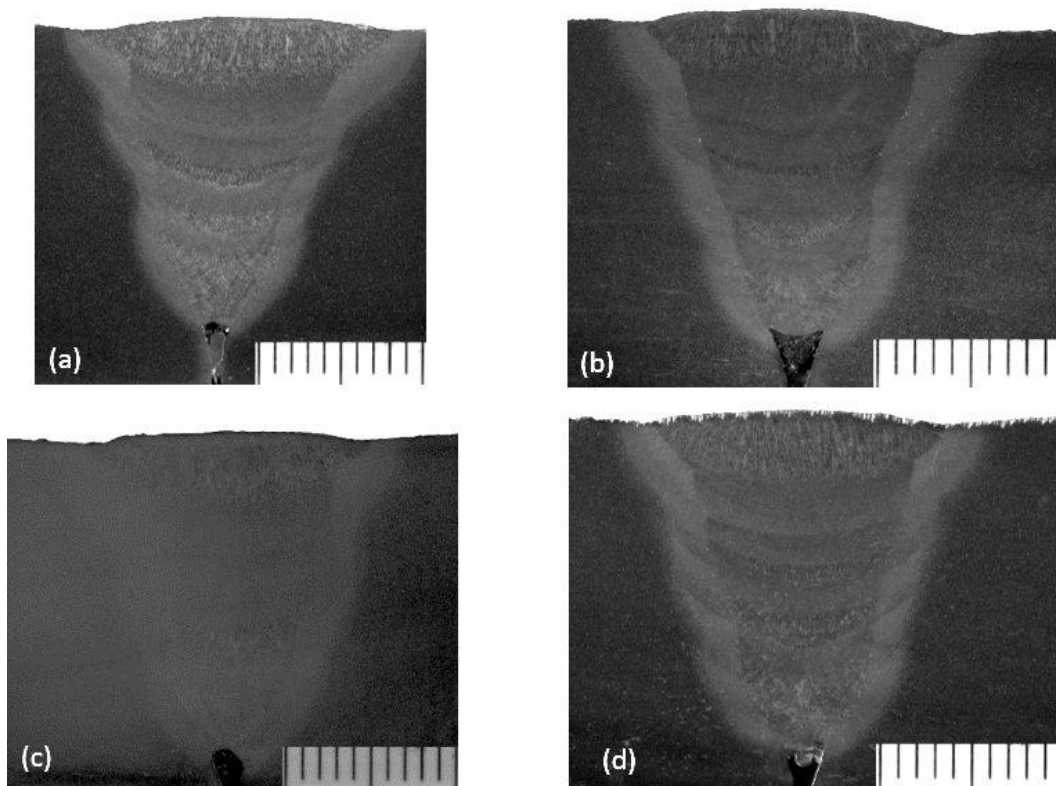


Figura 42. Macrografia dos conjuntos soldados. a) Amostra com tecimento (C1-1), b) Amostra com tecimento (C1-2), c) Amostra com tecimento (C2-1), e d) Amostra com tecimento (C2-2).

Diferente das soldas obtidas usando cordões realizados com tecimento, as macrografias das soldas feitas com cordões filetados, presentes na Figura 43, apresentam inclusão de escória em 3 das 4 seções analisadas. Durante a soldagem com essa forma de

manipulação, pode ocorrer o aparecimento de pequenas regiões profundas entre o cordão e a parede do chanfro, que são de difícil acesso para limpeza, o que é evitado com o espalhamento propiciado pela soldagem com tecimento. Esse mesmo motivo justifica o uso de um passe “extra” de acabamento nos chanfros, que além de gastar mais material e mais tempo (Tabela 5), aumenta a largura da solda.

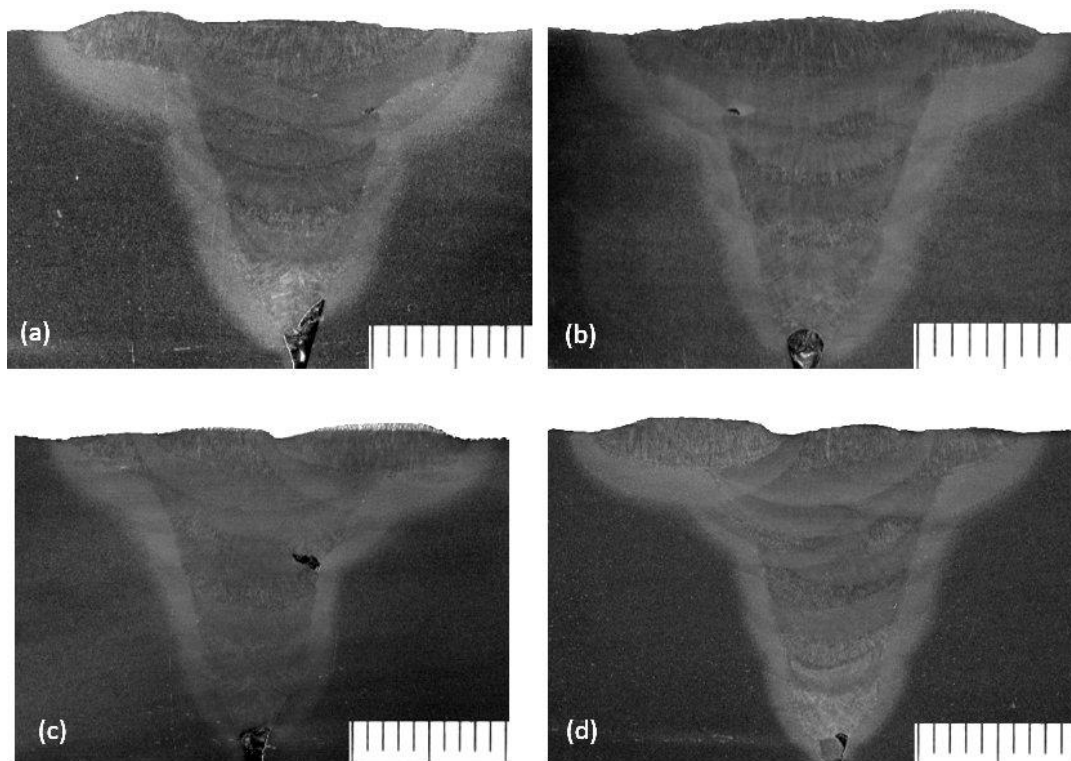
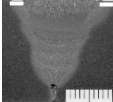
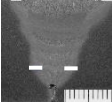
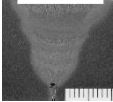
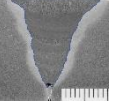
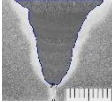
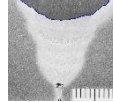


