

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

WAGNER PICCOLI

**EFEITO DA ENERGIA DE SOLDAGEM EM UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E
BAIXA LIGA: SIMULAÇÃO DO TAMANHO DE ZTA E AVALIAÇÃO DE
PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS**

CAXIAS DO SUL

2013

WAGNER PICCOLI

**EFEITO DA ENERGIA DE SOLDAGEM EM UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E
BAIXA LIGA: SIMULAÇÃO DO TAMANHO DE ZTA E AVALIAÇÃO DE
PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS**

Relatório de Estagio II MEC0258A
apresentado como requisito à conclusão do
curso de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Msc. Victor H. V. Acosta

CAXIAS DO SUL

2013

WAGNER PICCOLI

**EFEITO DA ENERGIA DE SOLDAGEM EM UM AÇO DE ALTA
RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA: SIMULAÇÃO DO TAMANHO DE ZTA E
AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS**

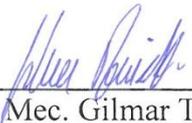
Relatório de Estágio II MEC0258A
apresentado como requisito à conclusão
do curso de graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade de Caxias do
sul.

Aprovado em 26/11/2013

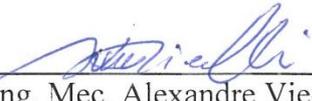
BANCA EXAMINADORA



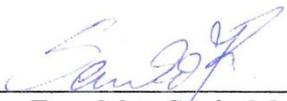
Prof. Msc. Eng. Met. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Msc. Eng. Mec. Gilmar Tonietto
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Eng. Mec. Alexandre Viecelli
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Sr. Msc. Eng. Met. Saulo Machado Rodrigues / Orientador junto à empresa
JOST Brasil Sistemas Automotivos Ltda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo vida.

Aos meus pais, Vilson e Mariazinha e minha irmã Cristiane, por estarem sempre ao meu lado, me amparando em todos os momentos, principalmente durante a execução deste trabalho. Em especial à minha namorada Janaína que muito contribuiu para o sucesso nesta trajetória, me auxiliando, e dando todo o apoio necessário, principalmente na superação dos obstáculos.

Ao professor orientador e amigo Sr. Victor Hugo Velazquez Acosta pela confiança depositada em mim e por sua dedicação, auxílio e tempo disponibilizados para execução deste projeto.

Agradeço ao meu orientador junto à empresa e colega Sr. Saulo Machado Rodrigues e ao meu colega Sr. Rudimar Mazzochi que muito contribuíram, auxiliando-me e dedicando-se conforme necessário.

Aos colegas da JOST Sistemas Automotivos e da Randon Implementos, sem deixar de mencionar o Sr. Jarinson Ribeiro Rodrigues, que de uma forma ou de outra contribuíram para o cumprimento desta jornada.

RESUMO

Os aços de alta resistência vêm sendo cada vez mais empregados na indústria metal mecânica, principalmente nos casos de redução de peso. Veículos e implementos rodoviários mais leves tem a capacidade de carga aumentada, promovem redução de consumo de combustível e com isso menor emissão de poluentes. Este estudo analisou a influência da energia de soldagem sobre o comportamento mecânico e microestrutural do aço de alta resistência e baixa liga S700 MC. O processo de soldagem utilizado foi o GMAW, este que transfere calor de forma concentrada sobre a peça, gerando alterações na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do material. Prever o tamanho da zona afetada pelo calor, com o auxílio de simulação computacional, e conhecer os impactos metalúrgicos sobre o material facilitam na elaboração de projetos que envolvem soldagem deste material. Um sistema de simulação numérica abordado neste trabalho descreve a transferência de calor para a peça, durante o processo de soldagem. Análise microestrutural e das propriedades mecânicas do aço de alta resistência e baixa liga foi realizada, utilizando-se diferentes energias de soldagem, para comparar a influência dos parâmetros no processo. Os dados obtidos permitiram o conhecimento metalúrgico e das propriedades mecânicas do material após passar pelo processo de soldagem e a simulação numérica permitiu prever os pontos onde as alterações aconteceram.

Palavras-chave: Soldagem. Aços de Alta Resistência e Baixa Liga. Transferência de Calor na Soldagem.

Área de conhecimento: Engenharia Mecânica e Engenharia Metalúrgica.

ABSTRACT

The high-strength steels have been using more and more in the metalworking industry, especially in cases of weight reduction. Light vehicle and trailers have increased load capacity, promoted reduction of fuel consumption and thus reduced emission of pollutants. This study aims to analyze the influence of heat input on the microstructure and mechanical behavior of high strength low alloy steel S700 MC. The welding process was GMAW, which transfers heat in a concentrated manner on the component, it causes changes in the microstructure and hence the material mechanical properties. Predict the size of the heat zone affected and impacts know metallurgical on the material facilitates the creation of projects that involve the welding process. Analysis of the microstructural and mechanical properties of high strength low alloy steel was performed using different welding energies, to compare the influence of the process parameters. The obtained data allowed the knowledge of metallurgical and mechanical properties of the material after passing through the welding process and numerical simulation to predict the possible points where the changes occurred.

Keywords: Welding. High Strength Low Alloy Steel. Welding Heat Transfer.

Areas of expertise: Mechanical Engineering and Metallurgic Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução histórica dos aços de alta resistência.....	16
Figura 2 – Composição Química Aço S700 MC.....	17
Figura 3 – Classificação dos processo.....	18
Figura 4 – Processo de soldagem GMAW.....	19
Figura 5 – Conceito de energia de soldagem. L é o comprimento da solda e t é o tempo.	21
Figura 6 – Ciclo térmico de soldagem.....	21
Figura 7 – Direções de escoamento do calor em juntas (a) de topo e (b) em ângulo.....	22
Figura 8 – Representação do estado quase estacionário e seus eixos.....	24
Figura 9 – Representação simplificada da forma da fonte de calor.....	24
Figura 10 – Propriedades físicas aproximadas de alguns materiais.....	24
Figura 11 – Função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero, $K_0(x)$	25
Figura 12 – Regiões de uma solda por fusão.....	27
Figura 13 – Diagrama esquemático de alterações na zona fundida.....	27
Figura 14 – Seção transversal de uma solda por fusão.....	28
Figura 15 – Variação na solubilidade do hidrogênio no ferro líquido e sólido.....	29
Figura 16 – Metalografia da região de transição entre a ZTA e a ZF.....	29
Figura 17 – Regiões características da região em torno do cordão de solda.....	31
Figura 18 – Energia de soldagem em função da espessura da chapa.....	32
Figura 19 – Imagem esquemática do modelo de junta com chanfro e nariz.....	35
Figura 20 – Robô de Soldagem.....	35
Figura 21 – Chapas preparadas para o processo de soldagem.....	36
Figura 22 – Cobre-junta cerâmico.....	36
Figura 23 – Layout esquemático dos corpos de prova soldados.....	37
Figura 24 – Layout dos corpos de prova para ensaio de tração da chapa bruta.....	37
Figura 25 – Corte dos corpos de prova em jato d'água.....	38
Figura 26 – Representação da linha de medição da microdureza.....	39
Figura 27 – Local para acomodação das chapas para soldagem e robô utilizado.....	40
Figura 28 – Representação do fluxo de calor sobre a chapa durante o processo de soldagem com <i>Energia Maior</i>	41
Figura 29 – Gráfico de simulação do fluxo de calor sobre a chapa durante o processo de soldagem com <i>Energia Menor</i>	41

