

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS FELIPE RODRIGUES DA COSTA

**ESTUDO DAS SIMULAÇÕES DE CICLOS TÉRMICOS APLICADAS À ANÁLISE
DAS ZONAS TERMICAMENTE AFETADAS NA SOLDAGEM DE AÇOS TMCP**

LONDRINA

2023

MATHEUS FELIPE RODRIGUES DA COSTA

**ESTUDO DAS SIMULAÇÕES DE CICLOS TÉRMICOS APLICADAS À ANÁLISE
DAS ZONAS TERMICAMENTE AFETADAS NA SOLDAGEM DE AÇOS TMCP**

**Study of thermal cycle simulations Applied to the analysis of thermally affected
zones in the welding of tmcp steels**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa.

LONDRINA

2023



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS FELIPE RODRIGUES DA COSTA

**ESTUDO DAS SIMULAÇÕES DE CICLOS TÉRMICOS APLICADAS À ANÁLISE
DAS ZONAS TERMICAMENTE AFETADAS NA SOLDAGEM DE AÇOS TMCP**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/outubro/2023

Prof. Dr. Genaro Marcial Mamani Gilapa
Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

LONDRINA

2023

Dedico este trabalho à minha família e amigos, que apoiaram e me incentivaram nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares e amigos que sempre estiveram ao meu lado nas horas mais difíceis e felizes da minha vida, em especial, pela força e compreensão.

A minha prezada orientadora Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa, pela paciência, dedicação e compreensão.

Por fim, agradeço a todos que diretamente ou indiretamente fizeram parte dessa importante fase de minha vida.

RESUMO

Os materiais metálicos, em particular os aços, possuem lugar de destaque nos mais diversos setores da engenharia. Sua produção cresce a cada ano e, junto a este crescimento, tem-se a modernização dos meios de produção e manufatura que buscam otimização dos custos e tempo de fabricação. Dentre os aços mais utilizados em função das elevadas responsabilidades de engenharia destacam-se os aços TMCP (*Thermo-Mechanical Control Process*) onde na rota de processamento e manufatura, o processo de soldagem está diretamente ligado à sua produtividade. Tal processo em especial está relacionado a uma das características mais essenciais que esses aços devem apresentar, boa soldabilidade. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a eficácia de um dos ensaios mais utilizado para o estudo da soldabilidade, a simulação física de ciclos térmicos de soldagem via equipamento Gleeble® e, discutir sobre a influência de diferentes ciclos térmicos na microestrutura e propriedade dos aços TMCP, em especial dos aços pertencentes ao sistema Nb-Cr-Mo da especificação API 5L X-80, que advém de uma rota de processamento que garante características únicas ao material que precisam ser minimamente reproduzidas nas juntas soldadas. Assim, foi abordado grande parte do processo analítico que envolve os estudos de simulação de ciclos térmicos no equipamento Gleeble®, mostrando sua eficácia e importância para tais estudos e observada as principais características esperadas para um material que passa pela soldagem em diferentes aportes térmicos, diretamente relacionado aos custos de produção.

Palavras-chave: aços TMCP; Gleeble®; aporte térmico; zona termicamente afetada.

ABSTRACT

Metallic materials, particularly steels, play a prominent role in various engineering sectors. Their production grows every year, and with this growth, there is a modernization of production and manufacturing methods that seek to optimize costs and manufacturing time. Among the steels most commonly used due to their high engineering responsibilities are TMCP steels (Thermo-Mechanical Control Process), where the welding process is directly linked to their productivity. This specific process is related to one of the most essential characteristics that these steels must exhibit: good weldability. In this context, the present work aims to analyze the effectiveness of one of the most commonly used tests for studying weldability, the physical simulation of welding thermal cycles using the Gleeble® equipment, and to discuss the influence of different thermal cycles on the microstructure and properties of TMCP steels, especially those belonging to the Nb-Cr-Mo system of API 5L X-80 specification. These steels are processed in a way that ensures unique characteristics, which need to be minimally reproduced in the welded joints. Thus, a significant part of the analytical process involving the simulation of thermal cycles on the Gleeble® equipment was addressed, demonstrating its effectiveness and importance for such studies, and observing the main characteristics expected for a material that undergoes welding at different heat inputs, directly related to production costs

Keywords: TMCP steels; Gleeble®; thermal input; thermally affected zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático da influência do resfriamento acelerado na microestrutura de aços microligados durante um TMCP	18
Figura 2 – Solda teórica ideal pela aproximação de duas superfícies perfeitamente planas	19
Figura 3 – Relação entre energia interatômica e a distância interatômica em função do raio atômico	20
Figura 4 – Representação esquemática dos tipos de solda. (a) Soldagem por pressão. (b) Soldagem por fusão	21
Figura 5 – Ciclo térmico pelo qual os materiais submetidos ao processo de soldagem passam	23
Figura 6 – Diagrama de Graville	27
Figura 7 – Escopo da metalurgia de soldagem	29
Figura 8 – Repartição térmica das diferentes regiões de uma solda por fusão. A – Zona Fundida (ZF). B – Zona Termicamente Afetada (ZTA). C – Metal Base (MB)	30
Figura 9 – Crescimento dos grãos de uma solda autógena em um aço ferrítico. A linha pontilhada marca a fronteira entre a ZTA e a ZF	31
Figura 10 – Regiões de um cordão de solda em função da temperatura	32
Figura 11 – Mapa de parâmetros de influência sobre a ZTA	35
Figura 12 – Equipamento Gleeble® 3800	37
Figura 13 – Corpo de prova fixado entre as garras do equipamento	38
Figura 14 – Fluxograma de pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.....	39
Figura 15 – Heterogeneidade ao longo de um corpo de prova soldado em escala real. ZTAGR: grãos refinados da ZTA; ZTAGG: grãos grosseiros da ZTA; MS: metal de solda	41
Figura 16 – Correlação entre a temperatura de pico e a microestrutura formada na região de uma junta soldada com base no diagrama Fe-C	43
Figura 17 – Comparação entre o ciclo programado e o ciclo simulado de Carvalho (2016)	44
Figura 18 – Comparação entre o ciclo programado e o ciclo simulado de Andia (2012)	45
Figura 19 – Comparação entre (a) região próxima ao termopar, e (b) região na extremidade aposta ao termopar	46
Figura 20 – Perfil térmico ao longo de um corpo de prova durante ciclos térmicos de soldagem no equipamento Gleeble®	47
Figura 21 – Influência de diferentes aportes térmicos na simulação de ciclos de soldagem	48
Figura 22 – Microestrutura do metal base utilizado no trabalho de Carvalho (2016)	48
Figura 23 – Microestrutura das diferentes amostras sujeitas aos ciclos térmicos de soldagem para os aportes térmicos de (a) 0,5 kJ/mm, (b) 1,0 kJ/mm, (c) 1,5 kJ/mm, (d) 2,0 kJ/mm, (e) 2,5 kJ/mm e (f) 3,0 kJ/mm	49
Figura 24 – Imagens de MEV com aumento de 1000x para um material base que será sujeito ao processo de soldagem (a) indica indícios de perlita (b) indica indícios de martensita	50

Figura 25 – Imagens de MEV das condições simuladas com aumento de 5000x e ataque com Ikawa de (a) 0,5 kJ/mm, (b) 1,0 kJ/mm, (c) 2,5 kJ/mm e (d) 3,0 kJ/mm	52
Figura 26 – Microestruturas simuladas com aporte térmico de 1,2 kJ/mm e com Tp2 aplicada de (a) 1200°C, (b) 1000°C, (c) 800°C e (d) 600°C	53
Figura 27 – Curvas de transição dúctil x frágil para diferentes aportes térmicos simulados em comparação com o metal base	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eficiência térmica de alguns processos de soldagem.....	22
Tabela 2 - Variáveis utilizadas pelos trabalhos abordados.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AT	Aporte térmico
AWS	<i>American Welding Society</i>
CCT	<i>Continuous Cooling Transformation</i>
GRZTA	Grão Refinados da ZTA
IABr	Instituto Aço Brasil
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
MB	Metal base
MET	Microscópio eletrônico de transmissão
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MS	Metal de solda
TMCP	<i>Thermo-Mechanical Control Process</i>
WSA	<i>World Steel Association</i>
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada
ZTAGG	Zona termicamente afetada de grãos grosseiros
ZTAGR	Zona termicamente afetada de grãos refinados

LISTA DE SÍMBOLOS

r_0	Separação interatômica
H	Aporte térmico
V	Tensão aplicada
I	Corrente elétrica
v	Velocidade de soldagem
η	Eficiência do processo de soldagem
η	Eficiência de transferência do arco elétrico
k	Condutividade térmica
ρ	Densidade
c	Calor específico
T	Temperatura
T_0	Temperatura ambiente ou de preaquecimento
h	Espessura da chapa ou peça
C_{eq}	Carbono equivalente
T_p	Temperatura de pico
T_f	Temperatura de fusão
T_c	Temperatura crítica
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
VA	Velocidade de aquecimento
t_{Tp}	Tempo de permanência na temperatura de pico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivo Geral	15
1.3.1	Objetivos específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Aços TMCP	17
2.1.1	Processamento termomecânico controlado	17
2.2	Soldagem	19
2.2.1	Aporte térmico	21
2.2.2	Ciclos térmicos	22
2.2.3	Soldabilidade.....	25
2.3	Metalurgia da soldagem	28
2.3.1	Zona Fundida (ZF).....	30
2.3.2	Zona Termicamente Afetada (ZTA).....	31
2.3.3	Descontinuidades nos processos de soldagem	33
<u>2.3.3.1</u>	<u>Trincas induzidas por hidrogênio nos aços TMCP</u>	<u>33</u>
<u>2.3.3.2</u>	<u>Amaciamento da Zona Termicamente Afetada (ZTA)</u>	<u>34</u>
<u>2.3.3.3</u>	<u>Tenacidade da Zona Termicamente Afetada (ZTA)</u>	<u>34</u>
2.4	Simulações Físicas de Ciclos Térmicos	35
2.4.1	Ensaio Gleeble®.....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Simulações Físicas Obtidas Através do Equipamento Gleeble®	42
4.2	Comparação dos ciclos térmicos simulados e programados	44
4.3	Dificuldades Encontradas das Simulações Térmicas	45
4.4	Influências do Aporte Térmico na Microestrutura	47
4.5	Influências do Aporte Térmico na Resistência ao Impacto	54
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Durante toda a história do ser humano, os materiais metálicos, em particular os aços, tiveram um lugar de destaque nos mais diversos setores da engenharia. Em função das suas propriedades, são utilizados nas mais variadas aplicações. Assim, de acordo com a Associação Mundial do Aço (WSA – *World Steel Association*) a produção mundial de aço atingiu 1,95 bilhão de toneladas em 2021, sendo 3,7% maior que a produção no mesmo período de 2020. No Brasil, segundo o Instituto Aço Brasil (IABr), a produção de aço bruto em 2021 foi de 36 milhões de toneladas, com uma alta de 14,7% em relação ao ano anterior.

Junto com esse crescimento da produção de aço, vem também a modernização dos meios de produção que, tem como objetivo, a otimização dos custos e tempo de fabricação. Assim, a engenharia de fabricação ocupa uma posição de destaque no cenário industrial, particularmente nos setores de transporte e de geração de energia limpa. Estes setores têm em comum a busca pela máxima eficiência, produtividade, segurança e a proteção do meio ambiente (SANTOS; FARIA; BATALHA, 2015; BORBA; MODENESI, 2019).

A busca por meios de transportes mais eficientes e por novas alternativas de geração de energia limpa tem sido um dos principais eixos de pesquisa entre as grandes potências mundiais. Neste cenário, a indústria naval e a eólica entram em foco, passando por processos de modernização dos seus meios de produção, objetivando redução de custos, tempo de fabricação, redução de pesos estruturais para as embarcações e consequentemente redução das emissões atmosféricas (BORBA; MODENESI, 2019). Dentre os países mais avançados nestas pesquisas, o Japão se destaca sendo um dos maiores fabricantes de embarcações de grande porte e de torres eólicas no mundo. Isso se deve principalmente pelo uso de aços do tipo TMCP (*Thermo-Mechanical Control Process*), do qual o Japão foi pioneiro na produção e aperfeiçoamento. Desenvolvidos em meados da década de 1970, estes aços proporcionam principalmente a exploração dos processos de soldagem com elevados aportes térmicos, resultando em um aumento da produtividade nas etapas de soldagem durante a fabricação (IMAI, 2008).

No Brasil, com a descoberta do pré-sal, após anos de estagnação, a indústria naval foi impulsionada por grandes investimentos para a exploração de petróleo em

águas profundas, no início dos anos 2000. Já a energia cinética dos ventos, só começou a ser explorada após redução dos reservatórios hídricos, que ocorreu a partir de 2009. Embora muitos investimentos para o desenvolvimento do setor eólico e naval nacional tenham sido feitos nas últimas décadas, a falta de mão de obra qualificada e falta de conhecimento ainda são um problema para a pesquisa e desenvolvimento destes setores, dificultando o desenvolvimento de novos materiais, de novas tecnologias e, conseqüentemente, novos projetos de otimização das operações de soldagem por exemplo, empregadas tanto na fabricação de navios de grande porte, quanto nos aerogeradores (BORBA; MODENESI, 2019).

No processamento e manufatura dos materiais metálicos utilizados por estas indústrias os processos de soldagem para a união de partes estão diretamente ligados a produtividade. Dando ênfase a este processo, o entendimento da soldabilidade (capacidade do material de ser soldado e manter suas características microestruturais e mecânicas) necessita de maior compreensão. A soldagem envolve diferentes parâmetros que devem ser ajustados de acordo com o material a ser unido e a avaliação da influência de cada um deles nas propriedades finais da junta soldada pode tornar-se uma tarefa muito custosa e trabalhosa. Assim sendo, este trabalho propõe a análise de resultados obtidos pelo método da simulação de ciclos térmicos como objeto de estudo de soldabilidade e determinação de parâmetros de soldagem para os aços do tipo TMCP que possuem aplicações tecnológicas de elevado apreço pela engenharia (ANDIA, 2012).

1.2 Justificativa

A utilização de processos de soldagem para a junção de partes é indispensável na produção e manufatura de componentes metálicos. Estes processos envolvem a aplicação de uma elevada quantidade de energia sobre um pequeno volume de material, provocando a coalescência das partes a serem unidas. O aumento desta energia utilizada na soldagem é uma das alternativas adotadas pelos fabricantes para aumentar a produtividade. No entanto, os ciclos térmicos gerados no processo podem provocar transformações microestruturais prejudiciais à tenacidade na zona afetada pelo calor, reduzindo a confiabilidade e segurança destas uniões (SCHWANKE, 2017; BORBA; MODENESI, 2019).

Os materiais destinados a aplicações que envolvem o processo de soldagem devem passar por uma avaliação criteriosa de suas propriedades e desempenho.

Dentre estas propriedades, pode ser citada a soldabilidade, capacidade do material de ser soldado e manter características essenciais a sua utilização (FIGUEIREDO; ET AL, 2012).

Diversos avanços da fabricação de componentes soldados só foram possíveis após o emprego dos aços produzidos via TMCP (*Thermo-Mechanical Control Process*). Trabalhos de pesquisa e desenvolvimento indicam a superioridade destes aços em relação aos aços convencionais, principalmente em termos de soldabilidade. Assim, quanto melhor soldabilidade um material apresentar, maiores são as possibilidades de exploração da soldagem como processo, resultando em otimizações significativas para a indústria (BORBA, 2019).

Para mensurar as características e avaliar a microestrutura de materiais sujeitos ao processo de soldagem, as simulações físicas dos ciclos térmicos têm sido amplamente utilizadas por empresas e institutos de pesquisa. Assim, o simulador termomecânico Gleeble® é uma ferramenta muito útil nestes estudos, já que pode reproduzir em pequena escala os processos de conformação industrial. Esse equipamento atua com forças de deformação e controle de temperatura podendo executar ensaios de tração, compressão e torção com aquecimento e resfriamento. Ensaios realizados com ausência das forças de deformação podem ser utilizados para simular ciclos térmicos, fundamentais para estudo de materiais soldados (SANTOS; FARIA; BATALHA, 2015; BORBA, 2019).

A importância desse trabalho está na realização de uma pesquisa e discussão sobre o uso de simulação de ciclos térmicos para desenvolvimento de processos de soldagem, principalmente para aços obtidos por TMCP.

1.3 Objetivo Geral

Analisar a eficácia das simulações físicas de ciclos térmicos de soldagem a partir de dados da literatura, trazendo uma discussão sobre as influências dos diferentes aportes térmicos aplicados na microestrutura dos aços TMCP.

1.3.1 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão sobre os principais conceitos que envolvem o processamento e a metalurgia de soldagem dos aços TMCP;

- Constatar as etapas necessárias para uma análise concreta de juntas soldadas submetidas aos ciclos térmicos da soldagem;
- Discutir os principais erros operacionais atrelados aos estudos das simulações de ciclos térmicos na soldagem;
- Analisar a influência dos diferentes ciclos térmicos na microestrutura do material;
- Avaliar a eficácia da ferramenta Gleeble® para a pesquisa e desenvolvimento dos processos de soldagem;
- Analisar o efeito da morfologia resultante dos ciclos térmicos na soldabilidade de aços TMCP.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A ciência por trás da fabricação de aços com propriedades refinadas é conhecida há muitos anos, envolvendo as rotas tradicionais de laminação e algumas técnicas de tratamento térmico. Porém, estes métodos não eram suficientes para atingir os atributos desejados. Por conta disso, longas décadas de pesquisa foram necessárias para o desenvolvimento do processamento termomecânico.