Figura 43. Macrografia dos conjuntos soldados. a) Amostra filetada (F1-1), b) Amostra Filetada (F1-2), c) Amostra Filetada (F2-1), e d) Amostra Filetada (F2-2).

As informações contidas na Tabela 6 resume o resultado das medidas feitas nas seções transversais das soldas. Apesar do maior tempo gasto por cordão nas soldas com tecimento, e a conseqüente menor velocidade de soldagem, a extensão da ZTA não teve alteração significativa. Este resultado pode ter sido favorecido pelo pré-aquecimento, que diminuiu o gradiente térmico entre a Zona Fundida e o Metal Base.

Outro ponto observado é a maior largura das soldas obtidas com o uso de cordão filetado. Nestas, foi necessário realizar os últimos passes quase que sobre chapa para garantir a qualidade superficial. Obteve-se assim, para estas soldas, uma maior diluição quando se compara as áreas da Zona Fundida entre as diferentes técnicas.

Tabela 6. Extensões das regiões da seção transversal dos conjuntos soldados.

Conjunto	ZTA a 1mm (mm)	ZTA a 15mm (mm)	Largura (mm)	Área ZF (mm ²)	Área ZF s/ Reforço (mm ²)	Área do último passe (mm ²)
						
Tecimento (Média)	2,4	1,9	17,3	153,2	142,8	48,0
Filetado (Média)	2,3	2,0	25,9	195,0	177,1	33,1

Apesar dos resultados já discutidos, um dado importante da Tabela 6 é a área da seção transversal do último passe. Quando é feita a soldagem com tecimento, essa área é substancialmente maior do que a mesma em cordão feito de forma filetada. Esse maior valor indica um maior volume da poça de fusão e uma Zona Fundida conseqüentemente maior. Dado aos grãos colunares típicos dessa região, a tenacidade do conjunto soldado pode ser prejudicada, o que pode ser crítico para sua aplicação em escavadeiras.

5.3.2 Micrografia

Com base na análise das micrografias realizadas nas amostras, observou-se que as soldas obtidas com as duas técnicas de soldagem apresentaram microestrutura similar nas mesmas regiões. Micrografias obtidas no último passe de solda, ou seja, no cordão não alterado por outros passes, assim como no Metal de Base podem ser vistas na Figura 44.

Para o Metal de Base é possível observar a presença de ferrita (regiões claras), e perlita (regiões escuras), constituintes característicos de aços baixo carbono. O formato alongado dos grãos se deve ao processo anterior de laminação, comum à produção dessas chapas.

Partindo-se do Metal Base, o início da ZTA apresenta granulação fina, indicando a ocorrência de recristalização, sendo essa uma região que alcançou temperaturas intercríticas, ocorrendo austenitização parcial do material. Ainda na ZTA, porém, próxima à Zona Fundida, a microestrutura observada é de agulhas, característica de ferrita de Widmanstätten, o que sugere um resfriamento rápido da região adjacente à solda, mesmo com o pré-aquecimento realizado, o que pode elevar a dureza da região.

Por fim, a Zona Fundida apresenta grãos colunares, que podem diminuir a tenacidade da região, além de ferrita de Widmanstätten formada no contorno de grão austenítico prévio. Também é possível notar o crescimento epitaxial do grão na interface da ZTA com a Zona Fundida, o que é característico da soldagem.