Figura 30 – Curva de ciclo térmico para o ponto de interesse sobre a chapa. a) soldagem com <i>Energia Maior</i> e b) <i>Energia Menor</i>	42
Figura 31 – Macrografia da junta soldada com <i>Energia Maior</i>	43
Figura 32 – Macrografia da junta soldada com <i>Energia Menor</i>	43
Figura 33 – Micrografias encontradas na amostra soldada com <i>Energia Maior</i> ; a) metal base (500x), b) material de solda (100x), c) região de crescimento de grão (100x), d) região de refino de grão ou normalização (500x).....	44
Figura 34 – Microestrutura do metal base de: a) ferrita, e b) agulhas de martensita (500x)....	45
Figura 35 – Microestrutura do metal de solda; a) ferrita de contorno de grão, b) ferrita acicular, c) ferrita de segunda fase alinhada (100x)	45
Figura 36 – Microestrutura da região de crescimento de grão apresentando microestrutura com grãos de: a) ferrita e b) agregados de ferrita e carbonetos (100x)	46
Figura 37 – Microestrutura da região de refino de grãos ou normalização: a) grãos de ferrita e b) agregados de ferrita e carbonetos (500x)	47
Figura 38 – Região de transição: a) metal de solda p/ b) região de crescimento de grãos (100x)	47
Figura 39 – Região de transição: a) crescim. de grãos p/ b) região de homogeneização (100x)	48
Figura 40 – Região de transição entre: a) região de crescimento de grãos, b) região de refino de grão e c) metal base (50x).....	48
Figura 41 – Região com defeito de soldagem na amostra com <i>Energia Maior</i> (50x)	49
Figura 42 – Região com defeito de soldagem na amostra com <i>Energia Menor</i> (50x).....	49
Figura 43 – Perfil de microdureza para amostra soldada com parâmetros de <i>Energia Maior</i> MB – metal base, ZTA – zona termicamente afetada, MS – metal de solda, RRG – região de refino de grãos, RCG – região de crescimento de grãos.....	50
Figura 44 – Perfil de microdureza para amostra soldada com parâmetros de <i>Energia Menor</i> MB – metal base, ZTA – zona termicamente afetada, MS – metal de solda, RRG – região de refino de grãos, RCG – região de crescimento de grãos.....	51
Figura 45 – Gráfico comparativo das propriedades mecânicas das amostras soldadas e do material original.....	53
Figura 46 – Região de rompimento em falha de solda do corpo de prova número 2 apresentando porosidade na região do metal de solda.....	53
Figura 47 – Rompimento dos corpos de prova na ZTA. a) corpo de prova número 1, b) corpo de prova número 3	54

Figura 48 – Rompimento do corpo de prova número 5 na ZTA	54
Figura 49 – Rompimento dos corpos de prova na falha de solda. a) número 4, b) número 6..	54
Figura 50 – Micrografias encontradas na amostra soldada com <i>Energia Menor</i> ; a) metal base (500x), b) material de solda (100x), c) região de crescimento de grão (100x), d) região de refino de grão (500x).....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço DOMEX [®] 700 MC	33
Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados.....	34
Tabela 3 – Parâmetros geométricos da junta	35
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do arame de solda AWS A 5.18 ER 70 S - 6	35
Tabela 5 – Tamanhos da zona termicamente afetada (ZTA) obtida por simulação computacional, ensaio macrográfico e perfil de microdureza	51
Tabela 6 – Propriedades mecânicas das amostras submetidas ao ensaio de tração.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA	15
2.1.1	Generalidades dos Aços Avançados de Alta Resistência	15
2.1.2	Aço EN-10149-2 S700 MC	16
2.2	SOLDAGEM	17
2.2.1	Soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível	18
2.2.2	Transferência de calor na soldagem	19
2.2.3	Estudo teórico do fluxo de calor na soldagem	23
2.3	METALURGIA DA SOLDAGEM	26
2.3.1	Macroestrutura de soldas por fusão	26
2.3.2	Características da zona fundida (ZF)	28
2.3.3	Características da zona termicamente afetada (ZTA)	30
2.3.4	Características de soldagem de aços de alta resistência e baixa liga	31
3	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1.1	Definição dos parâmetros de soldagem	33
3.1.2	Elaboração de algoritmo para simulação da transferência de calor na soldagem	34
3.1.3	Procedimento de soldagem	34
3.1.4	Procedimento de retirada dos corpos de prova	36
3.1.5	Análise macroestrutural	38
3.1.6	Análise microestrutural	38
3.1.7	Ensaio de microdureza	38
3.1.8	Ensaio de tração	39
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
3.2.1	Soldagem dos corpos de prova	39
3.2.2	Simulação da transferência de calor durante o processo de soldagem	40

3.2.3 Análise macroestrutural	42
3.2.4 Análise microestrutural	44
3.2.5 Ensaio de microdureza	50
3.2.6 Ensaio de tração	52
CONCLUSÕES.....	56
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXO A.....	60
ANEXO B	60

1 INTRODUÇÃO

Aços de alta resistência e baixa liga, ARBL (do Inglês, *High Strenght Low Alloy, HSLA*), são cada vez mais usuais na indústria metal mecânica. Estes materiais foram desenvolvidos principalmente para atender os desafios de competitividade e as restrições quanto ao consumo de energia. O uso dos aços de alta resistência proporciona redução de peso nos veículos e implementos rodoviários e, assim sendo, menor consumo de combustível e menos poluentes lançados na atmosfera.

A utilização de aços de alta resistência em veículos comerciais possibilita o aumento na capacidade de carga devido a necessidade do uso de menos material na confecção do conjunto, e, assim sendo, maior rentabilidade ao transportador. Em automóveis e motocicletas, a utilização destes aços está ligada a redução de custo e de consumo de combustível por tornarem o veículo mais leve (DEMIR, ERDOGAN, 2008; GORNI, 2008).

O processo de soldagem envolve uma fonte de calor localizada e intensa que provoca alterações metalúrgicas nos materiais. As chapas de aço de alta resistência e baixa liga são concebidas por processo de laminação termocontrolada, gerando uma microestrutura refinada e são muito influenciados pelo calor gerado na soldagem. É muito importante verificar o comportamento dos mesmos antes de aplicá-los em produtos soldados (RODRIGUES, 2012).

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria metal-mecânica, inserida em um meio caracterizado pela forte concorrência, ainda não adota como prática o uso de aços de alta resistência em toda sua gama de produtos. Um dos motivos para isso está ligado ao fato de que estes materiais são novos, visto que o desenvolvimento destes surgiu em torno da crise do petróleo de 1973, na indústria automotiva que exigia redução de peso para minimizar o consumo de combustível dos veículos, e necessitam de um maior entendimento sobre o comportamento metalúrgico e mecânico quando expostos as mesmas condições de processamento dos aços comuns.

Este trabalho de estágio foi desenvolvido na empresa JOST Brasil Sistemas Automotivos LTDA, na área de Engenharia do Produto. Com sede em Caxias do Sul-RS, a empresa foi fundada em 31 de agosto de 1995, sendo resultado de uma *joint-venture* entre a empresa brasileira Randon S/A Implementos e Participações e a empresa alemã JOST-Werke. A JOST produz sistemas e componentes aplicados a veículos para transporte de carga e implementos rodoviários, com destaque para Quinta-Roda, Pino-Rei, Suspensor Pneumático,

Semi-Varão, Engates Esférico e Automático e Porta Estepe. A JOST é líder nacional no mercado em que atua.

Dos itens do portfólio JOST, parte passa pelo processo de soldagem, tal como Porta Estepe, Engate Esférico e Semi-Varão. Itens como o Porta Estepe e Engate Esférico devem suportar grandes cargas estáticas e dinâmicas. Baseado no negócio da empresa que é a segurança e confiabilidade em acoplamentos e sistemas para veículos e visando a melhoria em seus produtos, a utilização de aços de alta resistência, hoje não aplicados nos produtos JOST, requer melhor entendimento quanto às alterações nas propriedades mecânicas e metalúrgicas ao passar pelo processo de soldagem.

Obter o conhecimento sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas dos aços de alta resistência e baixa liga poderá permitir a realização de estudos para aplicação deste material nos produtos JOST.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é verificar a influência da energia de soldagem nas propriedades mecânicas e metalúrgicas de um aço de alta resistência e baixa liga, mediante simulação numérica da transferência de calor durante o processo de soldagem, ensaios metalográficos e mecânicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) estudar os conceitos de soldagem e os processos para realização da mesma, com atenção especial ao processo GMAW – *Gas Metal Arc Welding*;
- b) estudar os aços de alta resistência e baixa liga, principais características e a influência do calor gerado durante o processo de soldagem nos aços em geral;
- c) criar um algoritmo computacional para simular o fenômeno de transferência de calor no processo de soldagem a fim de verificar o tamanho da zona termicamente afetada pelo calor;
- d) Avaliar o comportamento metalográfico e mecânico do material ao se variar os parâmetros de soldagem, confrontando o tamanho da zona termicamente afetada pelo calor com os resultados de simulação computacional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica envolvida neste estudo que visa verificar a influência da energia de soldagem em um aço de alta resistência e baixa liga, simulando o tamanho da zona termicamente afetada e avaliando as propriedades mecânicas e metalúrgicas após o processo de soldagem.

2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Esta seção aborda tópicos gerais sobre os aços de alta resistência, incluindo um breve histórico, aspectos sobre a microestrutura e propriedades mecânicas, principalmente dos aços de alta resistência e baixa liga, subdivisão dos aços avançados de alta resistência, os quais serão o foco deste estudo.