2.1 Aços TMCP

Os aços TMCP surgiram de uma inovação metalúrgica bem-sucedida em que a associação do endurecimento por deformação e as técnicas de tratamento térmico foram combinadas para obter elevado controle microestrutural e, conseqüentemente, aprimoramento das propriedades de engenharia destes materiais (SARKAR; PANDA, 2012).

Estes aços foram projetados com o intuito de fornecer melhores propriedades que as dos aços carbono convencionais. Dentre suas principais características está a elevada resistência mecânica, conformabilidade, tenacidade e excelente soldabilidade, sendo que a composição química representa um dos fatores essenciais para alcançar estas características, e pode variar de acordo com os requisitos que sua finalidade exige (ANIJDAN; SABZI, 2018; SANITÁ, 2017).

2.1.1 Processamento termomecânico controlado

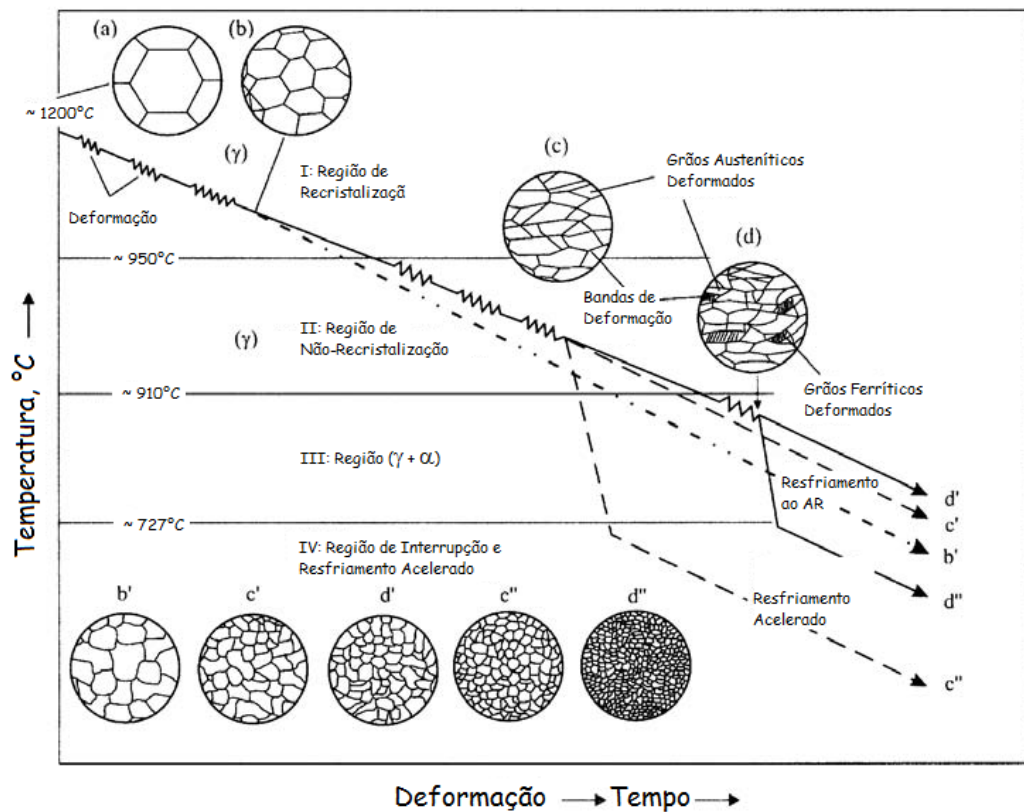
O processamento termomecânico controlado (TMCP – *Thermo-Mechanical Control Process*) já foi industrializado com sucesso e pode ser definido como um conjunto de processos de deformação mecânica sob condições contínuas de resfriamento e controle da temperatura, visando a obtenção de microestruturas refinadas (HALFA, 2014).

Este processo pode ser dividido em quatro etapas. A primeira etapa envolve o aquecimento do material em temperaturas próximas a 1200°C (temperatura de austenitização), onde ocorre a dissolução dos elementos de liga, além de um incremento nos tamanhos de grão da austenita. Após aquecimento, os passes de laminação a quente se iniciam, dando origem aos grãos de austenita deformados e precipitados de carbeto e nitreto (a partir dos elementos de liga presentes) induzidos por deformação. Estes precipitados atuam no controle da evolução microestrutural

durante o TMCP, ancorando-se nos contornos de grão austeníticos, retardando sua recristalização e mantendo a austenita deformada. O que leva à segunda etapa, estágio onde já não ocorre recristalização da austenita pela presença dos precipitados e pela temperatura de trabalho (aproximadamente 950°C, temperatura de não recristalização), formando grãos deformados com forma achatada (HALFA, 2014; SANITÁ, 2017).

Na terceira etapa, a faixa de temperatura de trabalho fica entre a de início de formação da ferrita e fim da sua transformação (entre 900 e 700°C), caracterizada pela nucleação de ferrita dentro dos limites dos grãos de austenita e deformação da ferrita já formada. Por fim, na quarta e última etapa, uma variedade de microestruturas pode ser obtida durante o resfriamento, dependendo da taxa de resfriamento e do estágio em que a deformação estrutural se encontra (HALFA, 2014; SANITÁ, 2017). Algumas das diferentes microestruturas obtidas a partir do resfriamento acelerado durante o TMCP podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama esquemático da influência do resfriamento acelerado na microestrutura de aços microligados durante um TMCP



Fonte: Adaptado de SKOBIR (2011)

2.2 Soldagem

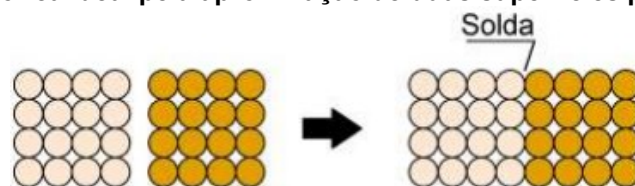
Segundo a Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society* – AWS), a soldagem é definida como o “processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”.

A soldagem é um dos processos industriais de fabricação mais importantes de peças metálicas. Além de ser indispensável para a união permanente de materiais metálicos, também é utilizada na recuperação de peças deterioradas, deposição de revestimentos sobre superfícies e corte, uma vez que os aspectos térmicos destas operações têm grande semelhança ao processo de soldagem. O sucesso da soldagem está associado principalmente à sua relativa simplicidade operacional.

Por outro lado, apesar desta simplicidade, este processo envolve a aplicação de uma elevada quantidade de energia térmica sobre um pequeno volume de material, provocando mudanças estruturais e conseqüentemente alteração das propriedades na região e nas proximidades da solda. A incompreensão dos efeitos da solda no material pode resultar em diversos problemas, desde atrasos na fabricação e gastos inesperados com a perda de materiais e reprocesso, até riscos de vida, quando o problema é levado às últimas conseqüências em componentes de alta responsabilidade (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Uma união por solda nada mais é do que a atração e formação de ligações químicas entre duas superfícies que estavam separadas. De uma maneira ideal, com a aproximação de duas superfícies totalmente planas, sem a presença de rugosidade superficial ou qualquer outro tipo de barreira como óxidos, umidade ou poeira, apenas a energia interatômica seria necessária para formar ligações permanentes entre as superfícies, como ilustrado na Figura 2 (CARPENEDO, 2014).

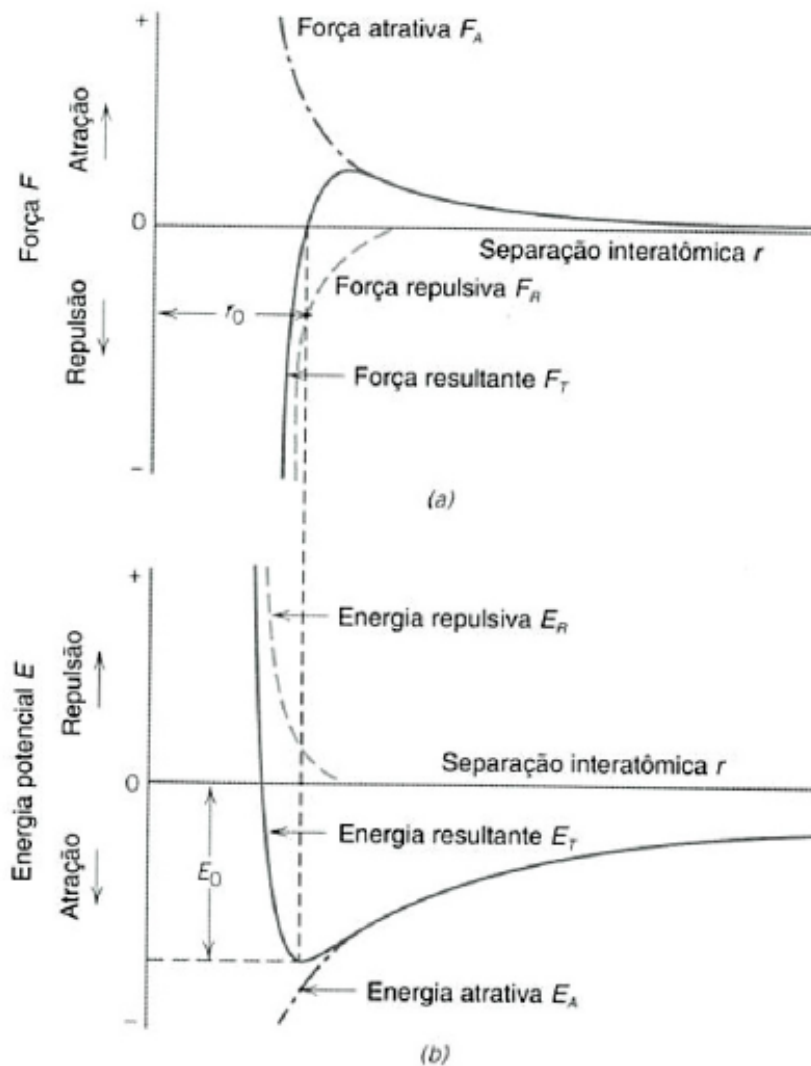
Figura 2 – Solda teórica ideal pela aproximação de duas superfícies perfeitamente planas.



Fonte: MODENESI; MARQUES; SANTOS (2012)

Esta atração existente entre duas superfícies é explicada pela Figura 3, onde observa-se que átomos, quando próximos o suficiente, a uma distância r_0 , a energia do sistema é mínima (CALLISTER, 2002).

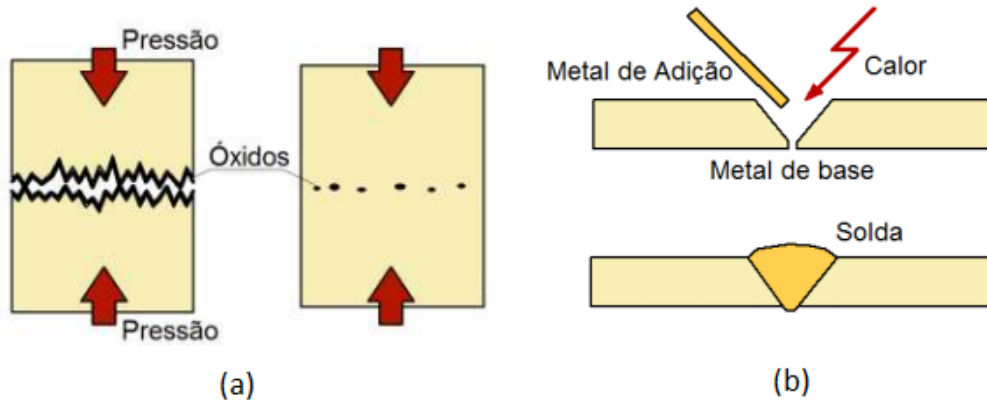
Figura 3 – Relação entre energia interatômica e a distância interatômica em função do raio atômico



Fonte: CALLISTER (2002)

Atualmente, trabalhos a nível atômico já são possíveis, porém, este processo de união ideal, sem a adição de energia térmica, ainda não é possível. Para superar estes obstáculos, são utilizadas técnicas que forçam esta união, podendo ser realizada por meio da aplicação de pressão, causando a coalescência das superfícies, ou de energia térmica, provocando a fusão e difusão do material, formando a junta soldada, como esquematizada na Figura 4 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012; CARPENEDO, 2014).

Figura 4 – Representação esquemática dos tipos de solda. (a) Soldagem por pressão. (b) Soldagem por fusão



Fonte: Adaptado de MARQUES (2009)

2.2.1 Aporte térmico

Os processos de soldagem por fusão são caracterizados pela utilização de uma fonte intensa de calor, o que pode gerar elevados gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, mudanças microestruturais que refletem nas propriedades do material que é submetido a este processo. Por conta disso, o estudo da transferência de calor em uniões soldadas é de grande relevância, onde os fatores que compõe este estudo envolvem: o aporte de energia ou de calor fornecido à junta soldada (aporte térmico), o rendimento do arco elétrico, o fluxo de calor desenvolvido durante a soldagem (ciclos térmicos), o tempo de permanência da solda nas elevadas temperaturas e a velocidade de resfriamento (SCHWANKE, 2017; PERINI, 2008).

O aporte térmico pode ser definido como a energia concedida à junta soldada por unidade de comprimento. Na soldagem a arco elétrico, considerando-se o arco formado como única fonte de calor, pode-se expressar essa energia de soldagem como na Equação 1 (SCHWANKE, 2017):

$$H = \left(\frac{V \cdot I}{v} \right) \eta \quad (1)$$

Onde: H é o aporte térmico (J/mm), V é a tensão aplicada (V), I é a corrente elétrica (A), v é a velocidade de soldagem (mm/s) e η é a eficiência do processo de soldagem (%) (CASTRO, 2011). Como a energia de soldagem não é transferida integralmente para a fusão do material, sendo dissipada por vários mecanismos, se

faz necessária que a eficiência do processo esteja presente neste cálculo, sendo determinado por uma relação entre a energia total fornecida ao arco e a energia efetiva absorvida pelo material (RODRIGUES, 2013). A eficiência térmica para os diferentes processos de soldagem é tabelada, como pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Eficiência térmica de alguns processos de soldagem

Processo de Soldagem	η
Soldagem a arco submerso	0,9 – 1,0
Soldagem com eletrodo revestido	0,7 – 0,85
Soldagem MIG	0,7 – 0,85
Soldagem TIG	0,2 – 0,8
Soldagem por feixe de elétrons	0,8 – 0,95
Soldagem a laser	0,4 – 0,7

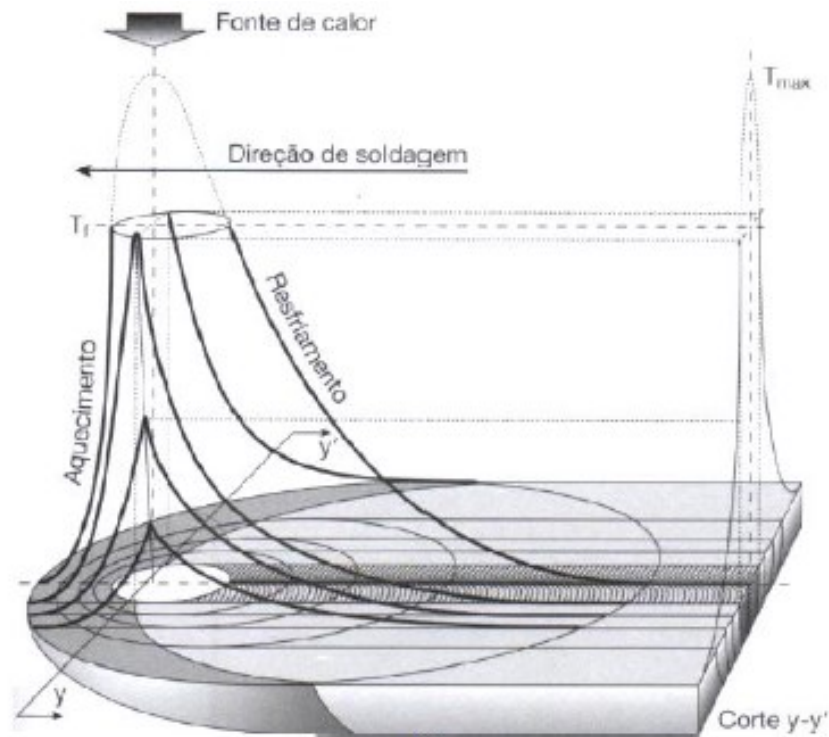
Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2013)

Devido a esta dificuldade em quantificar com precisão a eficiência dos processos de soldagem, frequentemente erros são encontrados quando se busca entender os perfis de energia emitidos para as peças. Por conta disso, normalmente utiliza-se valores médios para os rendimentos térmicos (RODRIGUES, 2013).