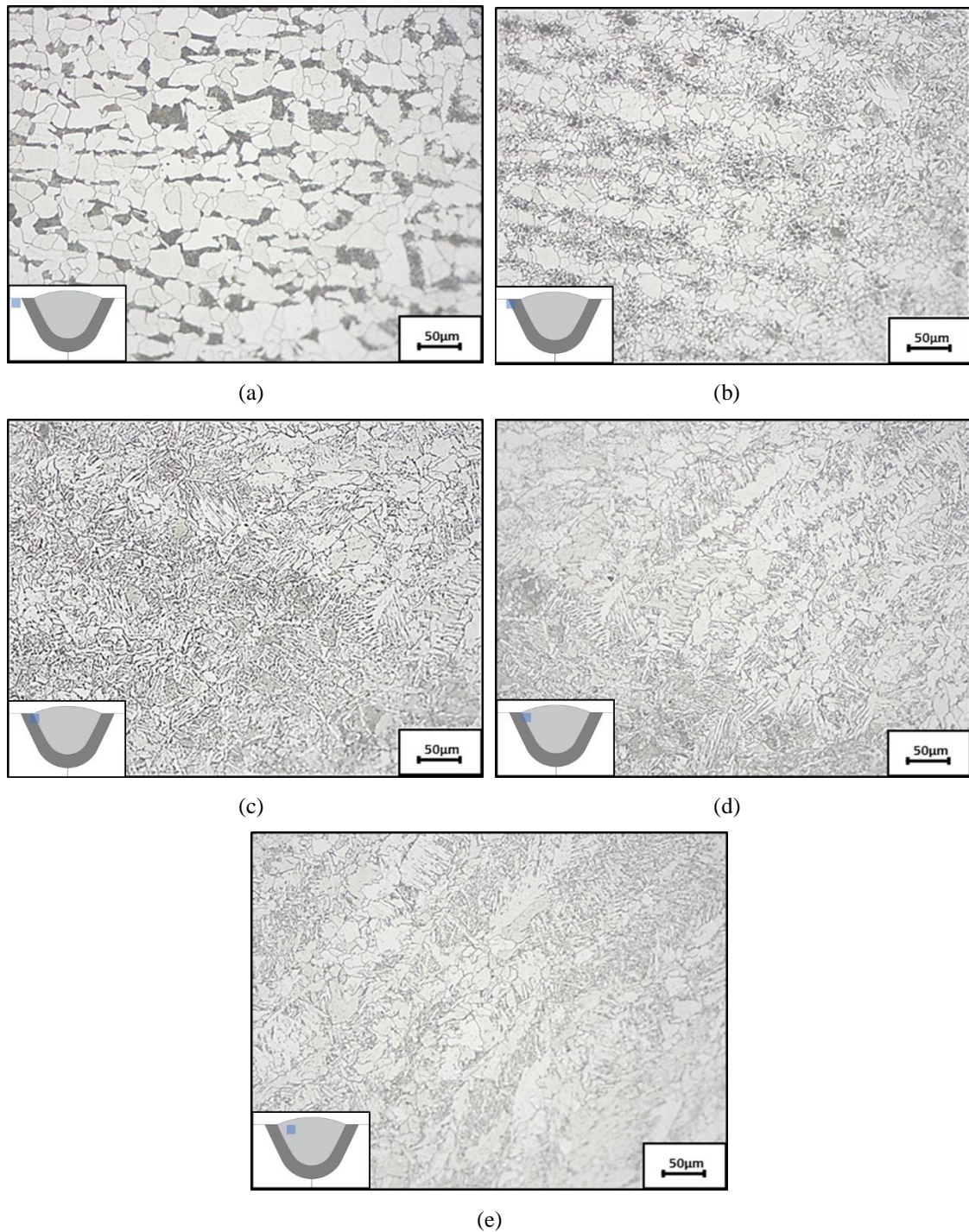


Figura 44. Micrografias com aumento de 200x das regiões do último cordão de solda a) Metal Base, b) Interface Metal Base/ZTA, c) Interface ZTA/ZF, d) Interface ZTA/ZF, e e) Zona Fundida.

A influência dos passes subsequentes na microestrutura formada nas regiões soldadas é mostrada na Figura 45, onde é possível ver as imagens relativas às regiões de ZTA e Zona Fundida com características microestruturais muito similares, com grãos refinados equiaxiais. Isso ocorre dado a elevação de temperatura do processo, fornecendo energia e tempo para ocorrência de difusão e consequente recristalização e alívio de tensões em regiões de alta energia, diminuindo sua fragilidade.