2.1.1 Generalidades dos Aços Avançados de Alta Resistência

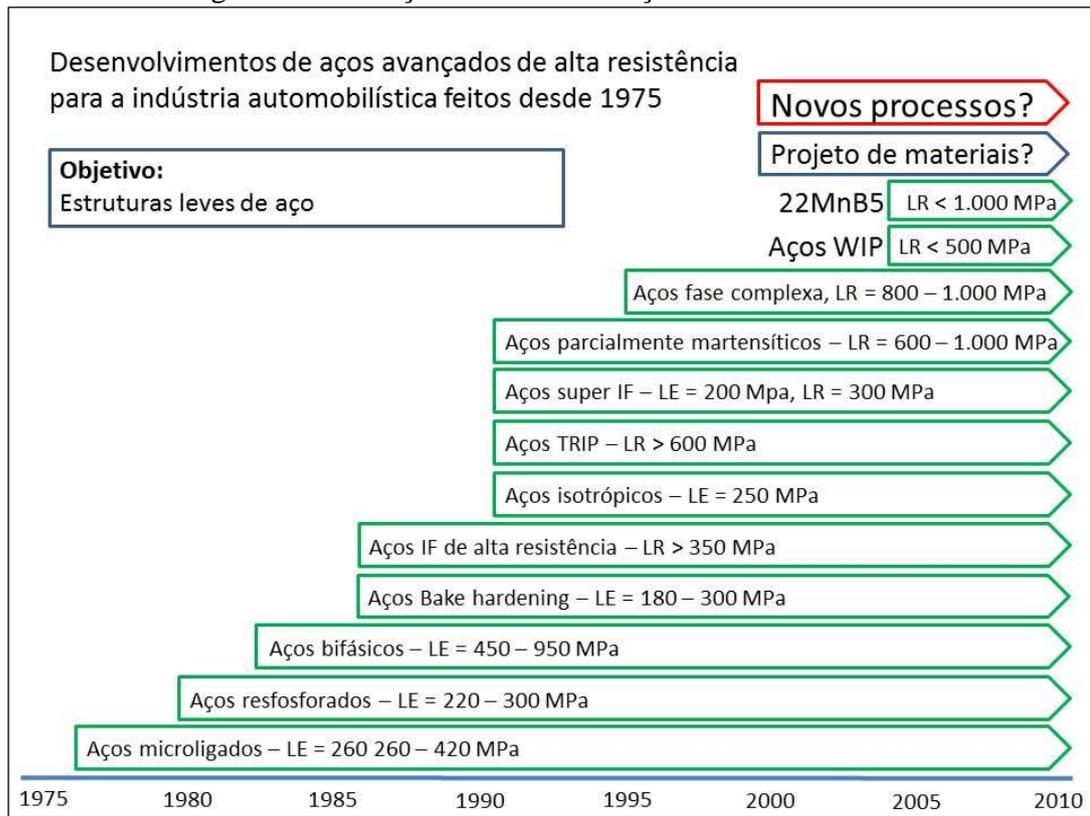
As usinas siderúrgicas, impulsionadas pela indústria automotiva que demandava soluções para amenizar os efeitos da crise do petróleo de 1973, como já mencionado, buscaram na ciência metalúrgica formas de produzir aços mais resistentes que possibilitassem a produção de itens que permitissem o atendimento aos mesmos requisitos de resistência mecânica, porém com menor peso. Surgiram os aços de alta resistência e baixa liga – ARBL (HSLA, do Inglês *High Strength low Alloy*), com microestrutura ferrítica-perlítica mais refinada, capacitando o endurecimento por precipitação.

A maior resistência mecânica do material trouxe redução de performance para estampabilidade e para suprir este problema surgiram os aços bifásicos (do Inglês *Dual phase*).

Em 1985 a crise do petróleo terminou mas a indústria automotiva continuou a demandar avanços nos materiais com o intuito de diminuir os preços de compra e manutenção de seus produtos. As usinas siderúrgicas continuaram o desenvolvimento de novos aços, com características adequadas a cada aplicação. A Figura 1 mostra a evolução histórica dos aços de alta resistência.

A partir da década de 1990 estes aços foram englobados em uma única família e passaram a se chamar Aços Avançados de Alta Resistência (GORN, 2008).

Figura 1 – Evolução histórica dos aços de alta resistência



Fonte: Adaptado de Corte & Conformação de Metais (2008)

2.1.2 Aço EN-10149-2 S700 MC

A indústria de fabricação de implementos rodoviários e de veículos busca novas fontes de matéria-prima que possibilitem principalmente a redução no peso dos produtos. Além da questão ambiental, ligada a crescente demanda por combustível fóssil, a “lei da balança”, que restringe o peso máximo que o veículo e o implemento rodoviário pode transitar, faz com que os proprietários busquem por modelos mais leves e que permitam uma maior capacidade de carga, promovendo aumento no lucro por quilômetro rodado.

As combinações rodoviárias estão cada vez maiores e com capacidades de carga mais elevadas, aumentando a preocupação dos projetistas com problemas estruturais e com o excesso de peso nestes produtos. Com esta necessidade, os aços de alta resistência e baixa liga, materiais potenciais para estruturas leves com alta resistência onde a solda é requerida e que apresentam também ótima conformabilidade, vieram facilitar o projeto destes novos implementos por permitirem a utilização de menos material garantindo a alta resistência da combinação. No início, aços ARBL se baseavam no limite de resistência mecânica (LR), dando-se menos importância ao limite de escoamento (LE), tenacidade e soldabilidade do aço. A medida que estes materiais tiveram sua resistência elevada, considerações sobre a soldagem

tiveram que ser observadas. Isto levou a redução no carbono da liga diminuindo a probabilidade do surgimento de trincas durante o processo de solda (CORTÉZ, et al, 2010; RODRIGUES, 2012).

Estes aços são chamados de bifásicos e são uma evolução dos aços ARBL. As microestruturas são mais complexas, formadas por uma fase de grãos de ferrita e outra de agulhas de martensita.

O aço S700MC, descrito na norma DIN EN 10149, é um aço ARBL bifásico. O aço que será utilizado neste estudo recebe a nomenclatura DOMEX[®] 700 MC, atendido na norma descrita anteriormente, na qual é marca registrada da SSAB Tunnplat. As chapas deste material são obtidas pelo processo de laminação termocontrolada e possuem alto limite elástico para conformação a frio e boa soldabilidade. O material possui limite de escoamento de ou maior que 700 MPa e limite de resistência a tração entre 750 a 950 MPa. A composição química está descrita na Figura 2. Estas características tornam este aço adequado para a aplicação em, por exemplo, chassis de implementos rodoviários e para a indústria automotiva (RODRIGUES, 2012).

Figura 2 – Composição Química Aço S700 MC

Composição Química Aço EN-10149-2 S700MC							
C % máx.	Si %	Mn %	P % máx.	S % máx.	Nb %	V % máx.	Ti %
0,12	0,6	2,1	0,025	0,01	0,09	0,2	0,15

Fonte: Adaptado de Estudo do comportamento microestrutural e mecânico de Juntas Soldadas entre aços de alta resistência – DOMEX 700 MC (2012)

2.2 SOLDAGEM

De modo geral, denomina-se soldagem o processo de união entre dois metais utilizando-se uma fonte de energia, aplicando pressão ou não (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

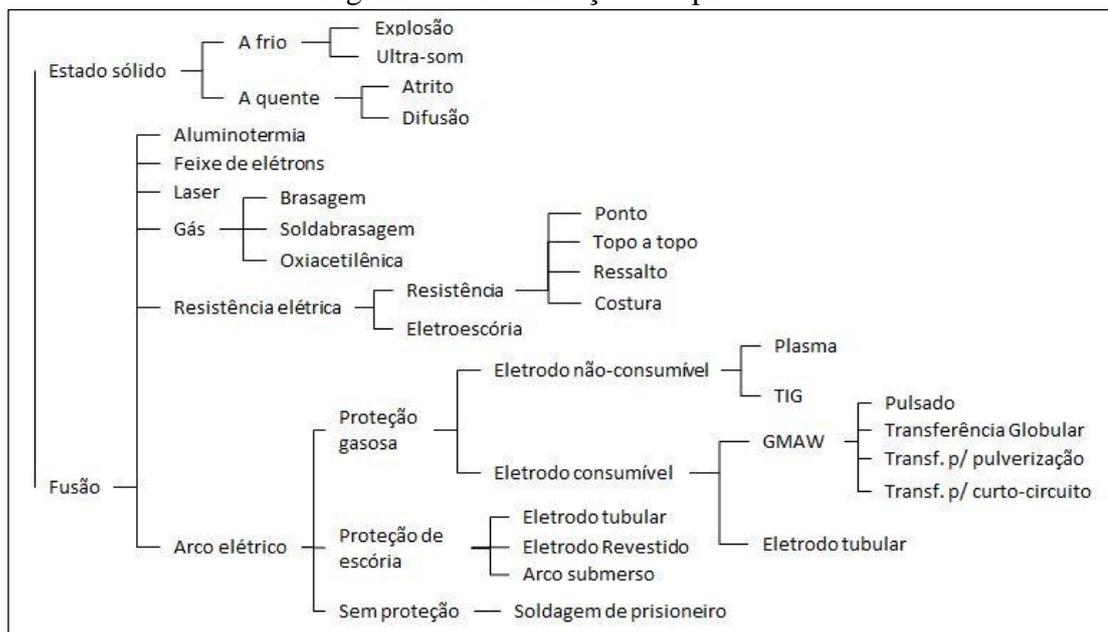
O processo de soldagem possui dois grandes grupos. No primeiro, a energia aplicada no processo é utilizada para fundir o material de base das partes a serem unidas, a sua solubilização ocorre na fase líquida. O segundo, que não será abordado aqui, utiliza energia em forma de pressão para fazer a união das partes, causando a solubilização na fase sólida.