2.2.2 Ciclos térmicos

Após a energia fornecida ao material, durante a execução do processo de soldagem, ser absorvida, começam os processos de dissipação desse calor através dos chamados ciclos térmicos. O ciclo térmico é composto de três etapas básicas: inicia-se com o aquecimento do material, em seguida se tem a temperatura máxima atingida durante o ciclo e por fim um resfriamento gradual até a temperatura ambiente (SCHWANKE, 2017). O perfil de distribuição de temperatura durante um ciclo térmico pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Ciclo térmico pelo qual os materiais submetidos ao processo de soldagem passam



Fonte: COLPAERT (2008)

Todas as variáveis citadas acima dependem de parâmetros de soldagem como a corrente, tensão e velocidade de soldagem, além da espessura, geometria e propriedades físicas do material, os quais exercem grandes influência sobre as propriedades da junta soldada, pois afetam diretamente o tamanho de grão e a microestrutura resultante. Dentre as variáveis citadas, o resfriamento ou tempo de resfriamento é um dos fatores mais analisado e estudado dentro dos ciclos térmicos gerados na soldagem. Como o aquecimento da junta soldada é realizado de maneira localizada, a velocidade de resfriamento é aumentada devido à diferença de temperatura entre a zona fundida e sua vizinhança, correspondente ao metal base. Essa elevada taxa de resfriamento favorece a formação de fases características de materiais tratados termicamente, como a martensita e a bainita (COLPAERT, 2008).

Estudos envolvendo os ciclos térmicos e principalmente os gradientes de temperatura gerados podem ser feitos através de termopares inseridos em pontos pré-determinados da região da solda ou por meio de cálculos matemáticos (equações de fluxo de calor). As equações de Fourier para fontes de calor móveis foram desenvolvidas por Rosenthal e Rykalin na década de 1930 e estão expressas nas Equações 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (BORBA, 2019).

$$T - T_0 = \frac{\frac{\eta H}{h}}{\sqrt{4\pi k c p (t - t_0)}} \exp\left(\frac{r^2 c p}{4k(t - t_0)}\right) \quad (2)$$

$$\eta H = h \sqrt{\frac{4\pi k c p \Delta t_{\frac{8}{5}}}{\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2}}} \quad (3)$$

$$\Delta t_{\frac{8}{5}} = \left(\frac{1}{4\pi k c p}\right) \left(\frac{\eta H}{h}\right)^2 \left[\left(\frac{1}{(500 - T_0)}\right)^2 - \left(\frac{1}{(800 - T_0)}\right)^2\right]$$

$$T - T_0 = \frac{\eta H}{2\pi k (t - t_0)} \exp\left(\frac{r^2 c p}{4k(t - t_0)}\right) \quad (4)$$

$$\eta H = \frac{2\pi k c p \Delta t_{\frac{8}{5}}}{\frac{1}{(500 - T_0)} - \frac{1}{(800 - T_0)}} \quad (5)$$

$$\Delta t_{\frac{8}{5}} = \frac{\eta H}{2\pi h} \left(\frac{1}{(500 - T_0)}\right) - \left(\frac{1}{(800 - T_0)}\right)$$

$$r = \sqrt{\frac{2\eta H}{T_p c \rho \pi e}} \quad (6)$$

$$h_c = \left[\left(\frac{\eta H}{2c\rho}\right) \left(\frac{1}{(500 - T_0)}\right) - \left(\frac{1}{(800 - T_0)}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Onde: H: aporte Térmico (J/mm); η : eficiência de transferência do arco elétrico, que varia em função do processo de soldagem; k: condutividade térmica (J/s/mm/°C); ρ : densidade (kg/mm³); c: calor específico (J/kg/°C); T: temperatura máxima (°C); T₀: temperatura ambiente ou de preaquecimento (°C) e; h: espessura da chapa ou peça (mm) (BORBA, 2019).

As Equações 2 e 3 são para fluxo de calor bidimensional (chapas finas) e as Equações 4 e 5 foram desenvolvidas para fluxos tridimensionais de calor (chapas grossas). Assim, para determinar se uma chapa é fina ou grossa, é utilizada a Equação 7 na qual, segundo a AWS, para valores de h/h_c (onde h_c representa a espessura crítica) menores de 0,6 considera-se fluxo de calor tridimensional e para valores maiores que 0,9 considera-se fluxo de calor bidimensional. Caso o valor esteja entre 0,6 e 0,9 recomenda-se utilizar um tempo médio de resfriamento obtido através

de valores intermediários calculados entre as Equações 2 e 4. Vale destacar que as equações citadas são simplificadas, considerando-se que: (i) as propriedades mecânicas não variam com a temperatura; (ii) a fonte de calor é considerada linear; (iii) a chapa é considerada infinita; (iv) não há as transformações de fase; (v) as perdas de calor acontecem apenas por condução (BORBA, 2019).

Apesar das simplificações, essas equações ainda são populares entre as comunidades científicas, porém, mesmo com a utilização de métodos computacionais envolvendo elementos finitos, as simulações físicas estão ficando cada vez mais populares.

2.2.3 Soldabilidade

Segundo a AWS, a soldabilidade é definida como a capacidade de um material ser soldado sob as condições impostas de fabricação em uma estrutura específica e convenientemente projetada, de modo a executar satisfatoriamente o serviço pretendido. Este conceito, apesar de ser único, contempla três subdivisões: soldabilidade operacional, soldabilidade metalúrgica e soldabilidade em serviço. A soldabilidade operacional está relacionada com as condições nas quais o processo de soldagem é realizado, como por exemplo, o posicionamento da solda; o tipo de processo utilizado; habilidade do soldador e a natureza do metal base (MB). A soldabilidade metalúrgica é referente às condições térmicas e químicas atingidas durante o processo de soldagem que podem acarretar propriedades mecânicas não desejadas e estar diretamente ligadas à formação de defeitos. Essa soldabilidade é associada a fenômenos metalúrgicos como microsegregações e transformações de fase. Já a soldabilidade em serviço é relativa à vida útil do componente soldado (JUNIOR; ROCHA; BRANDI, 2013).

Apesar de todos os tipos de soldabilidade serem de extrema importância para que um material atinja condições satisfatórias, a metalúrgica é a mais estudada, já que apresenta influências mais severas no produto, como a microestrutura resultante. A soldabilidade metalúrgica é dependente principalmente da composição química do MB e das condições térmicas a que é submetido (ATILIO, 2017).

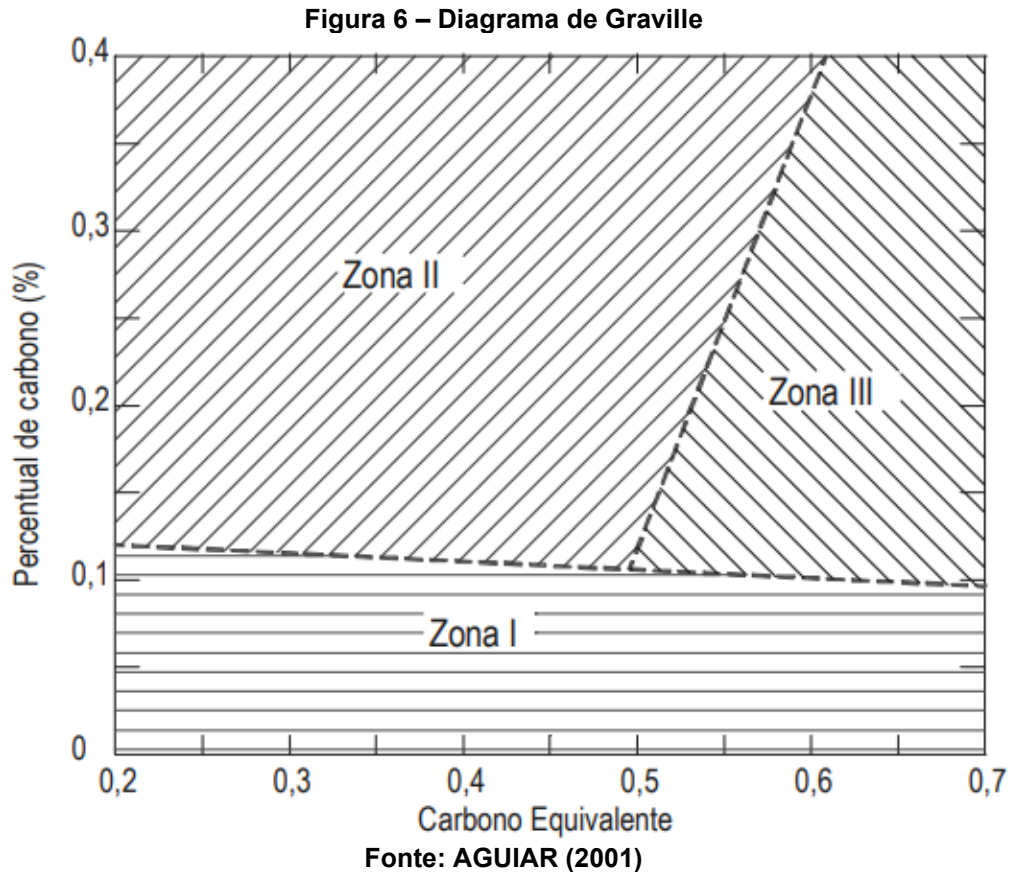
Como a soldabilidade depende diretamente da composição química do material, pode ser mensurada por meio do cálculo do carbono equivalente (C_{eq}). O carbono equivalente proporciona uma relação entre a soldabilidade e a temperabilidade dos aços onde, altos valores de C_{eq} fazem com que o aço seja mais

suscetível à têmpera, porém com menor soldabilidade, assim como baixos valores de C_{eq} proporcionam ao aço uma elevada soldabilidade e pouca temperabilidade (SANITÁ, 2017). Atualmente existem duas formas para mensurar a quantidade de carbono equivalente de uma liga, ou seja, o percentual de outros elementos de liga equivalentes ao percentual de carbono, elas são apresentadas a seguir (Equação 8 e Equação 9):

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (8)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (9)$$

A Equação 8 é denominada a fórmula do carbono equivalente do IIW (*International Institute of Welding*). Foi elaborada na década de 1940 para aços normalizados de alto teor de carbono e indica que, para valores abaixo de 0,45%, o aço possui boa soldabilidade metalúrgica, enquanto para valores acima de 0,45% indica que o material necessita de maiores cuidados durante a soldagem. Já a Equação 9, é conhecida como fórmula de Ito-Bessyo. Desenvolvida na década de 1960 para atender os aços com baixo teor de carbono, sendo utilizada para aços com teor de carbono igual ou menor a 0,12% (ATILIO, 2017). Para facilitar a análise da soldabilidade dos materiais pode-se consultar o Diagrama de Graville, apresentado na Figura 6, onde a Zona I representa a área de boa soldabilidade, a Zona II baixa soldabilidade e a Zona III indica os materiais que requerem cuidados especiais no processo de soldagem, ou seja, baixíssima soldabilidade (OLIVEIRA; DENTI, 2007).



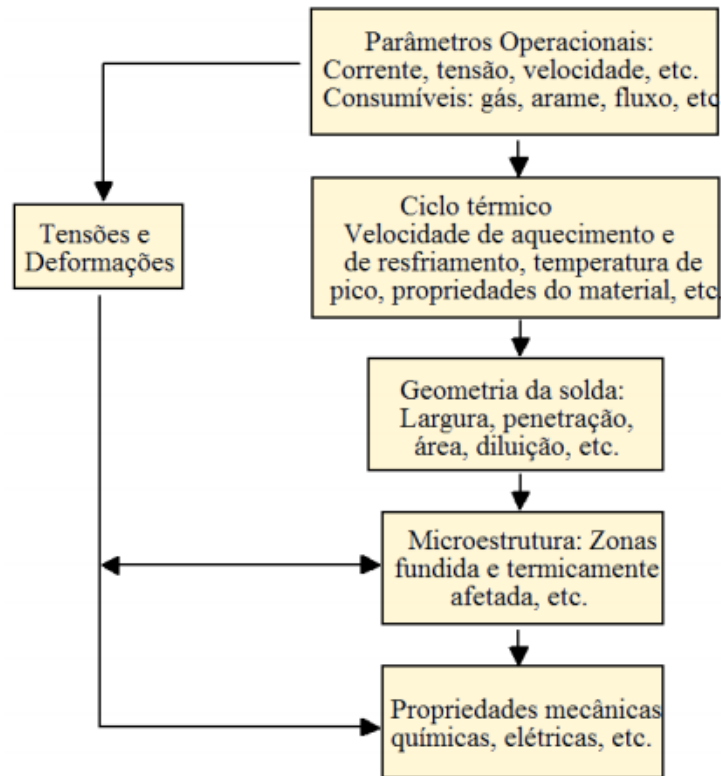
A busca por novos materiais que visam obter, além de propriedades mecânicas específicas, particularidades necessárias para sua aplicação, devem levar em consideração tanto o projeto de liga quanto as etapas finais de seu processamento (tipo de laminação seguida ou não de tratamento térmico como têmpera, resfriamento acelerado, revenimento, dentre outras). Como exemplo dessas particularidades podem ser citados: (i) boa conformabilidade, resistência a fadiga; (ii) resistência a fatores ambientais como corrosão e, principalmente; (iii) excelente soldabilidade. Usualmente, a busca por uma destas características pode afetar negativamente a outra, como a relação inversa entre tenacidade ao impacto e resistência a tração, quando a resistência mecânica é elevada pela adição de elementos de liga (endurecimento por solução sólida, precipitação e pela formação de fases de maior dureza). Porém, dependendo do tratamento e processamento empregado, é possível obter relações favoráveis, como a obtenção de ótima resistência mecânica e tenacidade por meio do refinamento de grão que, associado à redução da adição de elementos de liga (principalmente o carbono, como pode ser observado no diagrama de Graville) e adição de microligantes, também favorecem a soldabilidade (BORBA, 2019).

2.3 Metalurgia da soldagem

A soldagem por fusão é um processo metalúrgico complexo que envolve: fusão, solidificação, transformações microestruturais, tensões residuais, reações gás-metal e escória-metal. A metalurgia de soldagem tem base nos mesmos fundamentos da metalurgia convencional, mas difere em alguns pontos. Por exemplo, as reações ocorrem mais rapidamente durante o processo de soldagem do que durante a fundição, processamento ou tratamento térmico de um metal. Por outro lado, os elementos de liga presentes em uma junta soldada têm fortes influências nas suas propriedades, de maneira similar aos efeitos nas propriedades mecânicas dos aços (PERINI, 2008).

As operações de soldagem geralmente são realizadas através da aplicação localizada de calor, elemento essencial na execução de uniões soldadas. Por outro lado, essa fonte de energia, também é responsável pela origem de potenciais problemas, uma vez que, os elevados gradientes térmicos atingidos durante esse processo promovem grandes mudanças nas estruturas que compõe o material e, conseqüentemente, nas suas propriedades (MARQUES, 2009; WAINER; BRANDI; MELLO, 2004). Existem duas formas de se enfrentar esse problema: uma delas é desenvolver materiais que sejam menos sensíveis aos processos que envolvem a soldagem, ou seja, materiais que possuam uma boa soldabilidade e, a outra, é exercer um maior controle sobre as operações de soldagem e/ou desenvolver e aplicar operações complementares, tentando minimizar ao máximo a degradação das propriedades dos materiais (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). A Figura 7 ilustra os parâmetros e processos envolvidos na metalurgia de soldagem.

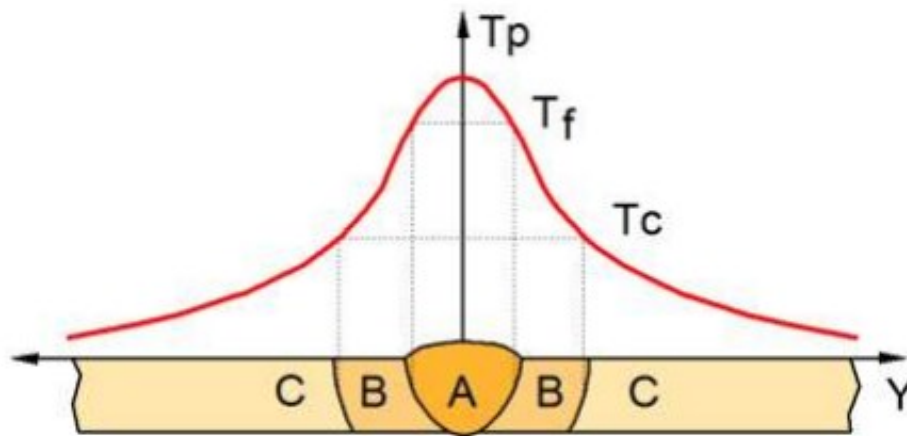
Figura 7 – Escopo da metalurgia de soldagem



Fonte: MODENESI; MARQUES; SANTOS (2012)

Uma junta soldada consiste basicamente em três regiões distintas: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) e a zona não afetada (referente ao metal base). A metalurgia de cada uma destas regiões está relacionada com a composição do metal base, composição do metal de adição (quando utilizado), processo de soldagem utilizado e os parâmetros adotados. O metal de solda, que compõe a ZF durante o processo de soldagem, pode ser composto de uma mistura de MB fundido e metal de adição ou, em alguns casos, somente MB refundido (soldas autógenas, geralmente em chapas metálicas de baixa espessura). Adjacente à ZF, a ZTA representa a porção do MB que não foi completamente fundido, mas cujas propriedades microestruturais ou mecânicas foram alteradas pelo calor proveniente da soldagem (HARTMANN; BELL; NELSON, 2001). O MB diz respeito ao metal a ser unido e sua composição e propriedades são de extrema importância para que a solda seja bem-sucedida, ou seja, para que a junta soldada tenha um perfil homogêneo, com o mínimo de discontinuidades de soldagem e propriedades compatíveis (ALBUQUERQUE, 2011). A Figura 8 apresenta um esquema da repartição térmica das três regiões básicas de uma solda por fusão e indica as temperaturas que cada zona atinge.