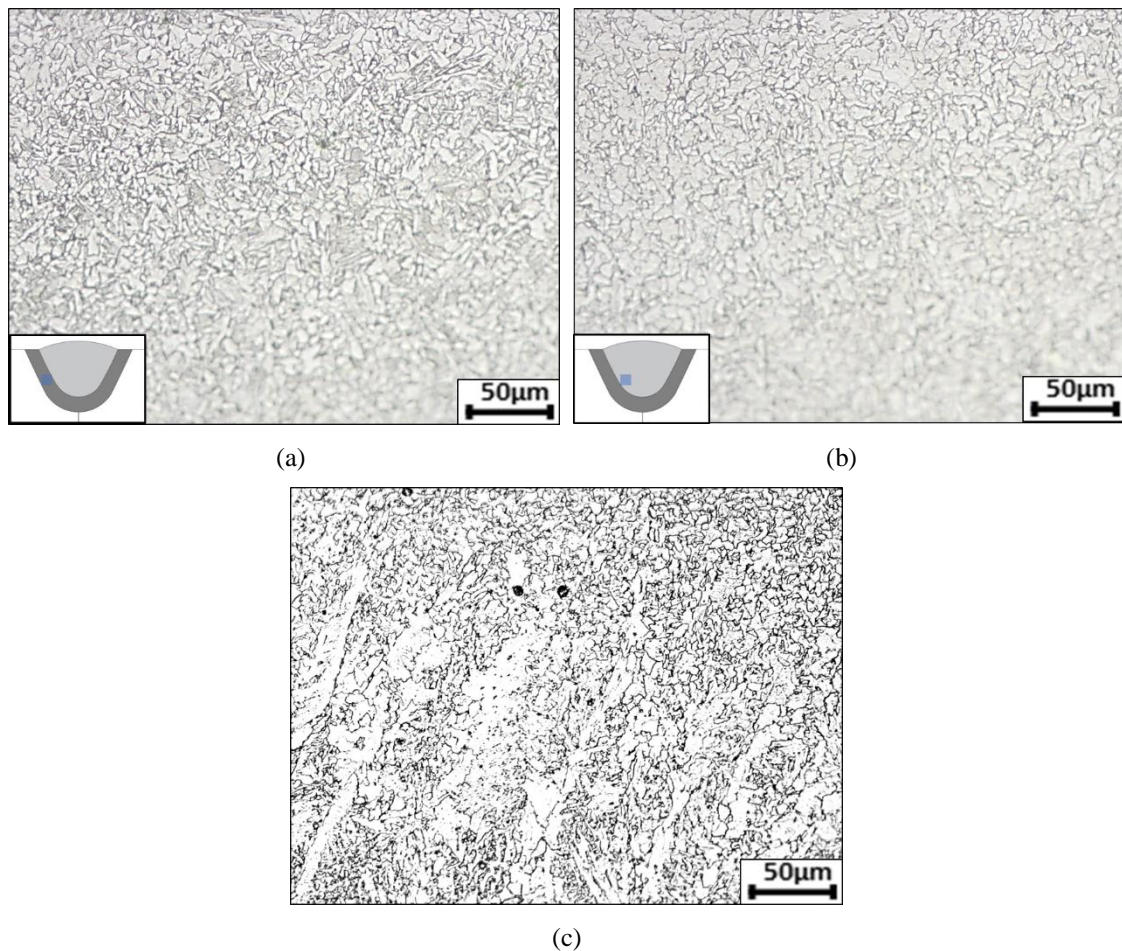


Figura 45. Micrografias das diferentes regiões de passes intermediários de soldagem. a) aumento de 200x da ZTA revenida, b) aumento de 200x da Zona fundida revenida, c) aumento de 100x da Interface da Zona Fundida revenida e Zona Fundida não revenida.

5.4 Propriedades Mecânicas

5.4.1 Ensaio de Dureza

Nas Figuras 46 a 48 são mostrados os resultados das medidas de microdureza Vickers das diferentes juntas avaliadas.

Os gráficos das Figuras 46, 47 e 48 indicam resultados similares, sendo perceptível que as durezas traçadas a 10 mm da superfície têm menor variação de seus valores ao longo de todo o perfil. Essa manutenção da dureza advém da homogeneidade microestrutural promovida pelos passes subsequentes de solda que atuam tratando termicamente a ZTA e a Zona Fundida preexistente, refinando os grãos e aliviando tensões dessas regiões.

Nesses mesmos gráficos nota-se uma elevação de dureza ao longo do perfil traçado a 1mm da superfície. Como esse perfil foi traçado no ultimo cordão, a ZTA e a Zona Fundida mantiveram suas microestruturas características, elevando-se a dureza na região da ZTA dado sua microestrutura acicular, gerada em decorrência de resfriamento mais severo.

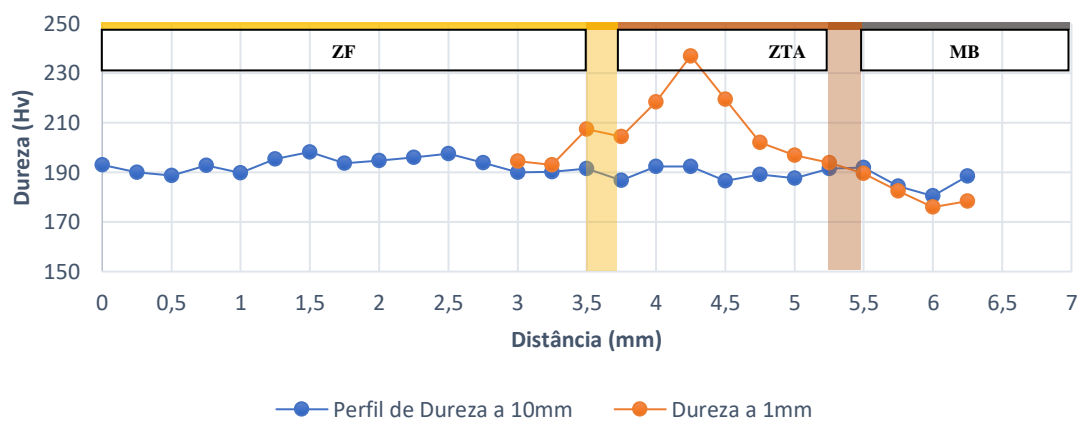


Figura 46. Microdureza Vickers para conjunto soldado com Tecimento C1.

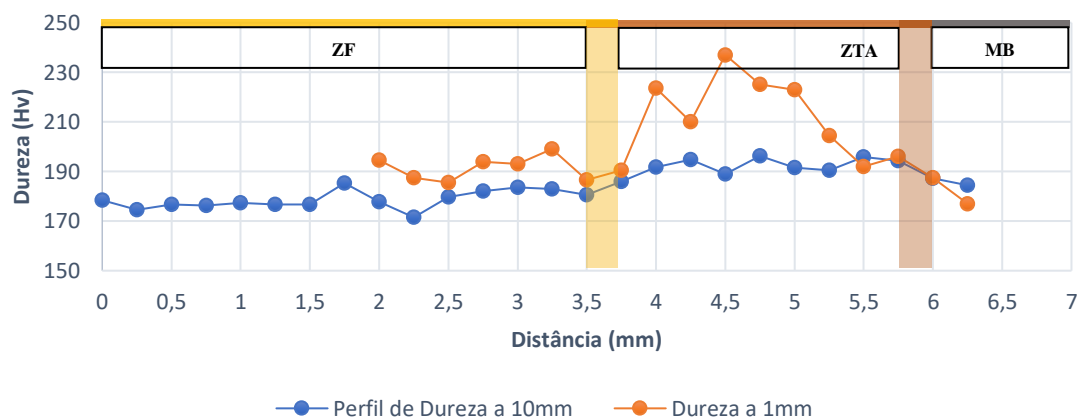


Figura 47. Microdureza Vickers para conjunto soldado com Tecimento C2.