Na soldagem, visa-se a união de duas ou mais peças mantendo a continuidade das propriedades físicas e químicas na junta. Para garantir a continuidade é necessário, normalmente, o uso de material adicional, capaz de preencher a folga entre as peças. Deve ocorrer a solubilização do material de adição com o material base e este processo requer

energia para que ocorra. Existem vários processos de união de materiais, cada um atendendo com maior ou menor eficiência os requisitos a que são submetidos. A Figura 3 mostra alguns processos de soldagem (QUITES, 2002).

Neste estudo, será discutido somente o processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível, este que será utilizado para soldagem de corpos de prova em um momento posterior.

Figura 3 – Classificação dos processo



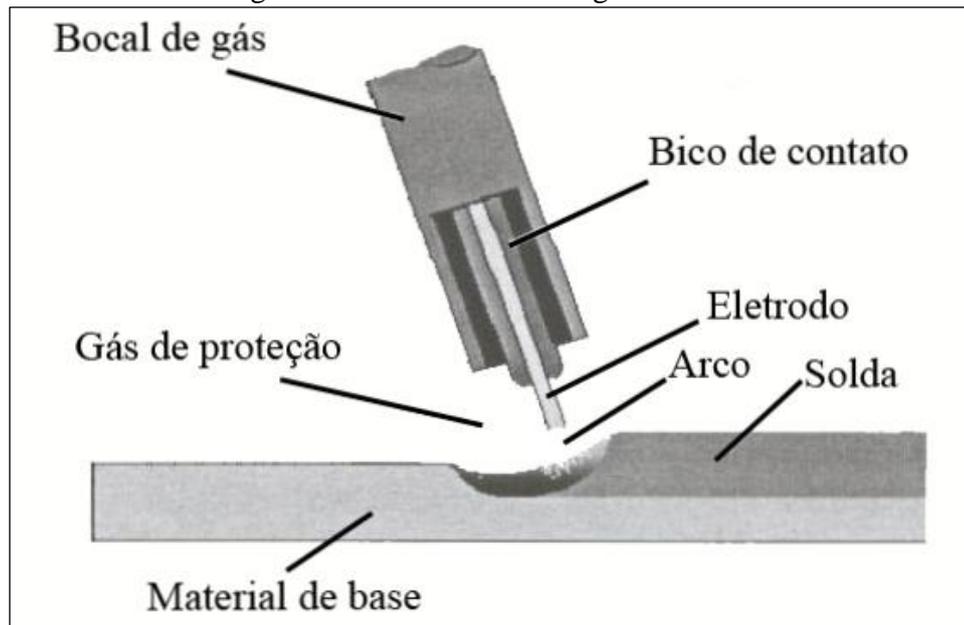
Fonte: Adaptado de Soldagem processos e metalurgia (1992)

2.2.1 Soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível

O termo Soldagem ao Arco (do Inglês *Arc Welding*) é amplamente utilizado na indústria. O processo faz parte de um largo e diversificado grupo que utiliza o calor gerado por um arco elétrico para fundir metais e uni-los. O processo de união de metais utilizando o arco elétrico pode ou não exigir a adição de material ou a utilização de pressão (AWS, 2001).

O processo de solda comumente utilizado na indústria de implementos rodoviários é o processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível, GMAW (do Inglês, *Gas Metal Arc Welding*). O processo utiliza um arco elétrico formado entre a peça e um eletrodo consumível nu alimentado constantemente, protegido por uma atmosfera de gás inerte ou oxidante. O eletrodo funde-se com o calor gerado pelo arco elétrico conforme é alimentado na poça de fusão formada no metal base. A Figura 4 ilustra o processo de soldagem GMAW. (MACHADO, 2007; QUITES, 2002).

Figura 4 – Processo de soldagem GMAW



Fonte: Introdução à soldagem a Arco Voltaico (2002)

O processo de soldagem GMAW traz algumas vantagens em relação a outros processos. Entre elas vale citar que o processo é semi-mecanizado, podendo ser totalmente mecanizado, automático ou realizado por robô. Quando adequadamente ajustado, permite a soldagem em várias posições, gerando pouquíssima escória devido ao uso de gás como proteção e obtendo-se ótimos resultados. A velocidade de soldagem é alta, impulsionada pela alimentação contínua do eletrodo proporcionando menor distorção das peças, juntamente com a taxa de deposição de material proporcionada pela alta densidade de corrente na ponta do eletrodo. Facilidade da soldagem, controle da penetração e fácil treinamento de operadores também podem ser destacados como vantagens do processo (AWS, 2001; MACHADO, 2007; MIRZAEI. et al, 2013; WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

2.2.2 Transferência de calor na soldagem

Na maioria dos processos de soldagem, tal como o processo GMAW, a junta é aquecida a altas temperaturas, na faixa de 1.000 a 20.000 °C, de forma concentrada. Esta transferência de calor da fonte para a junta causa variação de temperatura na solda e, além da fusão e solidificação do cordão de solda, variações dimensionais e alterações microestruturais causadoras de efeitos indesejáveis como tensões residuais e distorção, alteração de propriedades mecânicas como ductilidade, tenacidade, resistência mecânica, etc, formação de trincas e deterioração de propriedades físicas e químicas.

No caso da soldagem de aços ARBL é necessário manter a tenacidade do material sem reduzir a resistência mecânica (MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

Os fatores mais importantes que afetam o processo de transferência de calor na soldagem são a energia de soldagem, o rendimento térmico do arco elétrico, para o caso de solda GMAW, distribuição e picos de temperatura durante a soldagem, tempo de permanência nas temperaturas do processo e velocidade de resfriamento da região.

A energia de soldagem representa a potência relacionada com a energia elétrica produzida no arco e permite uma combinação entre os parâmetros de soldagem para posterior utilização na interpretação dos resultados práticos e relacionados as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada.

Considerando que o calor necessário para formar o cordão de solda é originado de uma fonte de calor ideal com potência P que se desloca ao longo de um eixo de referência com uma velocidade constante v , fornecendo então energia por unidade de comprimento de forma fixa, pode-se escrever a equação 1 como (MACHADO, 2000; GURGEL, MACIEL, VASCONCELOS, 2009; MARTINS. et al, 2011):

$$P = \eta V I \quad (1)$$

Onde:

P = potência [VA];
 η = eficiência térmica do processo;
 V = tensão [volts];
 I = intensidade da corrente [Ampères].

A energia de soldagem H , que representa a quantidade de calor fornecida por comprimento do cordão de solda, representada na Figura 5, pode ser escrita como a equação 2 (MACHADO, 2000):

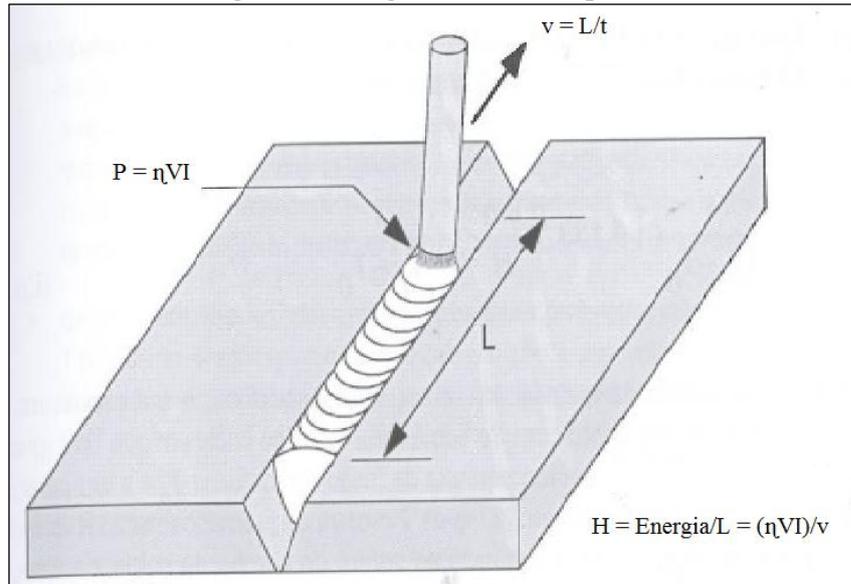
$$H = \frac{\eta V I}{v} \quad (2)$$

Onde:

H = energia de soldagem [J/mm]
 v = velocidade de soldagem [mm/s].