Figura 8 – Repartição térmica das diferentes regiões de uma solda por fusão. A – Zona Fundida (ZF). B – Zona Termicamente Afetada (ZTA). C – Metal Base (MB)



Fonte: MARQUES (2009)

Observa-se que na ZF as temperaturas de pico (T_p) são superiores a temperatura de fusão (T_f) do MB; na ZTA as T_p são superiores a temperatura crítica (T_c), porém inferiores a T_f ; no MB as T_p não superam a T_c do material (MARQUES, 2009).

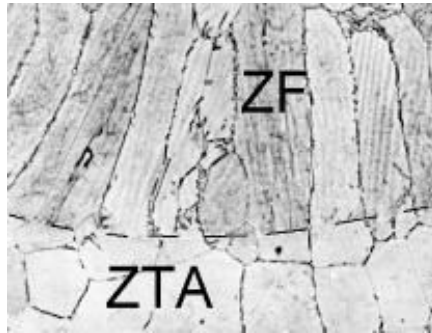
2.3.1 Zona Fundida (ZF)

A ZF é a região da solda onde ocorre a fusão e solidificação do material. Após a fusão localizada da região a ser unida e a formação da poça de fusão, o metal líquido começa a se solidificar, dando origem ao cordão de solda. Este processo de solidificação tem efeito direto sobre as propriedades da solda. Os primeiros grãos a se solidificarem iniciam o seu crescimento a partir da interface com o MB, mantendo a orientação cristalina do seu grão de origem e com o mesmo mecanismo de solidificação que ocorre na fundição ou no lingotamento (crescimento plano, celular, colunar e/ou dendrítico) (MARQUES, 2009).

Em uma situação ideal a ZF, a ZTA e o MB deveriam apresentar as mesmas propriedades e características. Entretanto a microestrutura obtida no cordão de solda é diferente daquela que o MB apresenta, mesmo quando se tem uma composição similar. Esta diferença está diretamente relacionada ao histórico térmico de cada região, uma vez que o MB advém de processos de, por exemplo, forjamento e laminação, enquanto o metal de solda advém do estado fundido (HARTMANN; BELL; NELSON, 2001; PERINI, 2008). Mesmo com essa diferença, segundo PERINI (2008), o metal de solda é uma miniatura de um fundido que é rapidamente resfriado, e suas

propriedades frequentemente se assemelham às de um material conformado. A Figura 9 apresenta um exemplo prático de aparência da interface entre a ZTA e a ZF de um aço ferrítico, também chamada de linha de fusão.

Figura 9 – Crescimento dos grãos de uma solda autógena em um aço ferrítico. A linha pontilhada marca a fronteira entre a ZTA e a ZF



Fonte: MARQUES (2009)

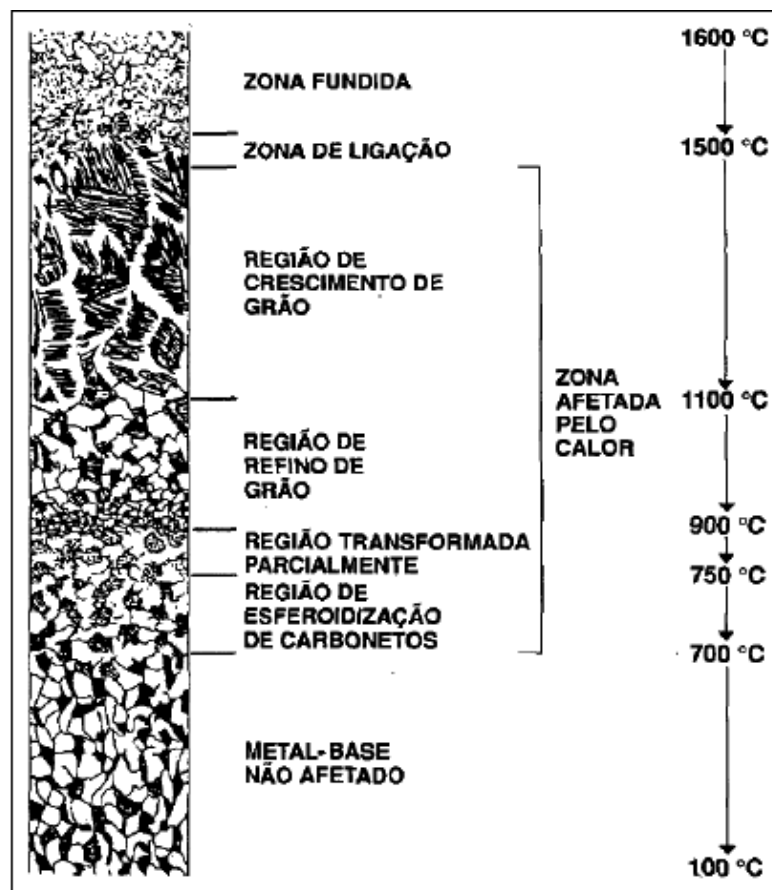
Ao final da soldagem, a microestrutura da ZF será resultante das reações do metal de solda com os gases próximos, reações com as fases líquidas não metálicas, do processo de solidificação e de eventuais transformações no estado sólido que ocorram durante o resfriamento (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Especialmente nos aços de baixo teor de carbono e baixa liga, segundo PERINI (2008), a poça de fusão se solidifica inicialmente como ferrita, podendo sofrer uma reação peritética com a formação de austenita. Ainda, quando a taxa de resfriamento é relativamente alta ou a solda é realizada em apenas um passe, a microestrutura da ZF será formada por basicamente ferrita, cementita e martensita, produtos da decomposição da austenita, juntamente com diferentes precipitados como carbonetos e nitretos, característicos dos aços de baixa liga (PERINI, 2008).

2.3.2 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Em teoria, a ZTA incluiria todas as regiões aquecidas a qualquer temperatura acima do ambiente, porém, para efeitos práticos, compreende apenas as regiões que são influenciadas pelo calor advindo do processo de soldagem, ou seja, compreende as regiões do MB que sofreram modificações estruturais (HARTMANN; BELL; NELSON, 2001). As características da ZTA dependem diretamente dos ciclos térmicos (variações de temperaturas em pontos específicos) ao qual o material é exposto durante a soldagem, por sua vez, os ciclos térmicos aplicados dependem,

assim como a maioria dos parâmetros de soldagem, dos processos e procedimentos de soldagem adotados e principalmente do MB. Por exemplo, no caso de metais não transformáveis, como o alumínio ou o cobre, no estado recozido, a mudança estrutural que se destacará na ZTA será o crescimento de grão. Já se o material estiver no estado encruado, após conformação mecânica, além do crescimento de grão, a ZTA apresentará uma região recristalizada. Agora, no caso de materiais transformáveis, como os aços carbono e de baixa liga, as transformações que ocorrerão na ZTA serão de caráter muito mais complexo, apresentando diversas regiões diferentes, sendo elas: região totalmente transformada de granulação grosseira, região totalmente transformada de granulação fina, região parcialmente transformada e região revenida ou esferoidizada (MARQUES, 2009; RIBEIRO, 2016). Estas regiões características podem ser observadas na Figura 10.

Figura 10 – Regiões de um cordão de solda em função da temperatura



Fonte: BRANDI; WAINER; MELLO (2011)

A região de granulação grosseira compreende a região mais próxima a ZF e, devido ao longo período de exposição ao calor, possui uma microestrutura de elevado

tamanho de grão, característica que acompanha a diminuição da dureza. Quanto à região de granulação fina, possui microestrutura similar a dos aços normalizados, é considerado um problema apenas quando o MB advém de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, onde esta região da ZTA pode apresentar menores valores de resistência que o MB (MARQUES, 2009; RIBEIRO, 2016).

A região de transformação parcial, ou região intercrítica, é caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do MB em austenita, que se decompõe durante as etapas do resfriamento. Esta pode apresentar regiões de alta dureza e/ou de baixa dureza, dependendo do percentual de carbono e da taxa de resfriamento (MARQUES, 2009; RIBEIRO, 2016).

Por fim, a região revenida, ou região subcrítica, apresenta poucas modificações, resumindo-se em pequenas esferoidizações da perlita. Como já citado, as modificações em aços temperados e/ou revenidos são mais intensas, neste caso, formando uma região duplamente revenida (RIBEIRO, 2016).

2.3.3 Descontinuidades nos processos de soldagem

Diversos parâmetros precisam ser controlados durante a soldagem para garantir uma correta junção entre as partes e evitar ou ao menos minimizar a formação de descontinuidades ou até mesmo de defeitos nas regiões afetadas pelo processo de soldagem. O termo descontinuidades, segundo a AWS (*American Welding Society*), é definido como uma interrupção da estrutura típica de um material, como a falta de homogeneidade em suas características mecânicas, metalúrgicas ou físicas, não sendo necessariamente um defeito, definido como uma descontinuidade que, por natureza ou efeito acumulado, podem tornar uma parte ou produto incapaz de atender aos padrões mínimos de aceitação aplicáveis.

2.3.3.1 Trincas induzidas por hidrogênio nos aços TMCP

Principalmente na indústria naval/*offshore* e de estruturas soldadas para construção civil, todo ano os custos de operações de reparo são altíssimos, devido a falhas em serviço muitas vezes provocadas por fratura frágil e fadiga. Diversas dessas falhas são ocasionadas por trincas pré-existentes nas regiões soldadas. Um dos defeitos mais comuns encontrados em componentes que apresentaram falha são as trincas induzidas por hidrogênio. Essa descontinuidade normalmente ocorre logo após

as operações de soldagem, sendo extremamente difíceis de se detectar. As trincas induzidas por hidrogênio surgem quando, além da presença de uma certa quantidade do elemento (advindo de umidade, revestimento do eletrodo de soldagem, ferrugem, dentre outras fontes), há tensões residuais na junta, principalmente nas fases de elevada dureza e em temperaturas abaixo de 150°C. Partindo disso, para evitar este problema, deve-se controlar principalmente: o hidrogênio inserido na poça de fusão e o ciclo térmico de soldagem (SILVA, 2003).

Outra medida que pode ser tomada para minimizar a ocorrência desse tipo de defeito é a realização de pré-aquecimento da junta, pois permite a difusão do hidrogênio para fora do componente a ser soldado e reduz a velocidade de resfriamento (formando microestruturas de menor dureza). (BORBA, 2019).

2.3.3.2 Amaciamento da Zona Termicamente Afetada (ZTA)

O amaciamento ocorre quando há uma redução da dureza na região afetada pelo calor advindo do processo de soldagem. Ele afeta principalmente a porção da solda que atingiu as T_p e é caracterizado pela modificação da microestrutura, formando fases de menor dureza. Acontece principalmente por conta das baixas velocidades de resfriamento em materiais que possuem microestruturas formadas fora do equilíbrio, como por exemplo martensita. Assim, todos os aços TMCP estão sujeitos ao amaciamento, já que são formados por estruturas metaestáveis e após serem expostos a certas temperaturas sofrem transformações irreversíveis (DOMINGUES, 2013).

Um dos métodos utilizados para minimizar o efeito deste fenômeno é limitar a energia fornecida para o material durante a soldagem (aporte térmico). Porém, vale ressaltar que, algumas pesquisas apontam que o amaciamento só é prejudicial a continuidade da junta soldada quando está presente em mais de 25% da ZTA (BORBA, 2019).

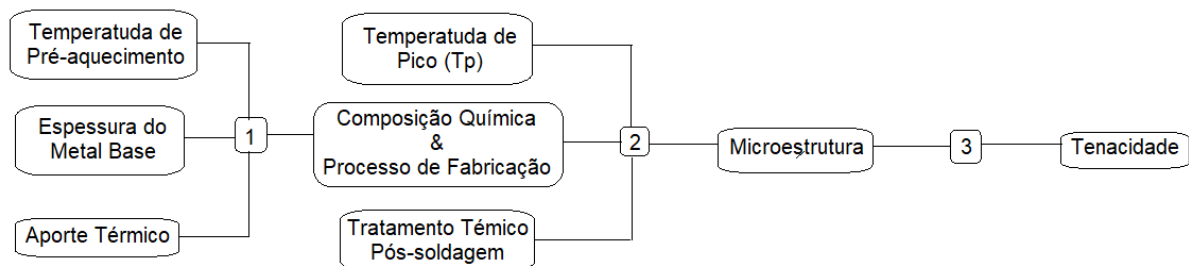
2.3.3.3 Tenacidade da Zona Termicamente Afetada (ZTA)

É sabido que as operações de soldagem envolvem a aplicação de elevadas quantidades de energia em pequena porção de material (região a ser unida), e este calor gerado provoca transformações na ZTA, principalmente na região de crescimento de grão, também conhecida como região de grão grosseiros (ZTAGG),

que é submetida a elevadas temperaturas por longos períodos, o que favorece o crescimento de grão. Essas transformações afetam negativamente os resultados e energia absorvida, muitas vezes não alcançando os requisitos para gerar continuidade com o MB (HIBINO, 2011).

O resultado obtido na ZTAGG advém da interação entre as características de processamento do MB, composição química e as operações de soldagem, esses parâmetros estão esquematizados na Figura 11.

Figura 11 – Mapa de parâmetros de influência sobre a ZTA



Fonte: Adaptado de BORBA (2019)

Assim, as alternativas passíveis de controle para minimizar a redução de tenacidade na ZTAGG são: (i) controle da velocidade de resfriamento; (ii) utilizar metais base menos sensíveis aos ciclos térmicos. O controle da velocidade de resfriamento não seria a melhor opção quando se depara com as altas produtividades que os processos de soldagem procuram. Já em relação ao MB, os aços TMCP, quando comparados com os aços convencionais de mesma resistência mecânica, possuem uma maior probabilidade de formação de constituintes microestruturais de tenacidade favorável, em função dos baixos teores de carbono e adição controlada de elementos de liga, sendo menos afetados pela variação de aporte térmico (BORBA, 2019).

2.4 Simulações Físicas de Ciclos Térmicos

Ao longo das décadas, os processos de união por fusão, variações microestruturais e propriedades mecânicas têm sido cada vez mais objetos de estudo. Uma das principais dificuldades na condução destas pesquisas está na confecção de juntas soldadas de caráter investigativo, que apresentam elevado custo pela utilização de materiais específicos, mão de obra qualificada e, principalmente, de equipamentos de soldagem que não são de fácil acesso para os centros de pesquisa (BORBA, 2019).

Como visto, o entendimento dos efeitos das diferentes condições de soldagem nas propriedades da junta de uma solda real é de extrema importância para garantir a integridade do material. Para se chegar aos parâmetros ideais de cada material deve-se fazer estudos de composição e processamento do MB, entendendo a influência dos elementos de liga e de formações das fases constituintes; estudar diferentes valores para o aporte térmico utilizado, entendendo as faixas de tempo para o resfriamento, dentre outros para se chegar as propriedades ideais, sem a presença de descontinuidades. O desenvolvimento de diagramas que correlacionam estes parâmetros é extremamente oneroso, demandando estrutura qualificada para confecção de corpos de prova para execução dos mais diversos ensaios. Deste modo, as simulações físicas de ciclos térmicos de soldagem se apresentam como uma das principais alternativas para gerar essas informações de forma confiável (BORBA, 2019).

Atualmente diferentes técnicas são utilizadas para obter as simulações físicas da ZTA. O método que vem ganhando notoriedade é a utilização de simuladores termomecânicos como a Gleeble®.

2.4.1 Ensaios Gleeble®.

Equipamento extremamente robusto, o simulador termomecânico Gleeble®, trata-se de um sistema integrado de ensaios termomecânicos computadorizados. Com um controle de temperatura feito por termopares ou infravermelho e sistema de aquecimento por efeito Joule, permite aquecimento de até 1000°C/s, controle preciso do tempo de permanência e velocidades de resfriamento que variam de 1°C/min até 1000°C/s. Seu sistema mecânico consiste em um sistema servo-hidráulico que tem capacidade de até 10 toneladas em tração ou compressão com deslocamento de até 1000 mm/s. Este equipamento possui aplicação nas mais diversas áreas de pesquisa, sendo uma das principais o estudo dos ciclos térmicos de soldagem (BORBA, 2019). O simulador Gleeble®, Figura 12, é fabricado pela Dynamic Systems Inc e atualmente é capaz de criar curvas TTT (Tempo-Temperatura-Transformação) e CCT (*Continuous Cooling Transformation*), simular fadiga térmica, entre outros estudos metalúrgicos, além da simulação de ciclos térmicos abordada neste trabalho (CARVALHO, 2016).