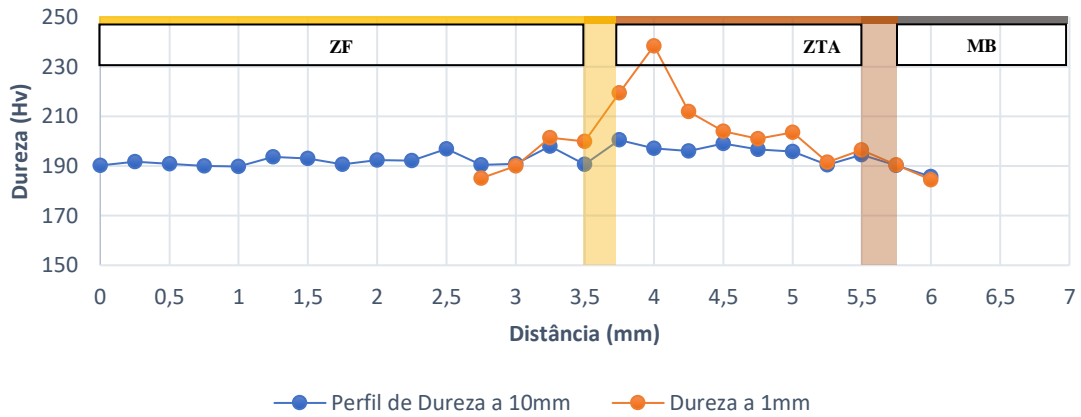


Figura 48. Microdureza Vickers para conjunto soldado Filetado F1.

No gráfico da Figura 49, diferente dos demais, tanto o perfil traçado a 10mm da superfície, quanto o perfil traçado a 1mm, apresentaram uma maior dureza, com picos da região da ZTA.

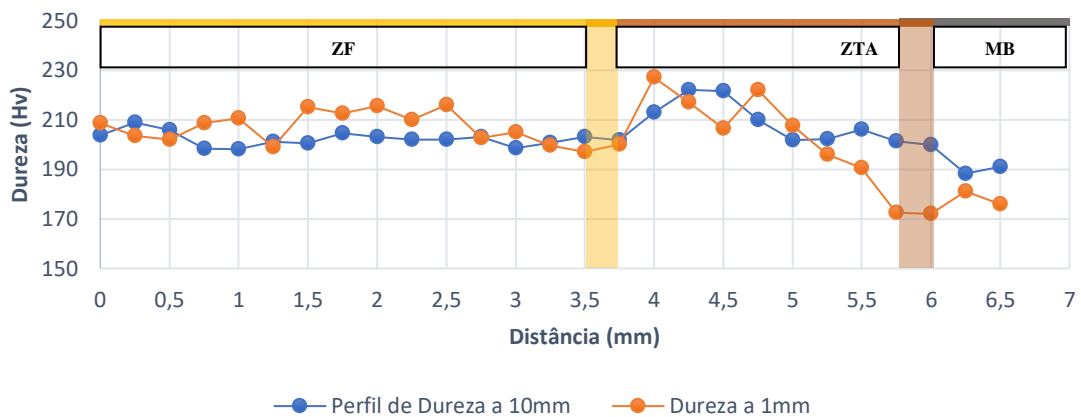


Figura 49. Microdureza Vickers para conjunto soldado Filetada F2.

O perfil de dureza encontrado na Figura 49 se justifica porque, para análise comparativa entre os diferentes conjuntos soldados, a distância pré-determinada para se traçar o perfil de dureza foi de 10 mm da superfície. Essa distância utilizada teve como objetivo levantar o perfil de dureza em uma região tratada termicamente pelos cordões posteriores realizados para o enchimento do chanfro. Contudo, para essa amostra, a uma distância de 10 mm da superfície as regiões de ZTA e Zona Fundida não foram termicamente afetadas pelos passes dados posteriormente.

A Figura 50 mostra os panoramas da seção transversal da amostra soldada com tecimento “C2” a 1 mm de distância da superfície, e a 10mm de distância da superfície, indicando a microestrutura cujo o ensaio de dureza foi realizado.