Após esta etapa de transferência de calor do arco elétrico para a peça, a dissipação deste calor ocorre principalmente por condução, das regiões aquecidas para o restante do material.

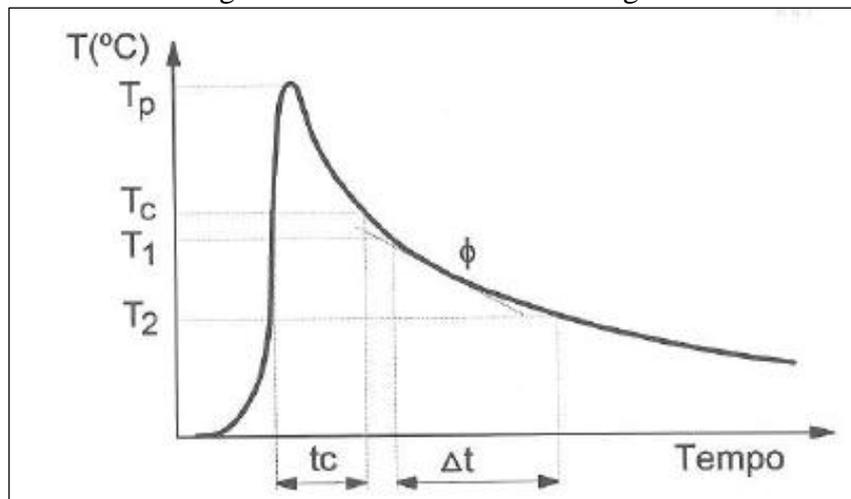
Figura 5 – Conceito de energia de soldagem. L é o comprimento da solda e t é o tempo.



Fonte: Adaptado de Soldagem: Fundamentos e Tecnologia (2005)

A curva de ciclo térmico, representada na Figura 6 mostra a variação da temperatura ao longo do tempo, em pontos entorno da junta soldada, devido à passagem da fonte de calor (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Figura 6 – Ciclo térmico de soldagem



Fonte: Soldagem: Fundamentos e Tecnologia (2005)

Características importantes do ciclo térmico de soldagem estão descritas a seguir (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005):

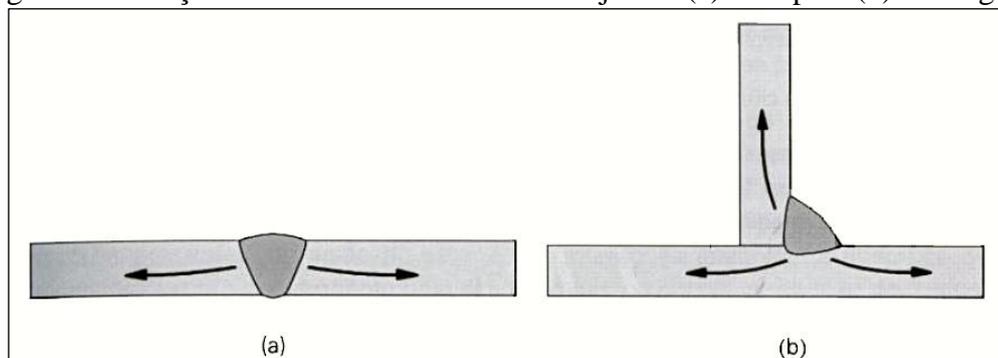
- a) temperatura de pico (T_p): é a máxima temperatura que um ponto da solda pode atingir e determina a extensão da região afetada pelo calor durante o processo de soldagem. A temperatura de pico diminui conforme afasta-se do centro da solda;

- b) tempo de permanência (t_p) acima de uma temperatura crítica: representa o tempo em que um ponto fica submetido a uma temperatura acima da temperatura crítica (t_c) que é a temperatura mínima para que ocorra transformação relevante como a alteração de fases, alterações microestruturais e nas propriedades mecânicas do material soldado;
- c) velocidade de resfriamento (ϕ): é obtida pela inclinação da curva de resfriamento em uma determinada temperatura (T). Comumente o resfriamento de uma solda é caracterizado pelo tempo necessário ($\Delta t_{T_1/T_2}$) para a solda resfriar de um ponto a temperatura mais alta (T_2) para um ponto a temperatura mais baixa (T_1). Para os aços, em geral, as temperaturas consideradas são 800 e 500 °C ($\Delta t_{8/5}$).

Esta última característica é importante na soldagem dos aços carbono pois estes, quando aquecidos a altas temperaturas como é o caso do processo de solda GMAW, são austenitizados na região do cordão e ao se resfriarem os produtos da transformação da austenita dependem fortemente de como se dá este processo. Os ciclos térmicos e a repartição térmica do processo de solda dependem de diversas variáveis. Algumas delas estão descritas a seguir (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005):

- a) tipo de metal de base: a condutividade térmica de cada material varia e com isso as velocidades de resfriamento e o aquecimento também variam;
- b) geometria da junta: juntas em T dissipam mais calor e resfriam mais rápido que juntas de topo pois o fluxo de calor na primeira possui três direções para sua propagação, conforme visto na Figura 7;

Figura 7 – Direções de escoamento do calor em juntas (a) de topo e (b) em ângulo



Fonte: Soldagem: Fundamentos e Tecnologia (2005)

- c) espessura da junta: uma junta com maior espessura facilita o escoamento do calor por permitir uma maior área de condução de calor e assim sendo uma maior superfície de troca térmica;

- d) energia de soldagem e temperatura inicial da peça: o aumento destes dois parâmetros faz com que a velocidade de resfriamento da peça diminua e a repartição térmica aumente.

Nos capítulos seguintes será discutida a metalurgia da soldagem, apresentando as características do material influenciadas pelo aquecimento na região da solda, este que é originado do processo GMAW, e pelas diferentes taxas de resfriamento em torno da junta soldada.

2.2.3 Estudo teórico do fluxo de calor na soldagem

O calor gerado no processo de soldagem ao arco elétrico escoava pela peça pelo processo de condução e as perdas por radiação e convecção na superfície podem ser desconsideradas, exceto em chapas finas. Soluções adequadas da equação 3 de balanço de energia podem mostrar as variações de temperatura associadas ao processo de soldagem.

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

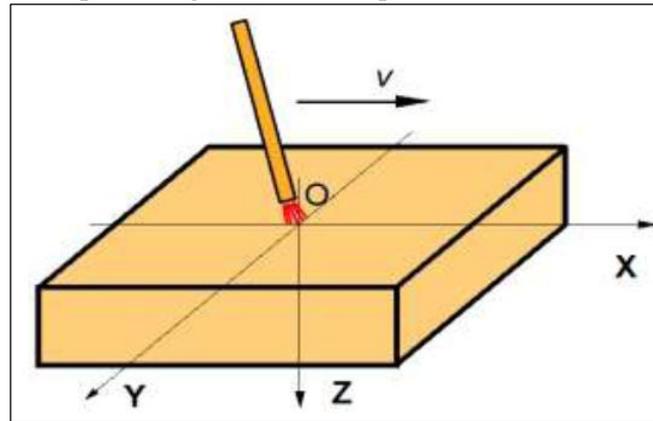
Onde:

- ρ = massa específica do material [Kg/m³];
- c = calor específico [J/Kg°C];
- T = temperatura [°C];
- t = tempo [s];
- v = velocidade [m/s];
- k = condutividade térmica [W/m°C];
- s = calor gerado [J].