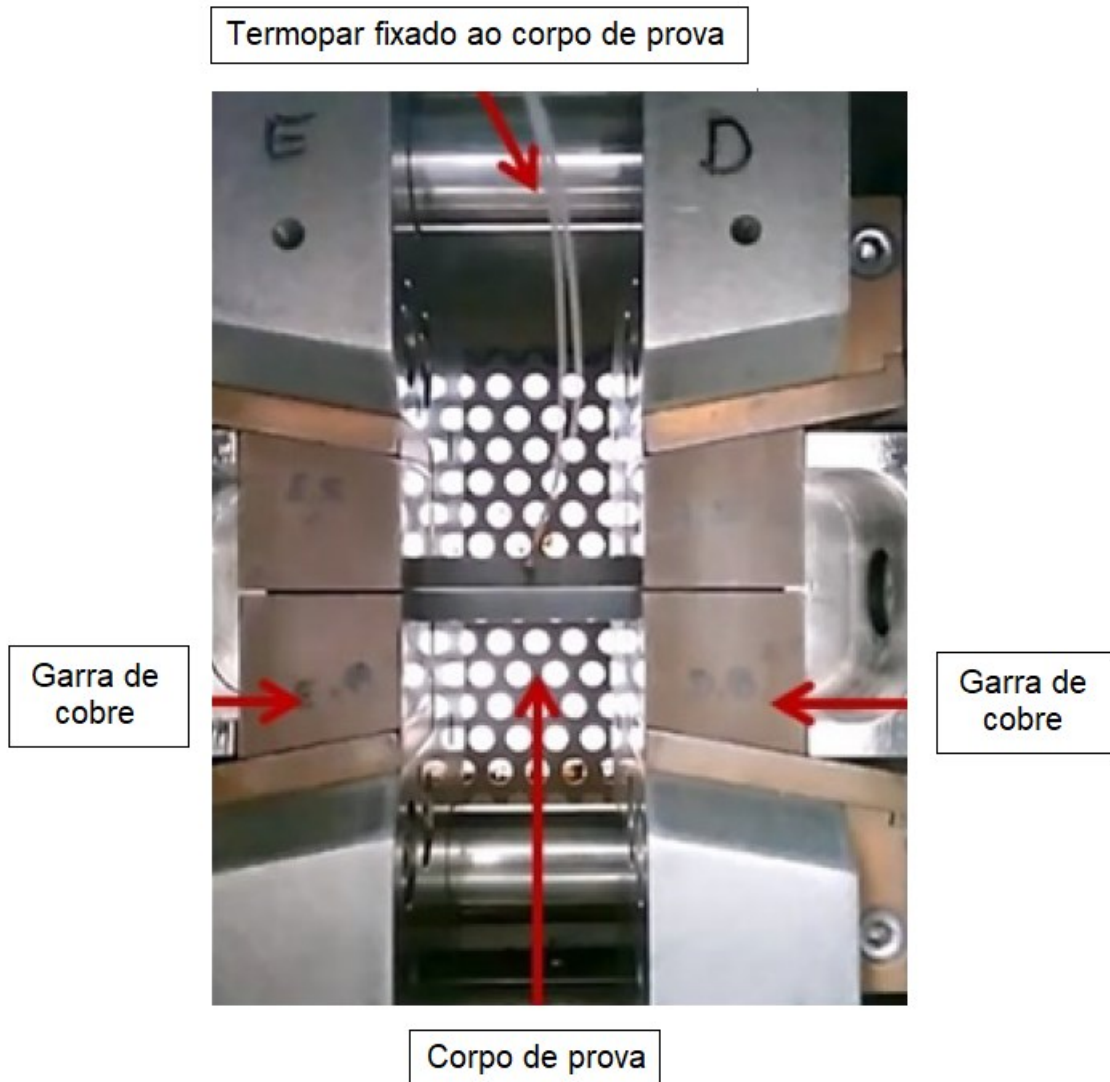
Figura 12 – Equipamento Gleeble® 3800

Fonte: CARVALHO (2016)

Para a fixação do corpo de prova são utilizadas duas garras que fazem parte de um circuito elétrico. A corrente passa pela peça que é aquecida por efeito Joule. O monitoramento da temperatura é feito por um termopar que precisa ser soldado à superfície do corpo de prova. A Figura 13 mostra com detalhes uma amostra fixada ao Gleeble® 3800 (BORBA, 2019).

Os ciclos térmicos simulados são construídos por modelos computacionais de modelos físicos de transferência de calor. Precisam ser informadas parâmetros como aporte térmico, T_p , espessura do material, temperatura de pré-aquecimento (se houver), além de algumas características do material utilizado. Dentre os modelos computacionais presentes no equipamento Gleeble®, o mais utilizado pelos pesquisadores é o Rykalin, pois é o único que permite dar entrada diretamente com a T_p a ser trabalhada. Para chapas finas é utilizado o Rykalin para um fluxo bidimensional de calor (Rykalin-2D) e para chapas grossas um fluxo tridimensional de calor (Rykalin-3D) (CARVALHO, 2016).

Figura 13 – Corpo de prova fixado entre as garras do equipamento



Fonte: Adaptado de BORBA (2019)

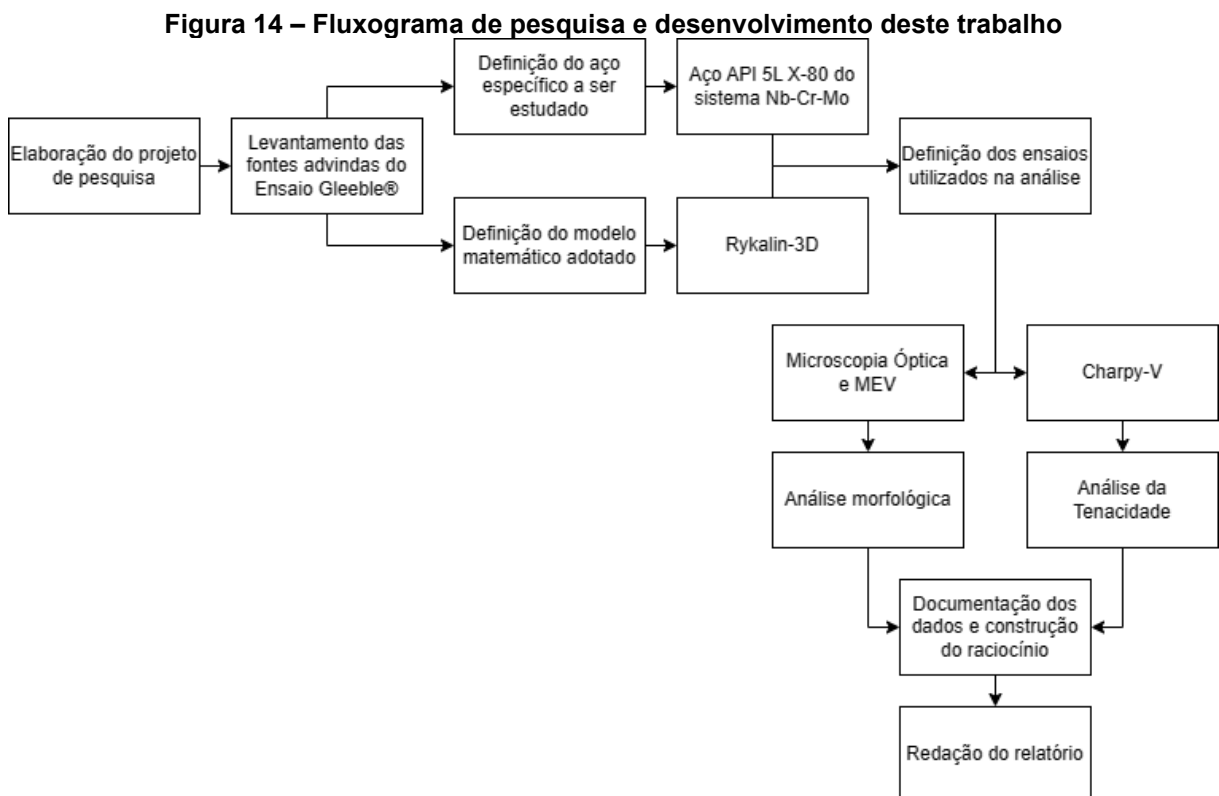
As principais vantagens do simulador Gleeble® em relação a outros métodos utilizados para reprodução de uniões são: (i) os corpos de prova utilizados podem ser submetidos posteriormente a um maior número de ensaios mecânicos por conta de sua geometria; (ii) produz um maior volume de ZTA facilitando a análise; (iii) fácil reprodução de ciclos térmicos, mesmo para aqueles que exigem ciclos correspondentes a vários passes de solda; (iv) conta com diversos modelos matemáticos que trabalham em conjunto com termopares posicionados diretamente na amostra, gerando curvas de aportes térmicos muito próximas das idealizadas; (v) possui alto grau de reprodutibilidade e baixos custos operacionais (ANDIA, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando-se comparar resultados obtidos de propriedades mecânicas, correlacionando as transformações microestruturais através de diferentes ensaios realizados via simulação por meio do equipamento Gleeble® para diferentes aportes térmicos, foi realizada uma revisão bibliográfica para coleta de dados de diferentes trabalhos acadêmicos envolvendo aços TMCP. Para as comparações feitas, foram estabelecidos os seguintes critérios:

- Os aços comparados são pertencentes ao sistema Nb-Cr-Mo da especificação API 5L X-80;
- Modelo de simulação Rykalin-3D empregado para obtenção das curvas de ciclos térmicos.

Na Figura 14 é apresentado o fluxograma da metodologia de pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.



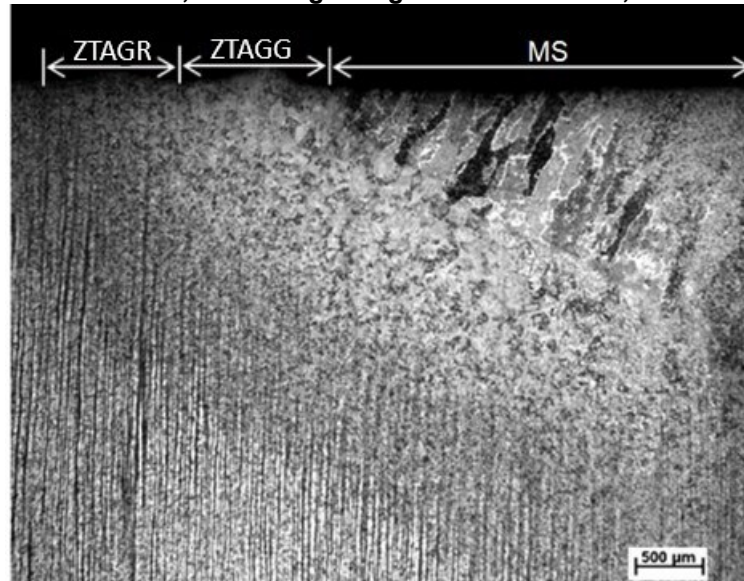
Fonte: Autoria própria (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo maior da soldagem ou da Ciência e Tecnologia da União dos Materiais é a especificação das juntas soldadas sobre estruturas úteis à sociedade e que cumpram com aquelas finalidades para as quais foram idealizadas. Muitas empresas e indústrias constroem e projetam estruturas nos mais diversos ambientes, desde para o deserto do Saara até para o fundo do mar, paralelo com as indústrias eólica e naval com a exploração da energia cinética dos ventos e de petróleo em águas profundas, respectivamente. Porém, nem sempre essas estruturas seguem as idealizações dos projetos e estão suscetíveis a falhas (MACHADO, 2012).

A influência dos processos de união, principalmente união por fusão, com destaque para a soldagem a arco elétrico, nas variações microestruturais e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas, tem sido principal tema de estudo ao longo das últimas décadas. A intensidade dos ciclos térmicos gerados durante o processo de soldagem e a composição química dos materiais está diretamente ligada as mudanças microestruturais que ocorrem nas regiões soldadas. Logo, um maior conhecimento e controle dos ciclos térmicos são fatores cruciais para juntas de boa qualidade que atendam os requisitos de sua aplicação. A investigação de diferentes ciclos térmicos e sua influência na microestrutura dos materiais feita através de juntas soldadas reais acabou se tornando um problema, uma vez que acabam por apresentar regiões e sub-regiões muito pequenas e de grande heterogeneidade, como pode ser visto na Figura 15, dificultando a correlação entre a microestrutura e as propriedades do material (BORBA, 2019).

Figura 15 – Heterogeneidade ao longo de um corpo de prova soldado em escala real. ZTAGR: grãos refinados da ZTA; ZTAGG: grãos grosseiros da ZTA; MS: metal de solda



Fonte: Adaptado de BORBA, 2019

As juntas soldadas elaboradas para fins de estudo necessitam principalmente de equipamentos de soldagem que, normalmente, são de difícil disponibilidade em centros de pesquisa e ensino e principalmente de mão de obra especializada já que estes equipamentos muitas vezes, nas indústrias, são operados por engenheiros de soldagem juntamente com projetistas, profissionais fundamentais no processo (MACHADO, 2012).

Frente a estes desafios e com a necessidade de um melhor entendimento dos efeitos dos ciclos térmicos, uma metodologia de simulação foi e vem sendo desenvolvida, evoluindo ao longo dos anos. Uma ferramenta de baixo custo operacional, que possibilita o controle de diversas variáveis existentes nos processos de união, apresentando resultados de maneira rápida e segura. A única necessidade do emprego das simulações dos ciclos térmicos está no conhecimento das principais particularidades dos processos e suas correlações com os parâmetros de soldagem, como velocidade de aquecimento, temperatura de pico (correspondente à corrente e tensão aplicados), tempo de permanência (análogo à velocidade de soldagem), velocidade de resfriamento (relacionado à atmosfera, espessura, geometria e propriedades físicas do material: condutividade térmica, calor específico e densidade) (BORBA, 2019).

Pelo mundo, cada vez mais, a simulação física dos ciclos térmicos está sendo utilizada por centros de pesquisa e desenvolvimento de materiais, porém a escassez desse tipo de equipamento ainda é um problema enfrentando, principalmente pelos

estudos desenvolvidos nacionalmente. Atualmente em território nacional sabe-se de 07 equipamentos, sendo: 02 pertencentes as empresas Usiminas (Ipatinga – MG) e Gerdau Aços Especiais (Piratini – RS); 03 nos institutos de tecnologia SENAI CTS (Rio de Janeiro – RJ), SENAI CETEC (Belo Horizonte – MG) e LNNano (Campinas – SP); e 02 em instituições de ensino federais como na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) (BORBA, 2019).

Na Tabela 2 estão listados os dois estudos nacionais de simulações dos ciclos térmicos abordados neste trabalho como discussão com seus respectivos parâmetros e variáveis utilizadas. Ambos os trabalhos foram desenvolvidos no Instituto de Tecnologia SENAI CTS.