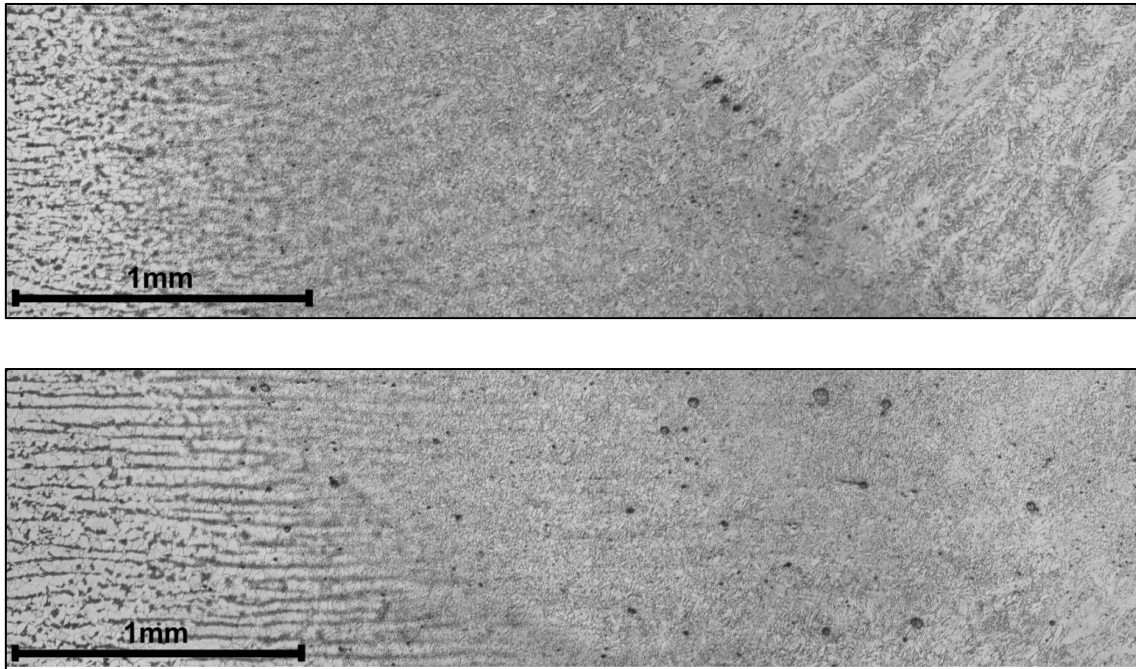


Figura 50. Panorama das regiões onde foram feitos os ensaios de dureza da amostra feita com tecimento “C1” a) 1 mm da superfície, b) 10mm da superfície.

Quando se compara os resultados dos panoramas obtidos na Figura 50 com os mesmos panoramas da seção transversal da amostra soldada filetada “F2” a 1 mm e a 10 mm da superfície (Figura 51), é notório a diferença microestrutural em que o ensaio foi realizado, justificando as diferenças obtidas nos ensaios de dureza para essa amostra.

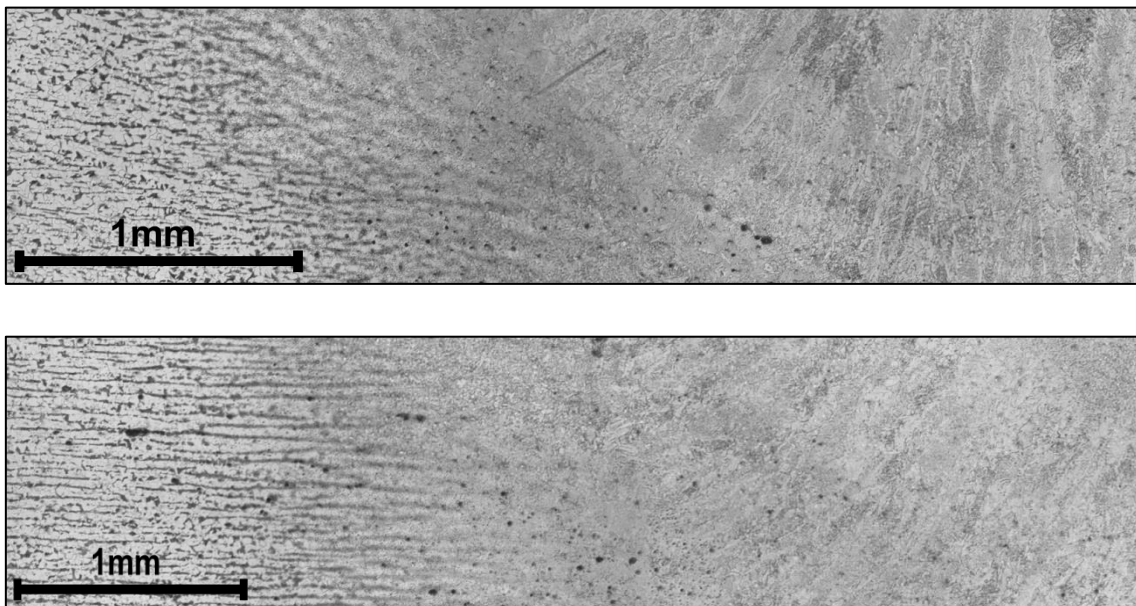


Figura 51. Panorama das regiões onde foram feitos os ensaios de dureza da amostra filetada “F2” a) 1 mm da superfície, b) 10 mm da superfície.

5.5 Análise do Ciclo Térmico de Soldagem

Com os resultados do tempo e corrente de soldagem, foram calculadas as potências e velocidades médias de soldagem para cada caso, obtendo-se assim as temperaturas de pico segundo a equação 7 (Figura 52).