Rosenthal foi o primeiro a simplificar os modelos matemáticos do fluxo de calor durante o processo de soldagem, na década de 1930. Para isto algumas simplificações foram necessárias conforme descrito a seguir (KOU, 2003; MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012):

- a) fluxo de calor em estado quase estacionário: como mostrado na Figura 8, admite-se que a distribuição de temperaturas se mantém inalterada para um sistema de coordenadas x , y e z que se move junto com a poça de fusão, ou com a tocha de soldagem. Isto torna o problema independente do tempo. Pode-se aceitar esta suposição quanto o processo de solda mantém velocidade constante, e quando desprezamos as temperaturas inicial e final do cordão de solda;

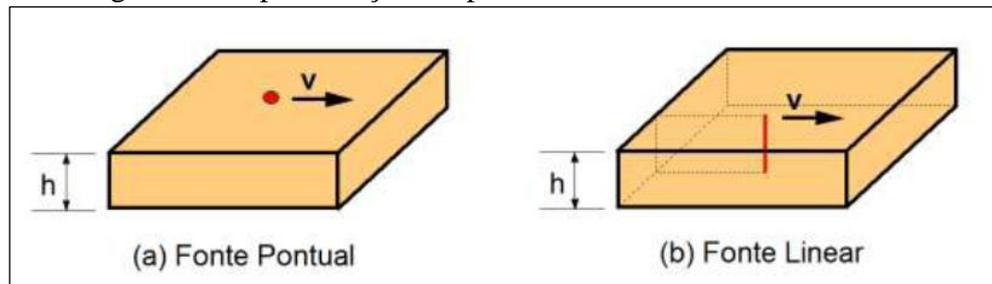
Figura 8 – Representação do estado quase estacionário e seus eixos



Fonte: Introdução à metalurgia da soldagem (2012)

- b) a fonte de calor é considerada um ponto na superfície ou uma linha que atravessa a peça de cima a baixo, conforme ilustrado na Figura 9:

Figura 9 – Representação simplificada da forma da fonte de calor



Fonte: Introdução à metalurgia da soldagem (2012)

- c) considera-se uma peça com comprimento, largura e algumas vezes espessura infinitos: elimina-se aqui a necessidade de especificar as condições de contorno;
- d) desconsidera-se a variação das propriedades físicas com a temperatura: propriedades físicas do material variam com a temperatura mas a abordagem destas tornaria o cálculo muito complexo ou até impossível. A Figura 10 apresenta uma tabela das propriedades físicas de alguns materiais.

Figura 10 – Propriedades físicas aproximadas de alguns materiais

Material	Propriedade			
	Massa específica [ρ] (kg/m^3)	Calor específico [c] ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$)	Condutividade térmica [k] ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$)	Temperatura de fusão [T_f] ($^\circ\text{C}$)
Aço carbono	7800	630	45	1520
Aço inoxidável	7900	590	25	1500
Alumínio	2700	1050	225	658
Cobre	8900	420	380	1083

Fonte: Introdução à metalurgia da soldagem (2012)

A equação de Rosenthal para duas dimensões considera uma chapa fina onde as variações de temperatura ocorrem somente nas direções sobre a placa, mantendo a temperatura no sentido da espessura constante tanto na parte superior como na inferior. Este caso pode ser utilizado em soldas com penetração total do cordão. Sendo assim, para uma fonte de calor linear e distribuída pela espessura da chapa, a distribuição de temperaturas pode ser dada pela equação 4 (KOU, 2003; MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012):

$$T = T_0 + \frac{P/h}{2\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right) \quad (4)$$

Onde:

T = temperatura no ponto de interesse [°C];

T₀ = temperatura da peça antes do início da soldagem [°C];

P = potência [VA]

k = condutividade térmica do material [W/m°C];

x = distância na direção do cordão de solda a partir do ponto de solda [m]

v = velocidade da tocha de solda [m/s];

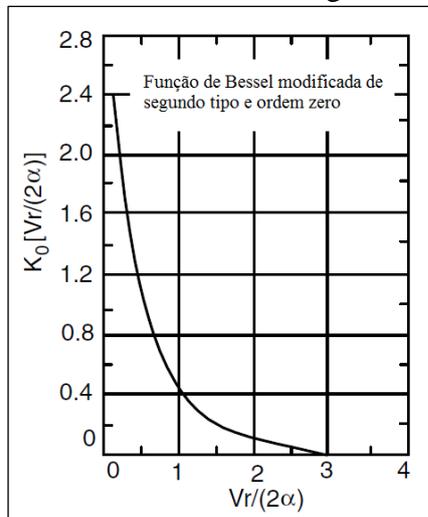
α = difusividade térmica do material [m²/s];

h = espessura da chapa [m];

r = distância radial da origem da solda [m];

K₀ = função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero, conforme Figura 11.

Figura 11 – Função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero, K₀(x)



Fonte: Adaptado de Kou (2003)

A difusividade térmica α pode ser calculada pela equação 5, conforme segue:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (5)$$

Onde:

k = condutividade térmica do material [W/m°C];

ρ = massa específica [Kg/m³];

c = calor específico [J/Kg°C].

A distância radial r da origem da solda pode ser calculada pela equação 6, conforme segue:

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (6)$$

Onde:

r = distância radial da origem da solda [m];

x = distância na direção do cordão de solda a partir do ponto de solda [m];

y = distância em uma direção específica da origem da solda, perpendicular a direção x [m].

Para o material que será analisado, a espessura da chapa será considerada como chapa fina, pois sua geometria permitirá a penetração total do cordão de solda. As soluções analíticas propostas por Rosenthal foram obtidas com uma série de simplificações e desta forma os resultados são aproximados (KOU, 2003; MODENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

2.3 METALURGIA DA SOLDAGEM

Na soldagem ao arco elétrico, aplica-se calor de forma localizada, e como resultado podem ocorrer alterações das propriedades do material na região da junta. A maior parte destas alterações dependem das reações ocorridas durante o resfriamento do cordão de solda e da microestrutura gerada. Desta forma, é importante conhecer os fenômenos metalúrgicos deste processo de soldagem (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

2.3.1 Macroestrutura de soldas por fusão

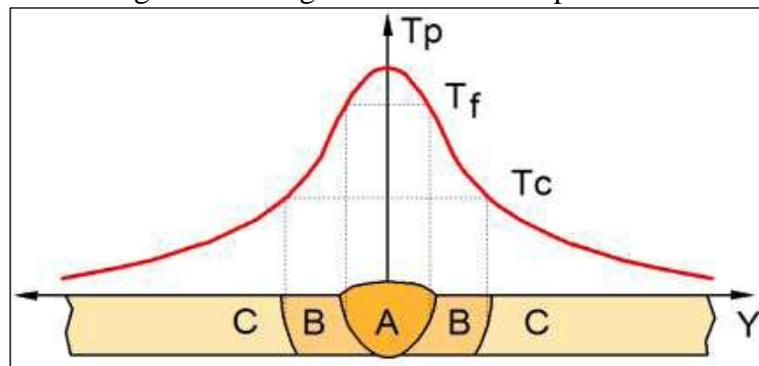
A Figura 12 contempla as curvas de repartição térmica e permite observar as três regiões básicas de uma solda por fusão. A região **A** representa a Zona Fundida (ZF), **B** a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e **C** representa o Metal de Base (MB) (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005):

- a) Metal de Base (MB): é a parte mais afastada do cordão de solda e que não é afetada pelo processo de soldagem. A temperatura de pico desta região é menor que a temperatura crítica (T_c) do material;
- b) Zona Termicamente Afetada (ZTA) ou Zona Afetada Pelo Calor (ZAC): esta região faz parte do metal base e não é fundida durante o processo de soldagem, mas tem sua microestrutura e/ou propriedades afetadas pelo ciclo térmico. Nesta região, as temperaturas de pico são maiores que a temperatura crítica do material

(T_c) - temperatura mínima para que ocorra transformação relevante como a alteração de fases, alterações microestruturais e nas propriedades mecânicas do material - e menores que a temperatura de fusão (T_f) do mesmo;

- c) Zona Fundida (ZF): região onde o material se funde e depois se solidifica. Ocorre nesta região os fenômenos ligados à solidificação dos materiais metálicos, como a nucleação e crescimento de cristais, formação de estruturas de grãos colunares ou equiaxiais, segregação e porosidades. As temperaturas de pico (T_p) desta região são superiores as de fusão (T_f) do metal base.