Tabela 2 – Variáveis utilizadas pelos trabalhos abordados

Autor	Método de Simulação	Material	VA (°C/s)	Tp (°C)	tTp (s)	AT (kJ/mm)	Tempo de Resfriamento	Método Computacional
CARVALHO	Gleeble® 3800	Aço API 5L X80	500	1450	0,4	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 3,0	Rykalin-3D	Rykalin-3D
ANDIA	Gleeble® 3800	Aço API 5L X80	200	1350	1,0	1,2; 2,5; 3,0; e 4,0	Rykalin-3D	Rykalin-3D

Fonte: Adaptado de BORBA (2019)

4.1 Simulações Físicas Obtidas Através do Equipamento Gleeble®

Os estudos das simulações físicas dos ciclos térmicos de soldagem têm como foco a ZTA. Como pode ser visto na Figura 10, a ZTA de materiais transformáveis é bastante complexa, apresentando diferentes regiões. Dentre estas regiões a ZTAGG é sem dúvidas a região de maior preocupação em termos de microestrutura e propriedades resultantes, principalmente quando se trata de tenacidade e homogeneidade de propriedades ao longo do material. Muitos pesquisadores afirmam que esta é a região que governa a soldabilidade de um componente. Trata-se de uma região que resulta de uma complexa relação da microestrutura, efeitos de precipitação, formação de diferentes fases e tamanho de grão. Estes fenômenos são controlados principalmente pela composição química do material e pelos ciclos térmicos ao qual são submetidos. Borba (2019) fala sobre duas abordagens distintas que normalmente são empregadas quando se estuda as simulações físicas dos ciclos térmicos:

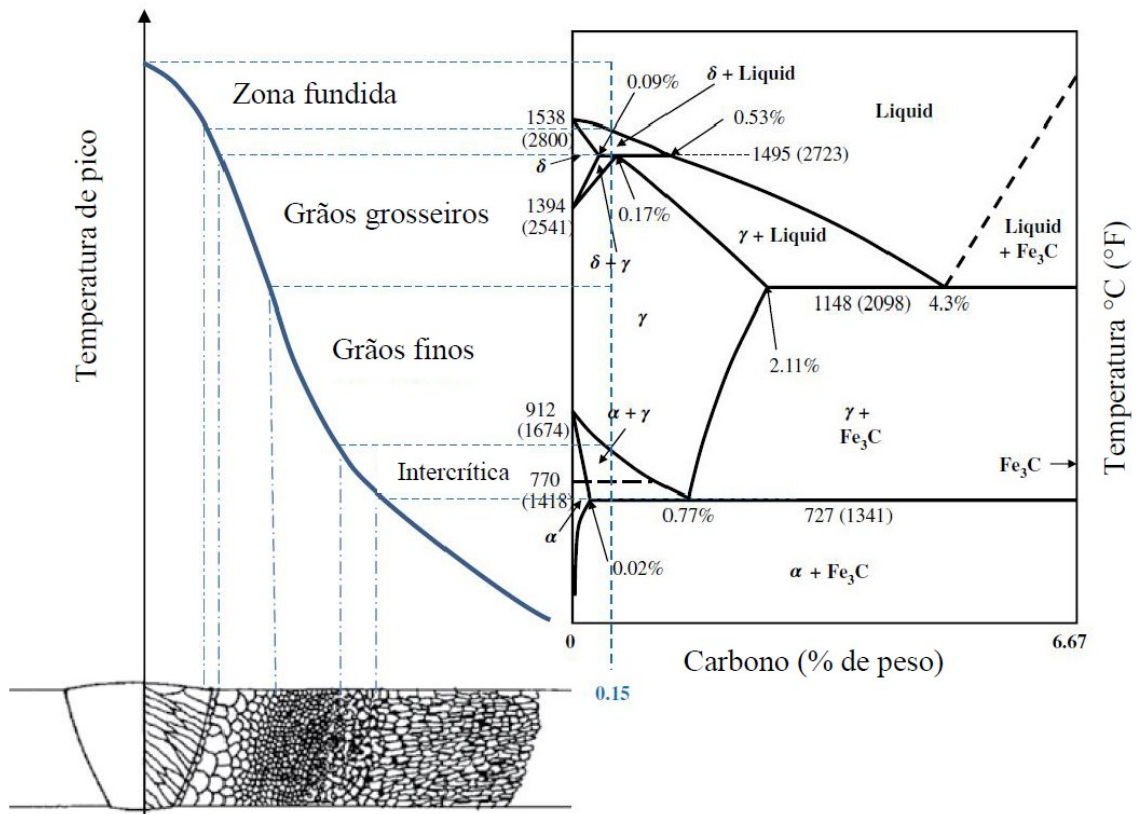
□ Fazendo-se uma comparação direta entre diferentes materiais que são submetidos as mesmas condições de simulação, representando as condições reais a

que o material seria submetido em sua aplicação, onde, busca-se a melhor tenacidade absoluta;

□ Aplicando-se diferentes ciclos térmicos para um mesmo material e estudando as variações de tenacidade, microestrutura e propriedades mecânicas em busca dos melhores parâmetros de soldagem.

A segunda abordagem de estudo citada, onde se utiliza diferentes ciclos térmicos para um mesmo material, pode ser realizada através de duas técnicas distintas: (i) alterando a T_p e mantendo a velocidade de resfriamento ou, (ii) testando a variação do tempo de resfriamento fixando-se a T_p . A primeira técnica tem foco na replicação das diferentes regiões da ZTA para entender a influência de cada uma delas sobre a junta soldada. A segunda técnica fixa a T_p na ordem de 1350°C para reprodução da região ZTAGG, buscando-se a faixa de aporte térmico que melhor proporcione valores de tenacidade. Na Figura 16 é possível observar a correlação das diferentes temperaturas atingidas por um material na região da junta soldada com a microestrutura formada para a execução de um único passe.

Figura 16 – Correlação entre a temperatura de pico e a microestrutura formada na região de uma junta soldada com base no diagrama Fe-C



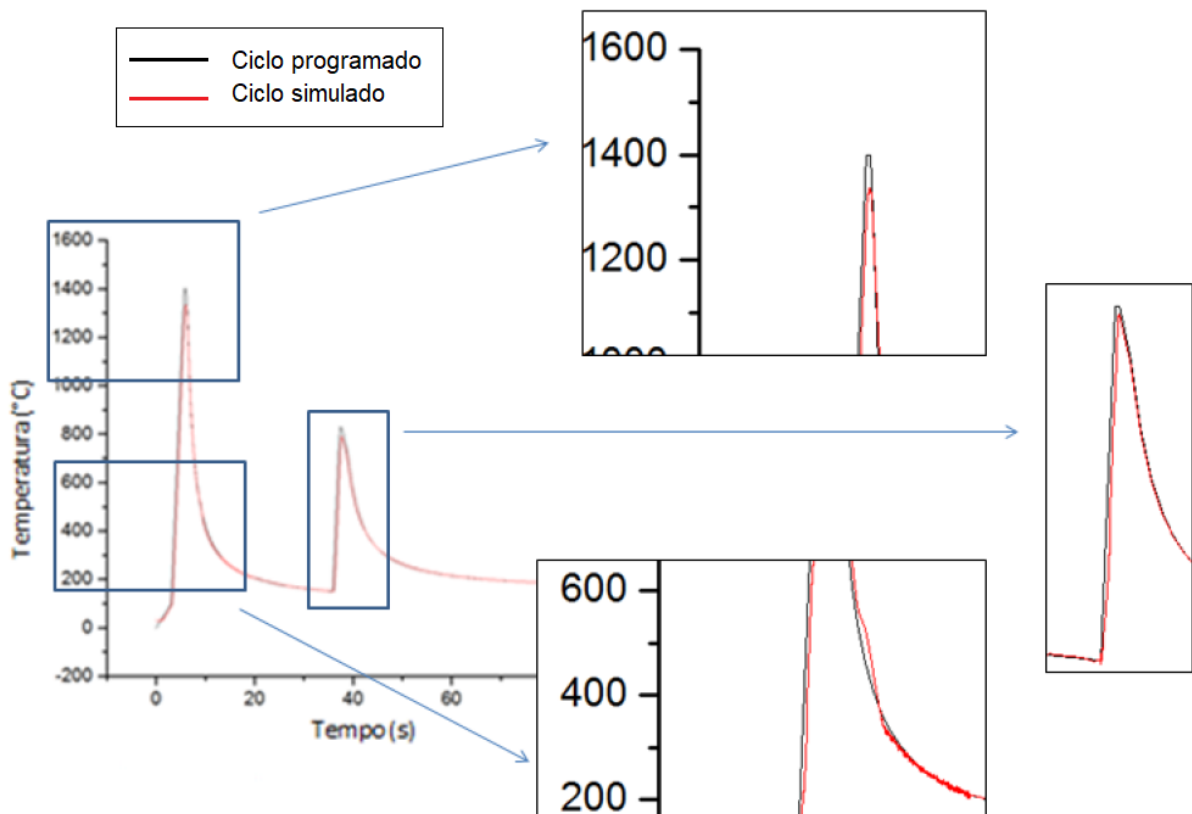
Fonte: CARVALHO (2016)

4.2 Comparação dos ciclos térmicos simulados e programados

Uma das principais etapas no desenvolvimento da metodologia de simulação de ciclos térmicos de soldagem é a determinação dos parâmetros que serão utilizados nas análises. Esses parâmetros devem ser compatíveis com os de soldas reais e garantir repetibilidade. Com o objetivo de simular a região da ZTA de grãos grosseiros, os estudos de Carvalho (2016) e Andia (2012) analisados utilizaram os parâmetros apresentados na Tabela 2, onde a T_p foi fixada em 1350°C e 1450°C, respectivamente, variando-se o Aporte Térmico Simulados (AT) e utilizando o modelo de simulação Rykalin 3-D.

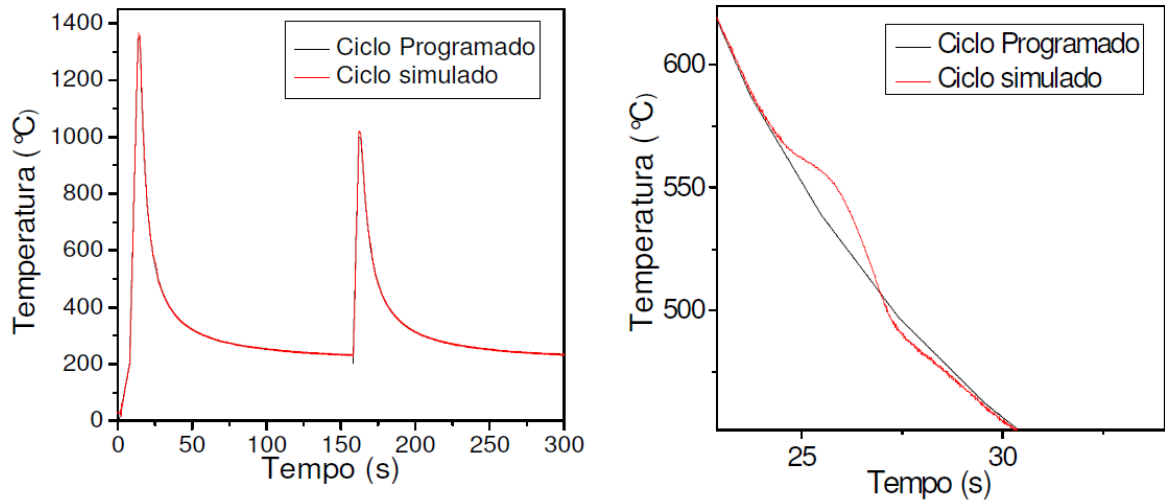
O software que controla as simulações no equipamento Gleebe® 3800 gera duas curvas de ciclos térmicos com o intuito de fornecer dados comparativos entre o ciclo programado, referente aos cálculos feitos com os parâmetros inseridos, e o ciclo simulado, referente ao ciclo térmico gerado fisicamente no corpo de prova. Na Figura 17 é possível observar em detalhes a sobreposição das curvas geradas por Carvalho (2016) e na Figura 18 as curvas geradas por Andia (2012).

Figura 17 – Comparação entre o ciclo programado e o ciclo simulado de Carvalho (2016)



Fonte: Adaptado de CARVALHO (2016)

Figura 18 – Comparação entre o ciclo programado e o ciclo simulado de Andia (2012)



Fonte: Adaptado de ANDIA (2012)

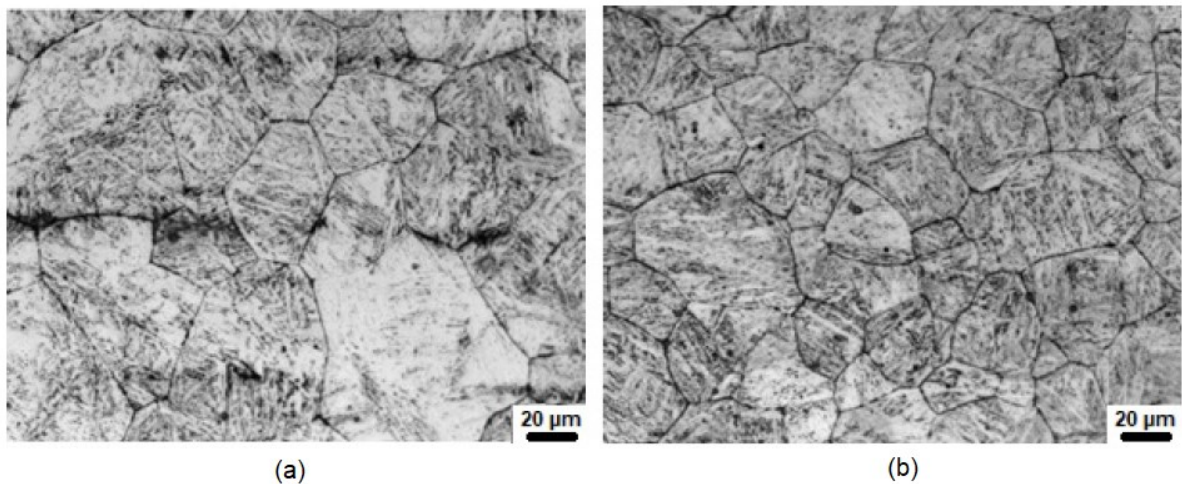
A partir da sobreposição das curvas geradas é possível verificar que o equipamento Gleeble® 3800 reproduziu os ciclos térmicos com excelente aproximação, porém, algumas regiões específicas apresentaram pequenos deslocamentos. Na Figura 17 é possível observar diferenças na T_p , sendo que na Figura 18, essa diferença não está presente. Essa variação pode ocorrer pelo curto tempo de permanência (t_{Tp}) nesta temperatura já que as simulações feitas por Carvalho (2016) tiveram t_{Tp} de 0,4s e as simulações de Andia (2012) t_{Tp} de 1,0s. Ainda, é possível constatar outra variação presente em ambas as curvas durante a fase de resfriamento na faixa de temperatura de 800°C e 500°C que possivelmente ocorre por conta de uma transformação de fase característica do material estudado, justificando a variação de temperatura e de velocidade de resfriamento. Ainda na Figura 1, é possível verificar que a faixa de temperatura onde essa variação ocorre corresponde a transição entre o início da nucleação dos grãos de ferrita e fim desta transformação, nucleação que ocorre dentro dos limites dos grãos de austenita. Considerando ainda um resfriamento acelerado e a composição química dos materiais em estudo a formação de constituintes metaestáveis também pode estar relacionada.

4.3 Dificuldades Encontradas das Simulações Térmicas

Como mencionado, a parte experimental dos ensaios de simulação de ciclo térmico no equipamento Gleeble® envolvem a fixação de um corpo de prova entre duas garras de cobre, sendo os ciclos térmicos aplicados a partir do aquecimento deste corpo de prova por efeito Joule. Alguns autores se depararam com

heterogeneidade ao longo da seção transversal dos corpos de prova que por sua vez ocasionavam elevada dispersão em ensaios de impacto Charpy-V utilizados para mensurar a principal característica normalmente analisada: tenacidade. O crescimento desigual de grãos austeníticos próximos ao termopar e na extremidade oposta do mesmo pode ser vista na Figura 19.

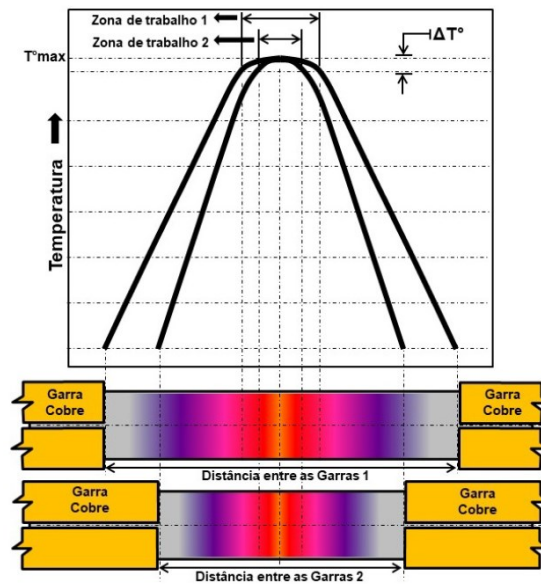
Figura 19 – Comparação entre (a) região próxima ao termopar, e (b) região na extremidade oposta ao termopar



Fonte: Adaptado de BORBA (2019)

Essas diferenças podem ocorrer basicamente pela variação de resfriamento entre a superfície do corpo de prova e seu interior e pela distância entre as garras de suporte ao qual o corpo de prova é fixado, gerando um gradiente térmico longitudinal e transversal. Entender este gradiente é de caráter importantíssimo para o estudo dos ciclos térmicos, uma vez que gera zonas de trabalho ideais para cada tipo de tratamento e análise, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Perfil térmico ao longo de um corpo de prova durante ciclos térmicos de soldagem no equipamento Gleeble®



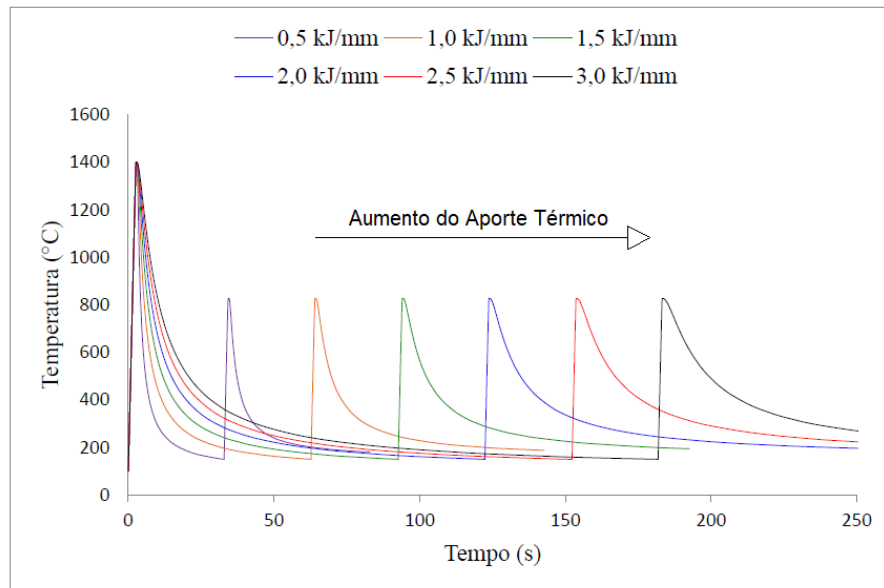
Fonte: BORBA (2019)

4.4 Influências do Aporte Térmico na Microestrutura

Com o objetivo de simular a ZTAGG de uma junta soldada, utiliza-se de dois ciclos térmicos com um primeiro aquecimento até a T_{p1} (na ordem de 1350°C) e após um resfriamento até aproximadamente 150°C (temperatura de interpasse na soldagem real) se dá início ao segundo ciclo com o objetivo de atingir a temperatura crítica T_{p2} (onde não ocorre fusão, apenas transformações de fase), como ilustrado na Figura 8. Essa temperatura é estudada na faixa de 800°C e deve ser escolhida com muito cuidado pois uma temperatura muito baixa pode não apresentar transformações austeníticas e uma temperatura muito alta pode ocasionar uma transformação total. Andia (2012) trabalhou com diferentes temperaturas para T_{p2} (1200 , 1000 , 800 e 600°C) e Carvalho (2016) a fixou em 827°C .