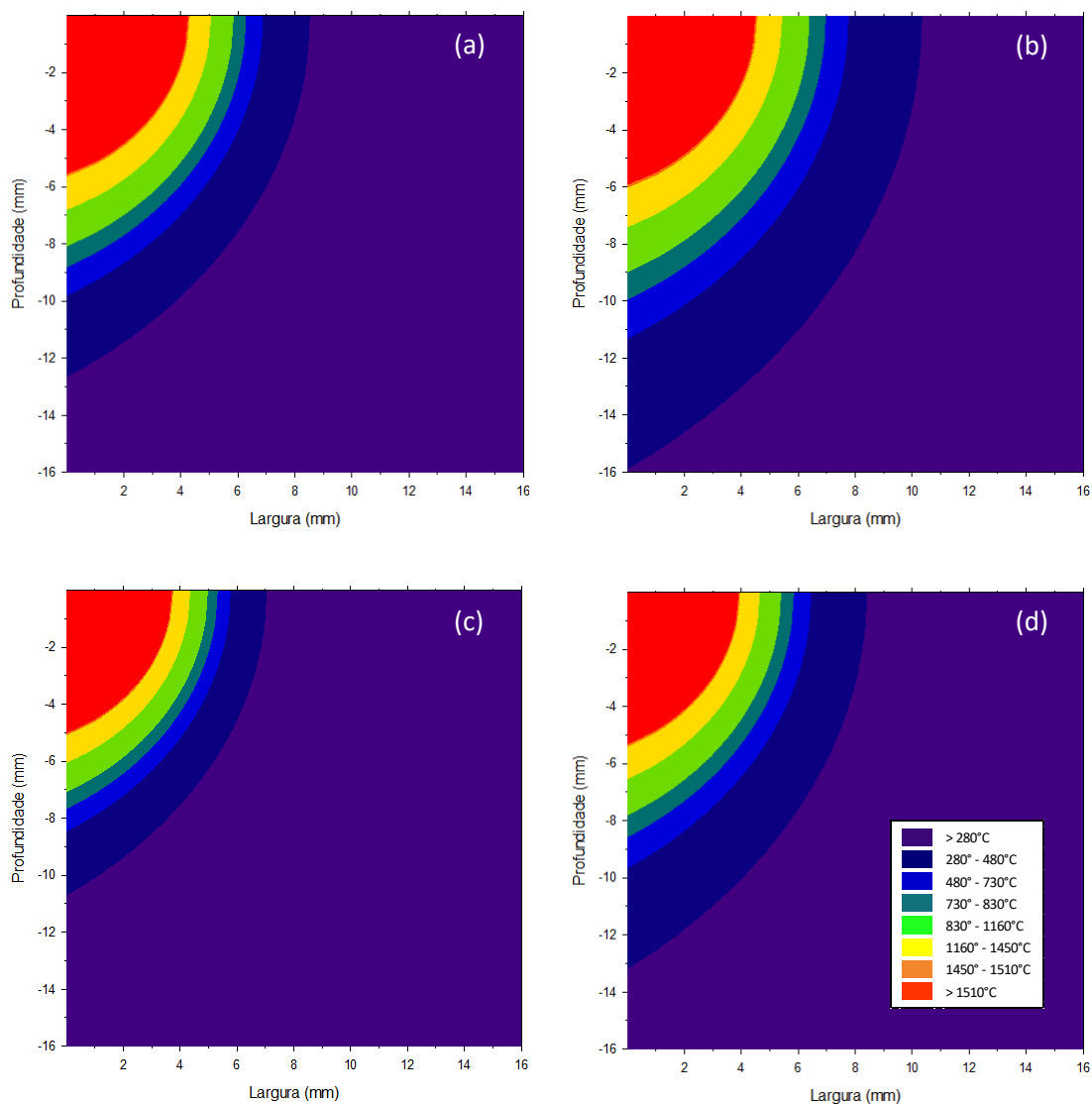


Figura 52. Simulação por Rosenthal das temperaturas alcançadas utilizando técnica de soldagem a) com tecimento a temperatura ambiente $T = 25^{\circ}\text{C}$, b) com tecimento com pré-aquecimento $T = 165^{\circ}\text{C}$, c) filetado a temperatura ambiente $T = 25^{\circ}\text{C}$, d) filetado com pré-aquecimento $T = 165^{\circ}\text{C}$.

5.5.1. Efeito do tecimento

Apesar do cálculo feito considerar somente a diferença de velocidade de soldagem entre as técnicas analisadas, utilizando como base o tempo gasto na execução de cada cordão, na soldagem com tecimento é possível notar um pequeno aumento de dimensões da

Zona Fundida, e um aumento mais significativo da extensão da ZTA. Isso ocorre dado o maior aporte térmico resultante da menor velocidade de soldagem. Esse resultado pode ser positivo para os passes intermediários, dado que essa maior extensão de ZTA atua revenindo os cordões anteriores. Como o passe de raiz não atua tratando termicamente os cordões soldados, e o passe de acabamento não será revenido por nenhum outro cordão, nesses passes não seria interessante a utilização de tecimento, pois a maior extensão de ZTA e Zona Fundida alteram as propriedades mecânicas da região.

A Tabela 7 contém os dados comparativos da extensão da Zona Fundida prevista pela equação de Rosenthal com os medidos no passe de raiz das macrografias. Foi utilizado o passe de raiz, pois nele a amplitude do tecimento não foi tão significativa, e a extensão da Zona Fundida é mais nítida para a análise macrográfica.

Tabela 7. Extensões das Zonas Fundida

Cordão	Extensão Zona Fundida Medida 1 (mm)	Extensão Zona Fundida Medida 2 (mm)	Média (mm)	Extensão Zona Fundida Calculada (mm)
Tecimento (C1)	5,88	6,25	6,18	6,00
Tecimento (C2)	6,31	6,27		
Filetado (F1)	5,30	5,85	5,58	5,40
Filetado (F2)	5,88	5,30		

A extensão da Zona Fundida feita com tecimento é 11% maior do que a feita de forma filetada. Esse resultado é o mesmo tanto para a média das medidas das peças reais, quanto para os cálculos de Rosenthal, validando o uso das equações para previsão das diferenças de temperatura de pico alcançadas em diferentes procedimentos de soldagem.

5.5.2. Efeito do pré-aquecimento

Com o pré-aquecimento, a equação prevê uma maior extensão do material que atinge temperaturas significativas para tratamento térmico dos aços, aumentando a ZTA. Nesse caso, a taxa de resfriamento será menor (o que não é previsto pela equação utilizada) acarretando em uma menor probabilidade de surgimento de microestrutura adifusional, e em uma maior extensão das regiões de recristalização e alívio de tensões. Tais fatos são benéficos para esse processo de soldagem, o que reitera a importância da execução do pré-aquecimento.