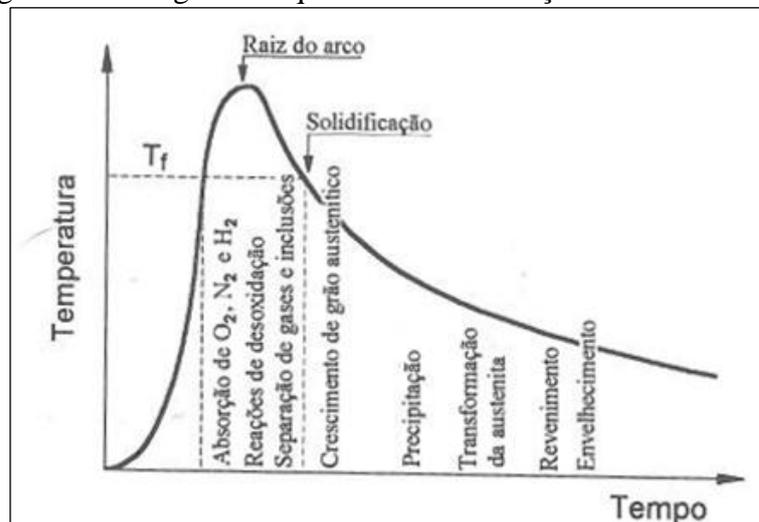
Figura 12 – Regiões de uma solda por fusão



Fonte: Introdução à Metalurgia da Soldagem (2012)

O ciclo térmico de soldagem influencia de maneira significativa nas reações e alterações estruturais que ocorrem em uma dada região do material. A Figura 13 mostra de forma esquemática estas reações e alterações em um aço baixo carbono, em um ponto situado na zona fundida (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Figura 13 – Diagrama esquemático de alterações na zona fundida



Fonte: Soldagem: Fundamentos e Tecnologia (2005)

2.3.2 Características da zona fundida (ZF)

No processo de soldagem GMAW, comumente o metal de adição é transferido para a poça de fusão a temperaturas muito altas. Nas partes mais quentes da poça de fusão, logo abaixo do arco, o metal de adição é misturado ao metal de base fundido. Logo após a poça de fusão, a temperatura cai e ocorre a solidificação. As regiões superaquecidas interagem com os gases e escórias presentes na região, absorvendo gases como o hidrogênio, ocorrendo também a redução de óxidos com a transferência de oxigênio para o metal, a transferência de elementos de liga e impurezas do metal fundido para a escoria, ou vice-versa, e a volatilização de alguns elementos como Zn, Cd, Cr e Al.

A composição química final da zona fundida depende das interações mencionadas, das composições químicas dos metais de base e de adição e como estes são misturados na zona fundida, tem-se partição dos componentes diferente. A partição dos componentes na zona fundida é chamada de diluição δ e pode ser definida pela equação 7, conforme abaixo:

$$\delta = \frac{\text{Massa Fundida do Metal Base}}{\text{Massa Total do Cordão de Solda}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

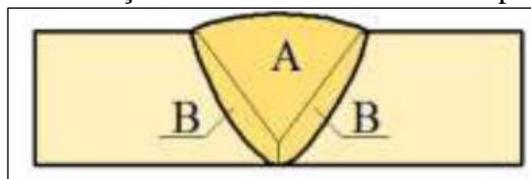
Pode-se utilizar macrografias para medir a diluição da solda, observando a sua seção transversal como mostrado na Figura 14. A diluição então é dada pela equação 8:

$$\delta = \frac{A}{A + B} \times 100 (\%) \quad (8)$$

Onde:

A = massa fundida do cordão de solda;
B = massa fundida do metal de base.

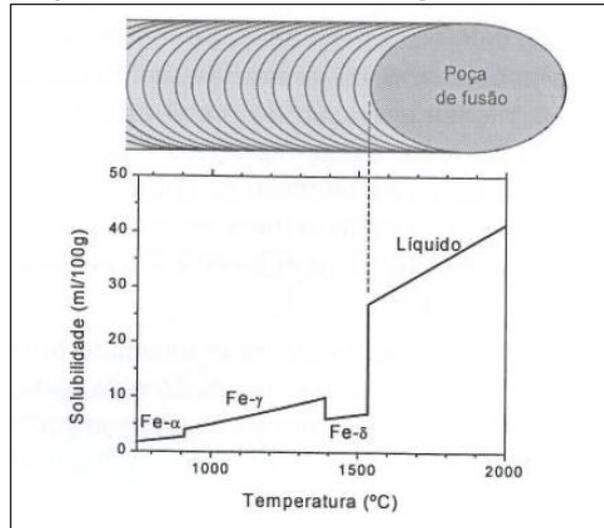
Figura 14 – Seção transversal de uma solda por fusão



Fonte: Introdução à Metalurgia da Soldagem (2012)

Na parte posterior da poça de fusão, após a passagem do arco, a temperatura cai e durante este processo ocorrem várias reações. O material pode ficar supersaturado de gases como o hidrogênio e o oxigênio misturados na solução, isto causado pela redução na solubilidade durante a queda de temperatura, podendo gerar porosidade na junta soldada. A Figura 15 mostra a variação na solubilidade do hidrogênio no ferro líquido e sólido.

Figura 15 – Variação na solubilidade do hidrogênio no ferro líquido e sólido

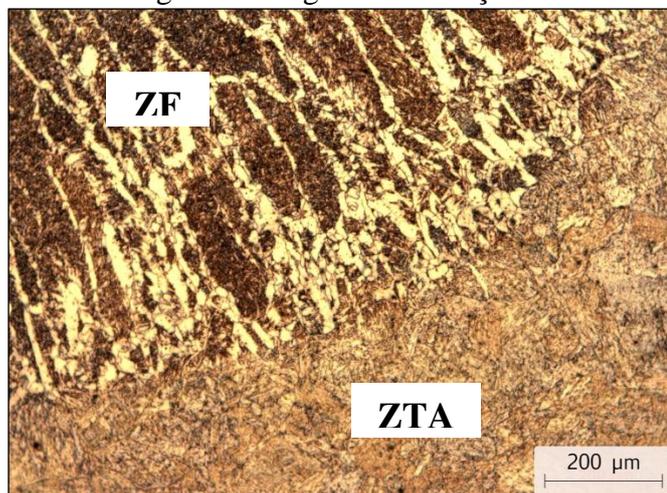


Fonte: Soldagem: Fundamentos e Tecnologia (2005)

A solubilidade reduzida do oxigênio durante a queda de temperatura pode gerar a mistura do gás com outros elementos, formando outros gases e estes por sua vez gerando porosidades e também outros sólidos ou líquidos formando inclusões. As características da porosidade e das inclusões dependem do processo de solda, materiais de base e de solda, gás de proteção e das características do arco.

Um cordão de solda durante o processo de solidificação é constituído predominantemente por uma zona colunar onde os grãos tem o formato de colunas. A formação de novos grãos na poça de fusão é muito limitada e devido a isto ocorre o crescimento de grãos do metal de base na fronteira entre a zona fundida e a zona termicamente afetada, assegurando assim a continuidade metalúrgica nesta região, conforme pode-se ver na Figura 16 (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Figura 16 – Metalografia da região de transição entre a ZTA e a ZF



Fonte: O autor (2013)

A zona fundida possui estrutura característica formada por grãos colunares e grosseiros que pode deixar o material com menor tenacidade. Após a solidificação da zona fundida, a região ainda pode sofrer alterações até o resfriamento total. Nos aços carbono e aços de baixa liga a poça de fusão normalmente se solidifica como ferrita delta que após se transforma em austenita. No resfriamento, em temperaturas mais baixas, inferiores a 900°C, esta se transforma numa mistura complexa. Então, em uma solda de somente um passe, a microestrutura da zona fundida é formada pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita no ciclo de resfriamento contínuo, e a ferrita assume diferentes morfologias, algumas semelhantes. Fases resultantes da decomposição da austenita são a ferrita, cementita e martensita. Pequenas quantidades de austenita podem ficar inalteradas, retidas e precipitados e inclusões também estão sujeitos a surgir (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005; PERINI, 2008).

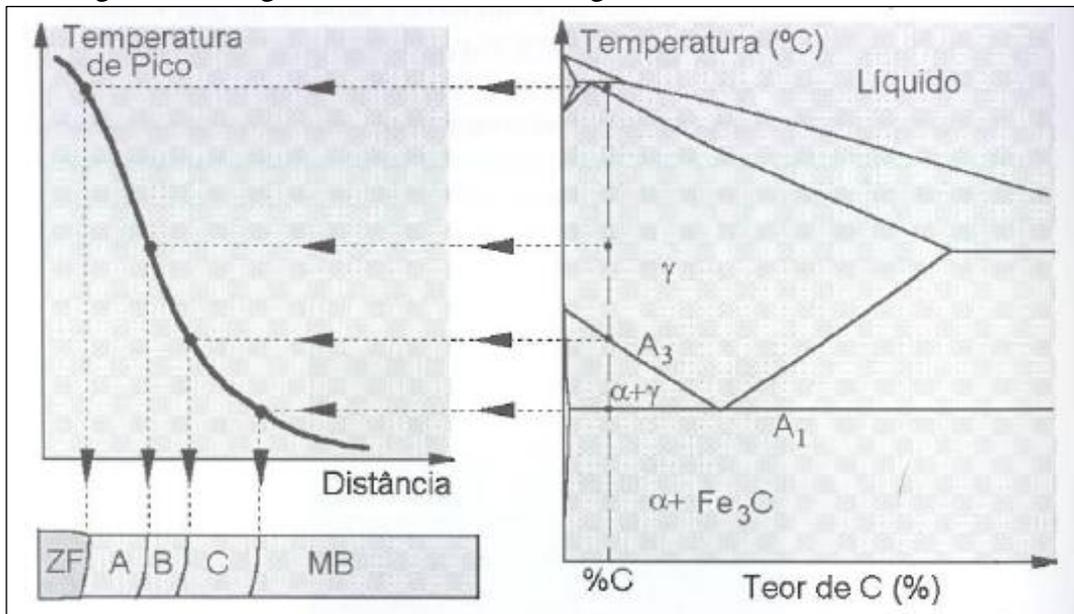
2.3.3 Características da zona termicamente afetada (ZTA)