Visando abranger toda a faixa de energia de soldagem usualmente empregada na soldagem em campo, como descrito na Tabela 2, Carvalho (2016) utilizou uma variação entre $0,5$ e $3,0$ kJ/mm e Andia (2012) trabalhou com aporte térmico variando entre $1,2$ e $4,0$ kJ/mm. Quando se mantem todos os parâmetros e altera-se apenas o aporte térmico, a principal diferença presente como resultado é o tempo necessário para atingir a T_{p2} e o tempo necessário para resfriamento do corpo de prova, como pode ser visto nas curvas simuladas presentes na Figura 21.

Figura 21 – Influência de diferentes aportes térmicos na simulação de ciclos de soldagem



Apenas com essa única variação a microestrutura final pode apresentar diferentes características. Na Figura 22 é apresentada a imagem gerada em microscópio ótico do metal base com ataque de nital 2% e aumento de 1.000x e na Figura 23 são apresentadas as imagens para cada um dos aportes térmicos estudados por Carvalho (2016) com mesmo ataque e aumento.

Figura 22 – Microestrutura do metal base utilizado no trabalho de Carvalho (2016)

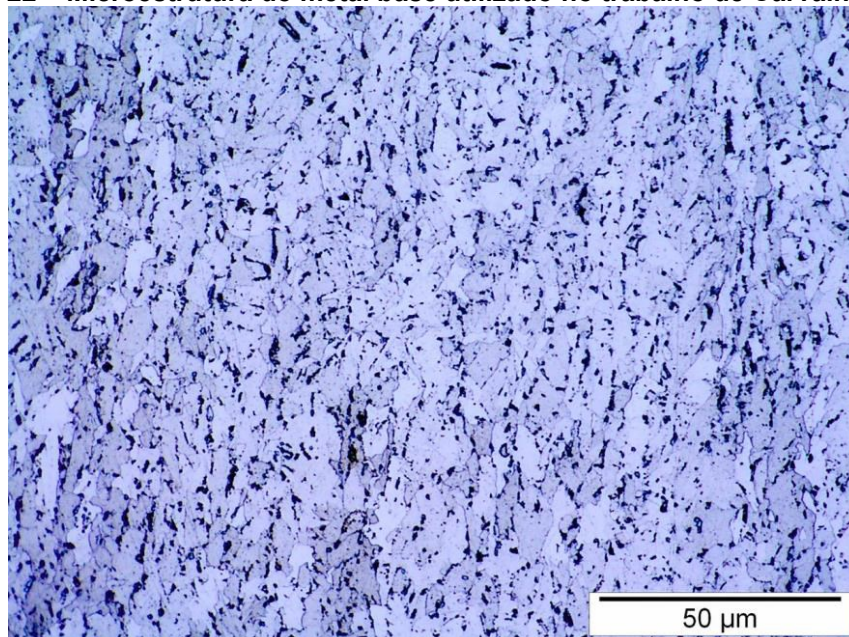
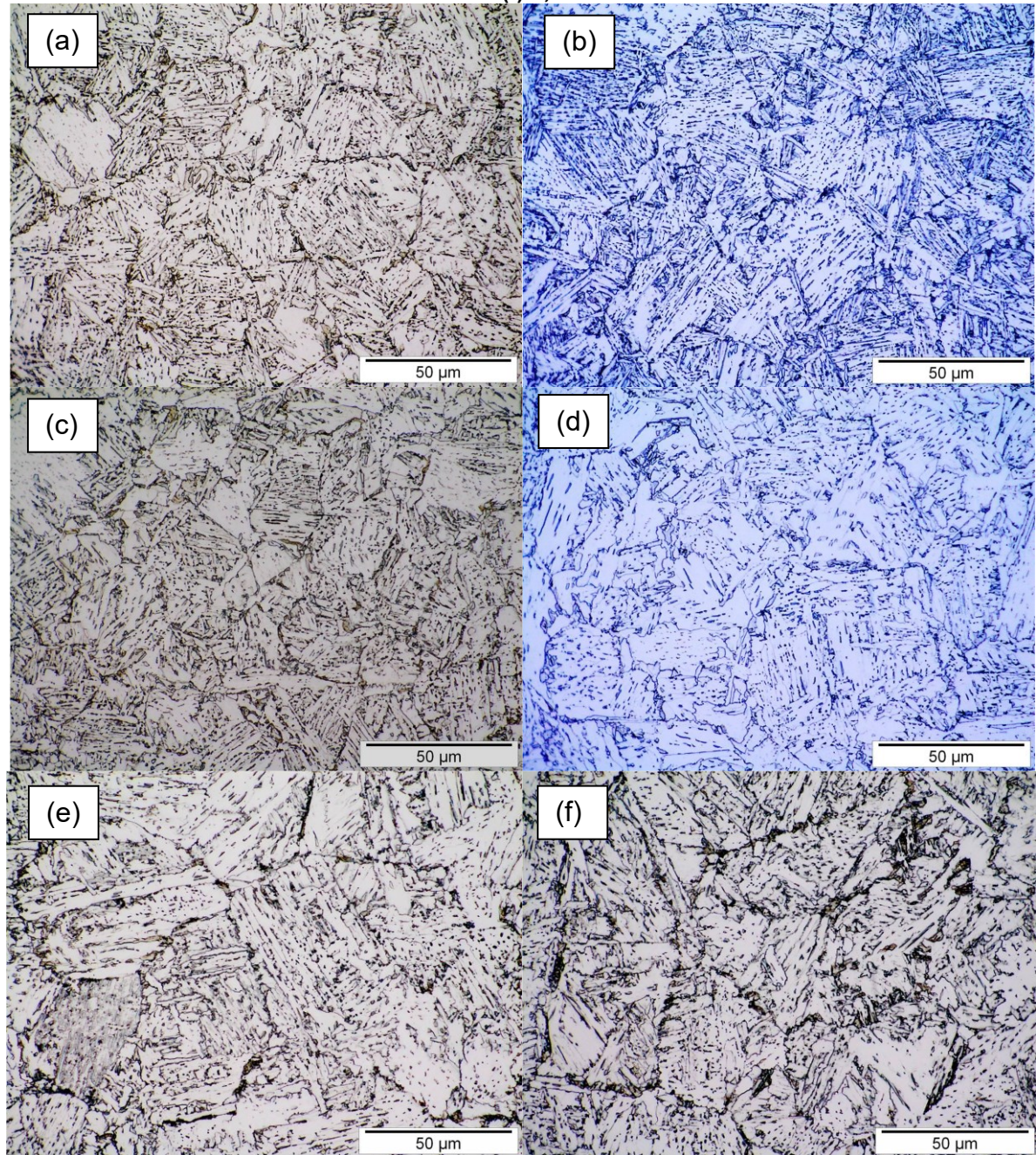


Figura 23 – Microestrutura das diferentes amostras sujeitas aos ciclos térmicos de soldagem para os aportes térmicos de (a) 0,5 kJ/mm, (b) 1,0 kJ/mm, (c) 1,5 kJ/mm, (d) 2,0 kJ/mm, (e) 2,5 kJ/mm e (f) 3,0 kJ/mm

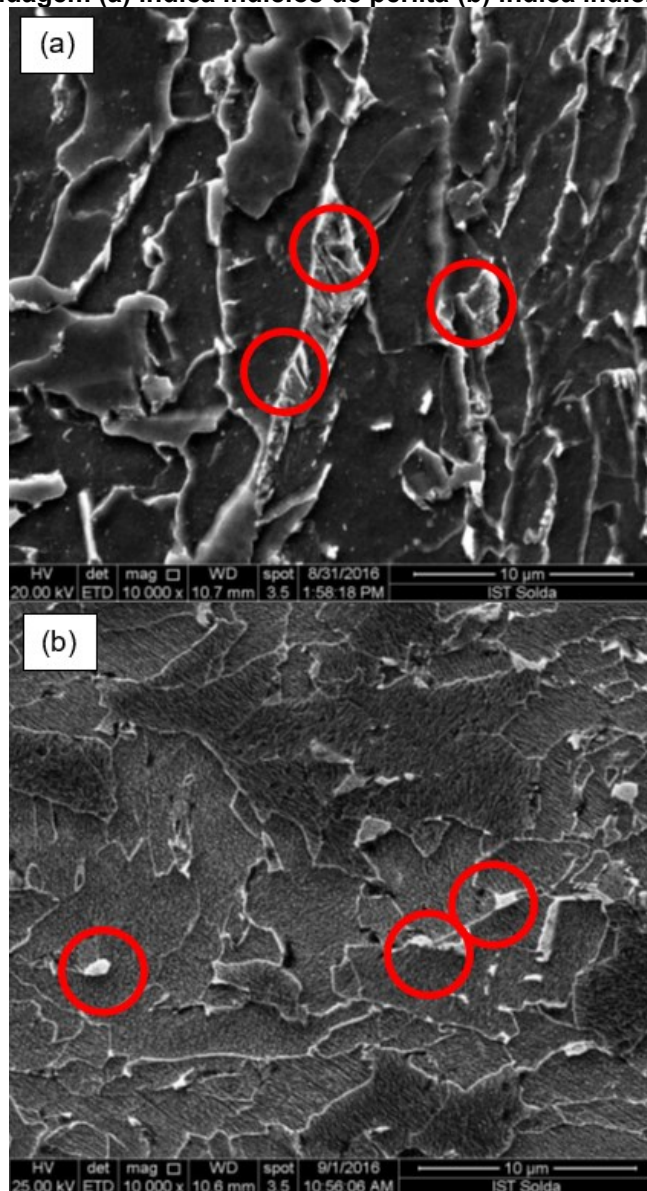


Fonte: Adaptado de CARVALHO (2016)

Na Figura 22 nota-se uma microestrutura refinada que é resultado dos efeitos do processamento termomecânico aliado à adição de microelementos. A Figura 1 retrata muito bem essa análise onde os passes de laminação com a temperatura controlada deformam os grãos e a formação de microconstituente de carbeto e nitreto se ancoram nos contornos de grão impedindo seu crescimento. Assim, dependendo das taxas de resfriamento diversos constituintes podem ser formados

nos limites de cada grão. As regiões mais claras são formadas por ferrita (austenita totalmente transformada) e as regiões mais escuras de formato mais arredondado podem ser de perlita (reação eutetóide que forma lamelas de ferrita e cementita) ou martensita, já que o resfriamento controlado pode impedir a difusão de carbono formando zonas supersaturadas e consequentemente estabilizando-se na austenita em uma rede tetragonal. A confirmação de formação dessas fases pode ser feita por meio da análise feita por um microscópio eletrônico de transmissão (MET), mas por meio de imagens feitas por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) é possível fazer uma análise prévia, como pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 – Imagens de MEV com aumento de 1000x para um material base que será sujeito ao processo de soldagem (a) indica indícios de perlita (b) indica indícios de martensita



Fonte: Adaptado de CARVALHO (2016)

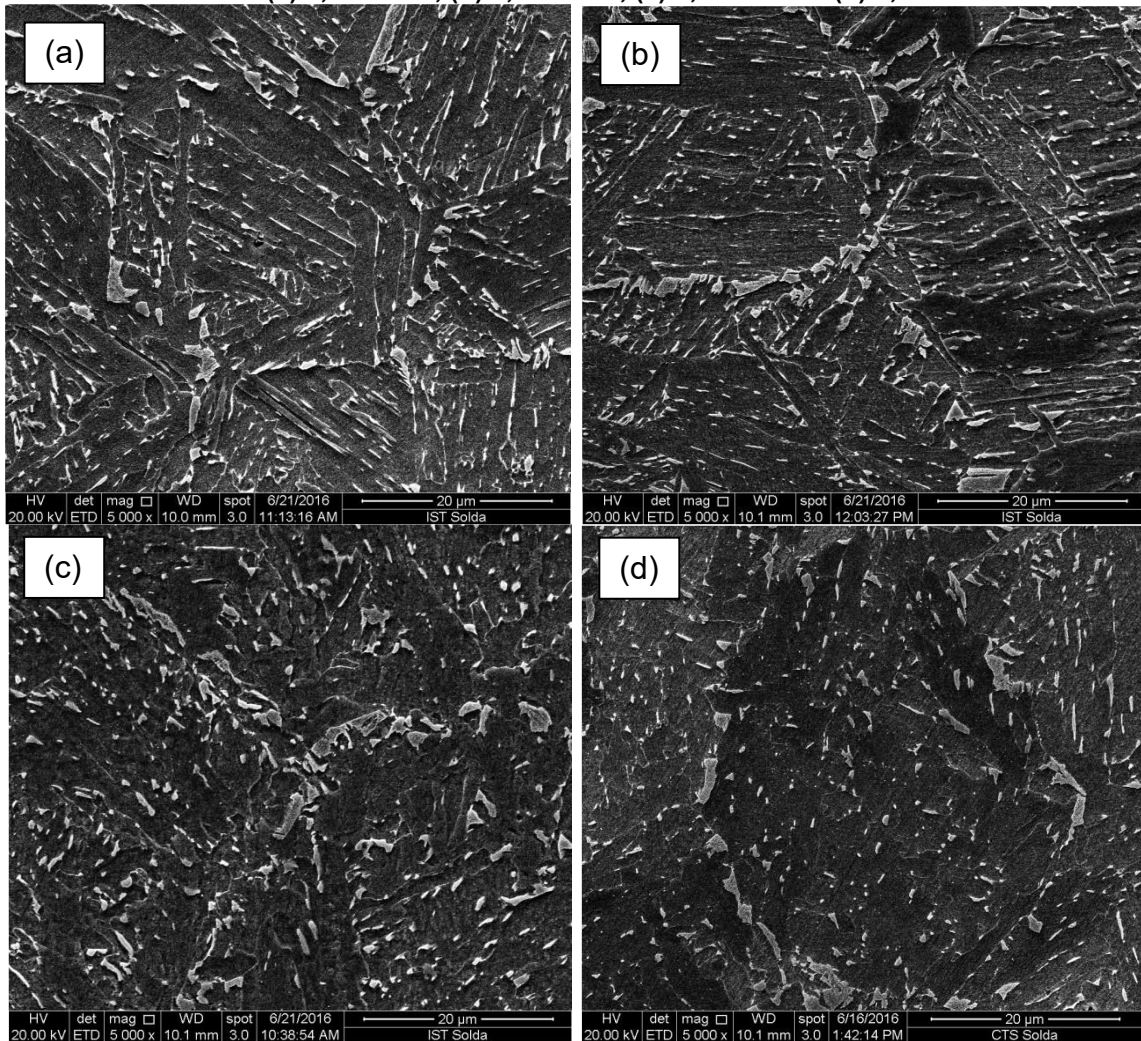
Essas imagens e análises deixam mais claro os desafios enfrentados pela soldagem de componentes de alta responsabilidade de engenharia que precisam garantir homogeneidade de suas características e propriedades.

Na Figura 23 são observadas mudanças significativas na microestrutura quando comparado com a do metal base. Com grãos maiores e grande quantidade de bainita principalmente, caracterizada pela presença dos chamados *sheaves* (feixes). Comparando-se as amostras obtidas através da aplicação do ciclo térmico com o material base a primeira característica observada é o evidente aumento do tamanho de grão que todas as amostras apresentaram, modificando a microestrutura proveniente da fabricação TMCP. Esse aumento de tamanho de grão se dá principalmente pela simulação do “primeiro passe”, representado pela Tp1, onde ao atingir elevadas temperaturas, superiores a 1200°C, permite que os precipitados de carbeto e nitreto que estavam ancorados nos contornos de grão sejam dissolvidos, deixando de atuar como barreira ao crescimento de grão. Assim, o grão tende a crescer sem restrições.

Analisando as amostras obtidas através da aplicação de aporte término de 0,5 kJ/mm e de 3,0 kJ/mm é possível observar claramente que com o aumento do aporte térmico há também um aumento do tamanho de grão. Isso se dá pelo maior tempo em altas temperaturas e pelo resfriamento que ocorre de maneira mais lenta, como observado na Figura 21.