6 CONCLUSÃO

O estudo realizado sobre as diferenças na operação de soldagem com técnica operatória filetada em relação a técnica operatória com tecimento permitiu concluir que:

- Chanfros de maior área são preenchidos de forma mais rápida com tecimento, mantendo os mesmos parâmetros operacionais, pois essa técnica requer menos passes e menos operações de limpeza decorrentes;
- A operação utilizando cordões filetados deve ter uma limpeza mais criteriosa, evitando que, em regiões de difícil acesso, ocorra inclusão de escória;
- Apesar da necessidade de mais passes de soldagem para acabamento utilizando a técnica de solda filetada, o último cordão atua revenindo os anteriores, e produz por si uma zona fundida substancialmente menor, possuindo uma maior tenacidade nessa região do que o cordão de acabamento feito com tecimento. Essa propriedade é fundamental para a aplicação em manutenção de campo;
- Microestrutura e propriedades mecânicas das regiões de ZTA, Zona Fundida, ZTA revenida e Zona Fundida revenida, de ambas as técnicas de soldagem, são similares, alterando essencialmente sua extensão.
- O maior tempo gasto em cordão único com tecimento, por Rosenthal, promove uma maior extensão da ZTA mais afastada, o que pode ter um melhor efeito de alívio de tensões de cordões anteriores.
- Com os dados obtidos, recomenda-se fazer o enchimento de chanfros extensos utilizando a técnica de tecimento, e a última camada utilizando passes filetados.

7 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para complementação e continuação dos estudos sugere-se:

- Fazer ensaios de tração e impacto das amostras soldadas, verificando-se limite de resistência a tração e tenacidade;
- Fazer ensaios de fadiga, testando o conjunto soldado em condições mais próximas às operacionais;
- Realizar o procedimento de soldagem com maiores restrições, para verificação das tensões residuais em cada procedimento;
- Faz as soldas em chanfro de menores dimensões, para que esse seja preenchido com passe único, possibilitando uma melhor comparação da morfologia obtida com as diferentes técnicas de soldagem, inclusive com diferentes amplitudes de tecimento, comparando os resultados com os cálculos de ciclo térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASM HANDBOOK. **Welding Brazing and Soldering**. ASM International vol 6
2. ASTM A36 / A36M-14, **Standard Specification for Carbon Structural Steel**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
3. AWS D1.1. **Structural Welding Code – Steel**. American Welding Society (AWS), 2015.
4. AZAR, R.A. McCabe, B. **Part based model and spatial–temporal reasoning to recognize hydraulic excavators in construction images and videos**. Automation in Construction 24 (2012) p194-202.
5. BRITISH STANDARD BS EN 439:1994. **Welding consumables. Shielding gases for arc welding and cutting**. 15 Dezembro 1994.
6. BRITISH STANDARD.BS EN ISO 5817:2007. **Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections**. 31 Agosto 2007.
7. CALLISTER JR., WILLIAM D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais**, 2a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2006
8. CASTRO, MM. **Estudo da influência da adição de arame frio no processo de soldagem ao arco submerso com dois arames energizados: Aspectos operacionais e metalúrgicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – UFMG. Minas Gerais. 2017.
9. CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels. BS EN ISO 13916:1996. **Welding – Guidance on the measurement of preheating temperature, interpass temperature and preheat maintenance temperature**. London, August 1996. 5p.
10. CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels. CR ISO 15608:2000. **Welding – Guidelines for a metallic material grouping system**. 15 Junho 2000. 10p.
11. CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brussels. CR ISO 15609-1:2004. **Specification and qualification of welding procedures for metallic materials Welding procedure specification Part 1: Arc welding** Brussels Outubro 2004.

12. CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN ISO 6520-1:2007. **Welding and allied processes — Classification of geometric imperfections in metallic materials — Part 1: Fusion welding.** 2007.
13. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** ABM. 2012
14. CLOSE, D. **Improvement in Excavators.** United States Patent Office 1864
15. COLPAERT H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** Blucher 2008.
16. DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V., Berlin. **DIN EN 1011-2. Recommendations for welding of metallic materials, Part 2: Arc welding of ferritic steels.** Berlin, 2001-05. 58p.
17. HADDOCK, K. **The Earthmover Encyclopedia.** Motorbooks International. 1 Jun. 2007 320p
18. HOPPE, R.A. **Avaliação da vida em fadiga de ganchos.** 2002
19. INTERNATIONAL STANDARD. ISO 15614-1:2004. **Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.** Switzerland, 2004-06-15.
20. INTERNATIONAL STANDARD. ISO 3834-2:2005. **Quality requirements for fusion welding of metallic materials, Part 2: Comprehensive quality requirements.** Switzerland, 2005-12-15. 10p.
21. INTERNATIONAL STANDARD. ISO 4063:2009 **Welding and allied processes -- Nomenclature of processes and reference numbers.** Switzerland. 2009
22. KOMATSU. **PC5500 Hydraulic Excavator.** 2016
23. LALGR. **Guidance Notes on Inspection Thorough Examination and Testing of Lifting Appliances and Lifting Gear.** Jun. 2001
24. LEOD, J.EM. **Attachement for tractors.** United States Patent Office 1925
25. MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q. **Soldagem - fundamentos e tecnologia.** Editora UFMG, 2011. 362 p.
26. Metals Handbook, vol 6 – **Welding Brazing and Soldering,** ASM Int. 1993
27. MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais.** Apostila de Física da Soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2015. 179p.

28. MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 81 p.
29. MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. e SANTOS, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. UFMG. Belo Horizonte, 2012.
30. MODENESI, P.J. **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 24 p.
31. PATEL, B.P. PRAJAPATI, J.M. **A Review on Kinematics of Hydraulic Excavator's Backhoe Attachment**. Internation Journal of Engineering Science and Technology, 2011
32. RACIA, I.M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração**. Portp Alegre/RS 2016
33. STEVELEY, A. BISHOP, A.T. **Improvement in Horse-Power Elevators and Excavators**. 1865.