Em tese, com o aumento do tamanho de grão tem-se também os piores resultados de energia absorvida ao impacto (quando os corpos de prova são submetidos ao ensaio Charpy-V) já que quanto menos contornos de grão menores serão os obstáculos para propagação de trincas. Para uma análise mais completa, na Figura 25 são apresentadas imagens dos corpos de prova obtidas por MEV.

Figura 25 – Imagens de MEV das condições simuladas com aumento de 5000x e ataque com lkawa de (a) 0,5 kJ/mm, (b) 1,0 kJ/mm, (c) 2,5 kJ/mm e (d) 3,0 kJ/mm

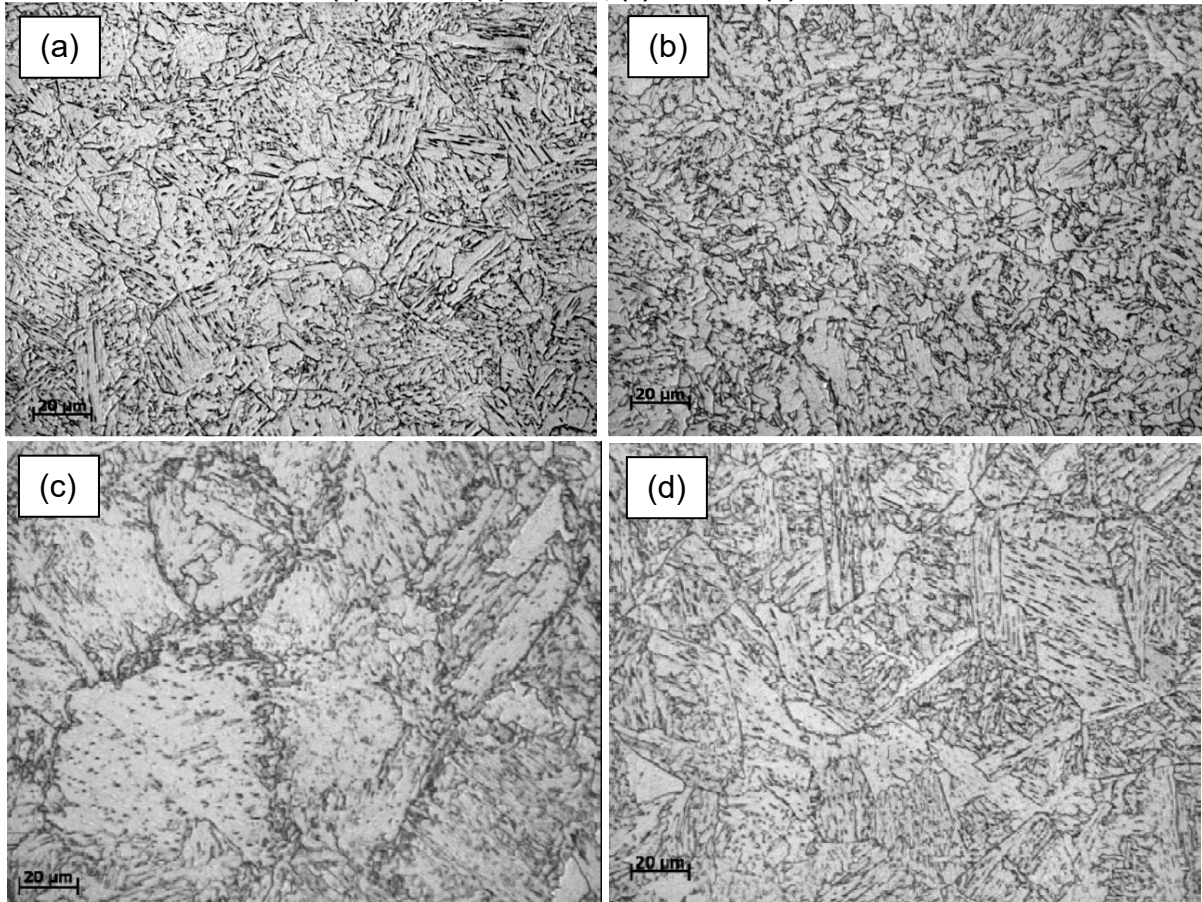


Fonte: Adaptado de CARVALHO (2016)

Em uma análise morfológica, para menores valores de aporte térmico, a microestrutura apresenta, sem levar em consideração os microconstituintes (percentual de fases, carbeto e nitreto), formato mais alongado que favorece a tenacidade. Essas morfologias alongadas são características de quando se tem altas taxas de resfriamento.

Ao entender a influência da variação de aporte térmico, pode-se partir para uma análise comparativa com simulações feitas para um mesmo valor de aporte térmico, mas para diferentes T_{p2} . Na Figura 26 são apresentadas as microestruturas obtidas através da simulação de soldagem para um aporte térmico de 1,2 kJ/mm para diferentes temperaturas de T_{p2} .

Figura 26 – Microestruturas simuladas com aporte térmico de 1,2 kJ/mm e com Tp2 aplicada de (a) 1200°C, (b) 1000°C, (c) 800°C e (d) 600°C



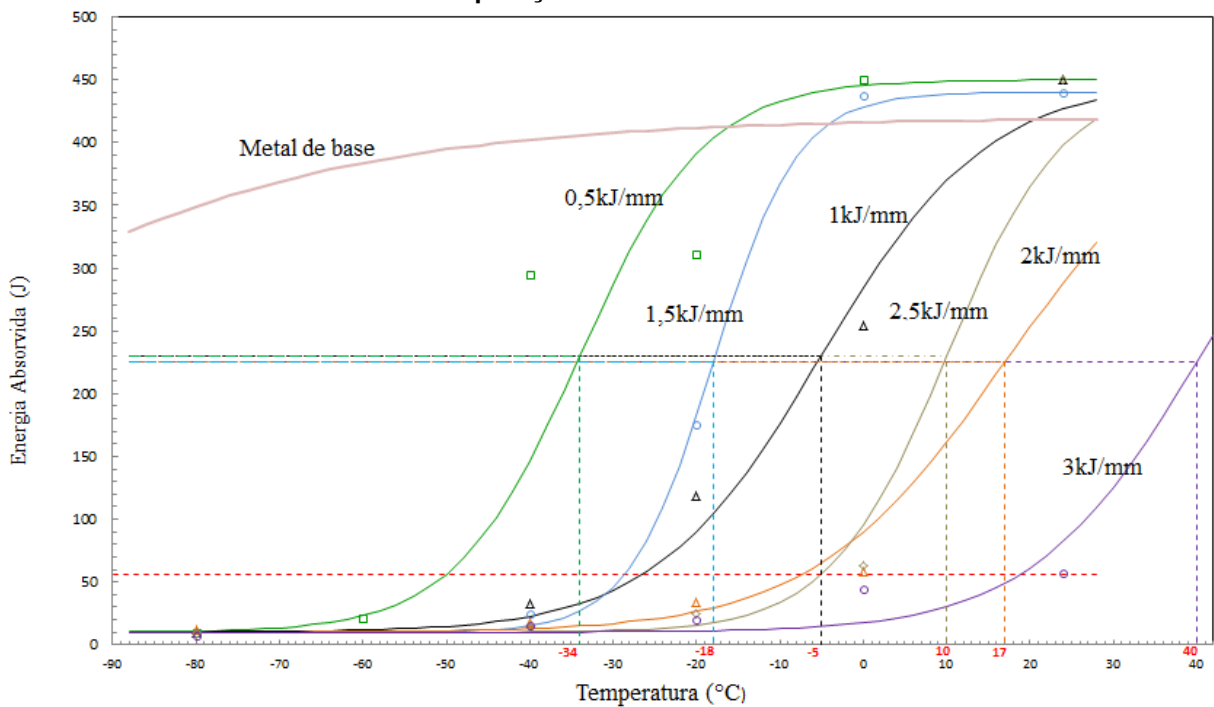
Fonte: Adaptado de ANDIA (2012)

Para 1200°C observa-se uma região tipicamente obtida para GGTZA, de grãos grosseiros que permanecem inalterados por conta da proximidade com a Tp1. O reaquecimento à 1000°C, de acordo com a curva apresentada na Figura 15, corresponde a uma região logo acima da intercrítica promovendo uma recristalização total da austenita mas sem atingir patamares de crescimento de grão, o que resulta em uma microestrutura mais refinada. Já para 800°C, atingindo a região intercrítica, tem-se uma recristalização parcial da austenita resultando em uma microestrutura próxima das apresentadas na Figura 23 já que possuem parâmetros próximos de simulação. E por fim, verificando os resultados obtidos para 600°C é possível notar uma microestrutura muito semelhante àquela obtida para a 1200°C. Isso ocorre pelo fato de não se atingir uma temperatura de transformação, fazendo com que a microestrutura se mantenha aquela que foi obtida pela simulação do primeiro passe feito à 1350°C.

4.5 Influências do Aporte Térmico na Resistência ao Impacto

De modo geral, o ensaio de impacto Charpy-V é um grande aliado das análises mecânicas feitas em corpos de prova simulados, pois de acordo com as zonas de trabalho disponíveis (Figura 20), pode-se alinhar o entalhe feito e conseqüentemente, direcionar a análise para avaliar a influência de uma dada região da ZTA na tenacidade do material. Na Figura 27 são apresentadas as curvas obtidas por Carvalho (2016) de temperatura x energia absorvida para diferentes aportes térmicos simulados.

Figura 27 – Curvas de transição dúctil x frágil para diferentes aportes térmicos simulados em comparação com o metal base



Fonte: CARVALHO (2016)

Ao analisar tais curvas, a primeira informação a chamar a atenção são os resultados apresentados para o metal base que mesmo a baixíssimas temperaturas apresenta elevados valores para energia absorvida. Logo também é observado que independente dos valores de aporte térmico há uma acentuada perda de tenacidade, justificada pelos ciclos térmicos ao qual o material é sujeito, que austenitizam o material antes do resfriamento rápido.

Ao fazer uma comparação entre os corpos de prova simulados em diferentes aportes térmicos observa-se claramente um aumento da temperatura de transição dúctil x frágil conforme o aporte térmico aumenta, onde, correlacionando a

microestrutura tem-se que para menores aportes térmicos são observados os menores tamanhos de grão e, com base nas imagens geradas por MEV, através da análise morfológica, também é possível constatar formações alongadas dos constituintes, formando barreiras à propagação de trincas.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível apresentar grande parte de um processo analítico de comparação e análise de corpos de prova que passaram pelo processo de simulação de ciclos térmicos no equipamento Gleeble®. Atualmente, diversos estudos buscam avaliar o comportamento da região de grãos grosseiros das zonas termicamente afetadas de materiais de elevada responsabilidade de engenharia, muitos deles para aplicação no setor naval e de plataformas offshore. Através da pesquisa feita dos diferentes trabalhos, é observada a importância dos simuladores termomecânicos Gleeble®, sendo uma alternativa rápida e precisa para determinar a soldabilidade de aços estruturais.

Ainda, foi possível com este estudo:

- Explicar a fundo os conceitos envolvidos no processamento e na metalurgia de soldagem dos aços TMCP, correlacionando os processos e tratamentos aos quais estes materiais são submetidos com sua morfologia e microestrutura que por sua vez influência diretamente nas propriedades apresentadas;

- Elucidar todas as variáveis presentes em uma análise completa da simulação dos ciclos térmicos de juntas soldadas, as quais envolvem desde as características do metal base como: espessura; geometria; propriedades físicas (condutividade térmica; calor específico; densidade); e principalmente sua microestrutura (morfologia); até os parâmetros de soldagem que envolvem: velocidade de aquecimento; velocidade de soldagem; velocidade de resfriamento; atmosfera de soldagem; corrente e tensão aplicadas. Assim, validando como essas variáveis se traduzem no aporte térmico e soldabilidade do material através de fórmulas, modelos matemáticos e ensaios realizados;

- Debater os principais desafios operacionais encontrados em estudos das simulações dos ciclos térmicos que incluem a elaboração de corpos de prova que possam passar por futuros ensaios mecânicos, entender os ciclos térmicos provocados pela metodologia aplicada e assim poder determinar uma faixa de trabalho ideal para obter resultados fiéis e confiáveis;

- Observar que as características ideais esperadas de um material ao qual se aplica os ciclos térmicos da soldagem é apresentar boa soldabilidade mesmo quando sujeito à elevados aportes térmicos, já que quanto maior o aporte térmico

aplicado ao material mais rápido é esse processo de união de partes influenciando diretamente nos custos de produção.

□ Concluir que, com as análises feitas, chega-se a um patamar de determinações muito tênues onde pequenas variações causam grandes transformações nos produtos destes processos. Como por exemplo os parâmetros do processo de soldagem, nos quais pequenas variações na ordem de 0,5 kJ/mm no aporte térmico podem causar grandes mudanças microestruturais e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas de uma junta soldada. Por esse motivo, ferramentas como a simulação de ciclos termomecânicos estão se tornando cada vez mais indispensáveis na evolução das indústrias, podendo-se pensar até em uma classificação dos aços em relação a sua soldabilidade, utilizando-se desse instrumento para alinhar os principais materiais de engenharia tão importantes atualmente.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, W. M. **Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.
- ANDIA, J. L. M. **Caracterização microestrutural, mecânica e simulação física da ZTA em aço API X80**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- ANIJDAN, S. H.; SABZI, M. **The evolution of microstructure of an high Ni HSLA X100 forged steel slab by thermomechanical controlled processing**. Minerals, Metals and Materials Series. 147th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings, p. 145-156, 2018.
- ATILIO, I. **Avaliação da tenacidade na região de transição dúctil-frágil de um tubo de aço grau API 5L soldado por HF/ERW**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.
- BRANDI, S. D.; WAINER, E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. Edgard Blucher. São Paulo, 2011.
- BORBA, T. M. D. **Avaliação do efeito de diferentes aportes de calor na microestrutura e tenacidade da região de grãos grosseiros da zona afetada pelo calor de aço TMCP**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2019.
- BORBA, T. M. D.; MODENESI, P. J. **Influência do ciclo térmico de soldagem no crescimento de grão, nas transformações microestruturais e na formação de MA na GGZAC de aço TMCP**. Soldagem & Inspeção. Minas Gerais, Mar/2019.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Quinta Edição. LTC. Rio de Janeiro, 2002.
- CARPENEDO, M. **Utilização de aços de alta resistência e baixa liga na redução de peso de máquinas agrícolas colheitadeiras de grãos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CARVALHO, L. P. **Análise da soldabilidade de aço API 5L X80MS por meio de simulação física**. 2016. Dissertação ((Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Quarta Edição. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 2008.

DOMINGUES, N. **Soldabilidade por centelhamento do aço dual phase 780**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

FIGUEIREDO, N. C.; *et al.* **Avaliação do desempenho da soldagem em liga de aço 9Cr-5Mo**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 49-57, Jan/Mar 2012.
HALFA, H. **Recent trends in producing ultrafine grained steels**, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Egypt, v. 2, p. 428-469, Jul/2014.

HARTMANN, V. W.; BELL, M. D.; NELSON, T. W. **Welding metallurgy**. In: JENNEY, C. L.; O'BRIEN, A. (Ed.). Welding Handbook. Miami, p. 115-156, 2001.

HIBINO, A. H. **Estudo de tenacidade da zona termicamente afetada dos aços inoxidáveis ferríticos UNS S40910 e UNS S41003**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

IMAI, S. **Recent progress and future trends for shipbuilding steel**. Welding International. London, Nov/2008.

JUNIOR, J. C. S.; ROCHA, D. B.; BRANDI, S.D. **Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 176-195, Abr/Jun 2013.

MACHADO, I. G. **Novos paradigmas para especificação de juntas soldadas**. Soldagem & Inspeção. São Paulo, v. 17, n. 3, p. 278-288, Jul/Set 2012.

MARQUES, P. V. **Soldagem – fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte, p. 363, 2009.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. 2012 – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

OLIVEIRA, C. S.; DENTI, G. B. **Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem SMAW do aço AISI 1045**. 2007. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

PERINI, F. G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. 2008. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

RIBEIRO, H. V. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas a laser em um aço ARBL**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Lorena, 2016.

RODRIGUES, J. A. **Estudo da soldabilidade entre o aço austenítico alto manganês de efeito TRIP e o aço microligado ARBL pelo processo de soldagem TIG**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SANITÁ, W. R. V. **Análise de juntas soldadas de aço API 5L X-70 com laser Nd: YAG pulsado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.

SANTOS, M. W. B.; FARIA, A.; BATALHA, G. F. **Simulação termomecânica por compressão aplicada a conformação a quente da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Bahia, Mai/2015.

SARKAR, A.; PANDA, S. A **Development study of microalloyed steel (HSLA) through experimental exploration**. 2012. Dissertação (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2012.

SCHWANKE, R. G. L. **Influência do metal de adição e da energia de soldagem na microestrutura e resistência à fadiga de juntas soldadas de aço de alta resistência e baixa liga Din S700MC**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

SILVA, C. L. J. **Fissuração pelo hidrogênio “trincas a frio”**. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/artigos/metso107.pdf>. Acesso em: 24 de abril de 2022.

SKOBIR, D. A. **High-strength low-alloy (HSLA) steels**. Prejem Rokopisa, Slovenia, Jul/2011.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, p. 494, 2004.