A ZTA possui características que dependem do tipo de metal de base e dos processos e procedimentos de soldagem. Os efeitos do ciclo térmico, causado pela solda por fusão, sobre o material podem ser os mais variados. Para os aços carbono e aços baixa liga, a ZTA apresenta várias regiões características que podem ser vistas na Figura 17. Devido as diferentes taxas que é resfriada, formando diferentes microestruturas, a região da ZTA é considerada a fonte de falhas em uma junta soldada.

Na região mais próxima do metal de solda ocorre o crescimento de grãos (região A da Figura 17). Esta região atinge temperaturas entre 1200°C e a temperatura de fusão, fazendo com que a estrutura austenítica ali presente sofra um grande crescimento de grão que depende do tipo de aço e da energia de soldagem, esta que quanto maior, mais grosseira torna a granulação. A estrutura final depende do teor de carbono e de elementos de liga, do tamanho de grão austenítico e da velocidade em que ocorre o resfriamento. Granulação grosseira aumenta a temperabilidade na região. Em geral, esta região possui estrutura grosseira, com a ferrita apresentando morfologia em placas e com presença de bainita. Quando são empregadas condições de soldagem que permitem o resfriamento mais rápido, particularmente em aços ligados ou com maior teor de carbono, a região pode gerar uma estrutura completamente martensítica. Esta região da ZTA é a mais problemática de todas, podendo ter menor tenacidade e gerar trincas. As condições de soldagem, como a energia e a temperatura de pré-aquecimento da junta, são adequadas conforme o material, espessura, tipo de junta e

condições de resfriamento (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005; RODRIGUES, 2008).

Figura 17 – Regiões características da região em torno do cordão de solda



Fonte: Soldagem: Fundamentos e Tecnologia (2005)

A região de refino de grão ou de normalização (região B na Figura 17) compreende a área da junta que atinge temperaturas próximas as de normalização dos materiais ou um pouco acima, ou seja, em torno dos 900 a 1200°C. Após a soldagem, a estrutura do local é composta geralmente por finos grão de ferrita e perlita e não é problemática na maioria dos casos.

Após a região de refino de grão, mais afastada do cordão de solda, tem-se a região intercrítica onde a temperatura máxima fica entre 727°C e a linha A3 que separa a austenita da mistura austenita e ferrita, conforme visto na Figura 17.

As regiões mais afastadas do cordão de solda, onde a temperatura de pico é inferior a 727°C, apresentam mudanças microestruturais cada vez menos perceptíveis. Percebe-se com isso a importância do conhecimento e cuidado com a temperatura da peça durante o processo de soldagem (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

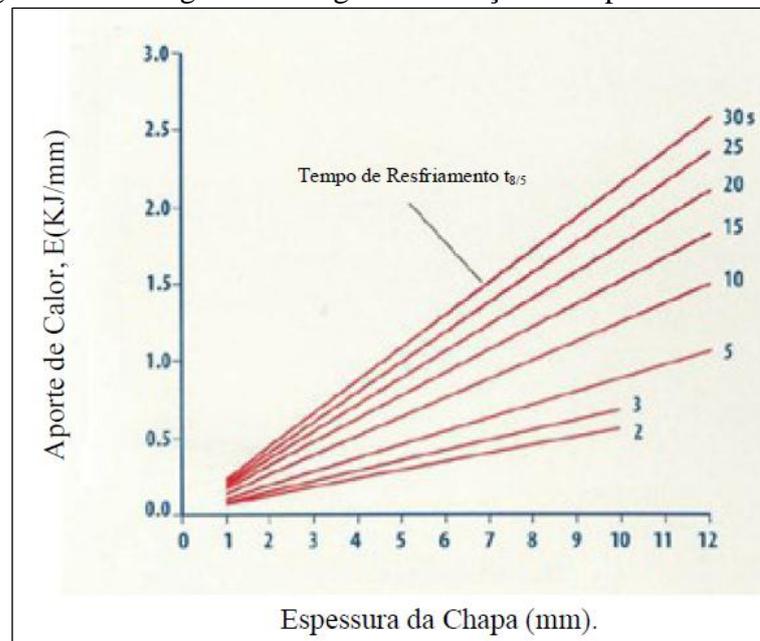
2.3.4 Características de soldagem de aços de alta resistência e baixa liga

Ao soldar aços de alta resistência e baixa liga, caso do DOMEX[®] 700 MC utilizado neste estudo, alguns cuidados devem ser tomados para não afetar sua microestrutura refinada.

Deve-se seguir com obediência o procedimento de soldagem recomendado. É essencial garantir que o nível de hidrogênio depositado no metal de solda seja o mínimo para evitar a formação de trincas. O metal de adição deve ser similar ao metal de base, tanto nas características químicas quanto nas mecânicas.

O aporte térmico, ou a energia de soldagem, depende da composição química do material, da sua espessura e das temperaturas de pré-aquecimento e interpasse, caso existam. Em alguns casos, as aços de alta resistência e baixa liga apresentam elementos de liga que elevam o carbono equivalente, sendo recomendado o pré-aquecimento antes da solda, porém este deve ser baixo para que durante a soldagem a peça não atinja temperaturas elevadas a ponto de prejudicar a microestrutura (RODRIGUES, 2012).

Figura 18 – Energia de soldagem em função da espessura da chapa



Fonte: Adaptado de SSAB Tunplatt (2004)

Conforme a SSAB, fabricante do aço DOMEX[®] 700 MC, este é classificado como de boa soldabilidade. A fabricante sugere os parâmetros de soldagem para a união deste aço em função da espessura da chapa e do processo de solda. A Figura 18 apresenta o gráfico com a energia de soldagem ideal em função da espessura da chapa, para tipos diferentes de tempo de resfriamento de 800 °C a 500 °C ($t_{8/5}$), sendo que nessa faixa de temperatura é onde ocorrem as principais transformações microestruturais no material. Seguir estes parâmetros é muito importante para eficácia do processo de soldagem (SSAB TUNNPLAT, 2004).

3 DESENVOLVIMENTO

Apresenta-se neste capítulo o desenvolvimento do trabalho, envolvendo a transferência de calor durante o processo de soldagem, materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados objetivados neste trabalho.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste estudo foi o aço de alta resistência e baixa liga S700 MC, conforme norma DIN EN 10149, com alguns elementos de liga em baixa percentagem, como nióbio, titânio e vanádio.

A fabricante SSAB Tunnplat produz este material utilizando a nomenclatura DOMEX[®] 700 MC, onde a sigla MC caracteriza o material como de alto limite elástico para conformação a frio e que possui aptidão para soldagem. A produção das chapas deste material é feita por laminação termocontrolada, com adição de elementos de liga e, em alguns casos, tratamentos térmicos, gerando uma microestrutura refinada. Desta forma, cuidados durante o processo de soldagem se fazem necessários. A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas do material em questão.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço DOMEX[®] 700 MC

Tensão de Escoamento	Limite de Resistência a Tração	Alongamento
700 MPa (min.)	750 – 950 MPa (min. – max.)	12 % (min.)

Fonte: Adaptado de SSAB TUNNPLAT (2004)

O conhecimento da temperatura gerada em regiões de interesse em torno de uma junta soldada pode fornecer características que influenciam nas propriedades mecânicas e na microestrutura do material.

Com a energia de soldagem empregada no processo pode-se prever o tamanho da zona termicamente afetada.

3.1.1 Definição dos parâmetros de soldagem

Optou-se pela utilização de dois parâmetros de soldagem diferentes para o estudo. As chapas de aço DOMEX[®] 700 MC utilizadas possuíam espessura de 6,3 mm. Para definição dos parâmetros de soldagem foi utilizado como base o gráfico apresentado na Figura 18,

conforme bibliografia da SSAB Tunplatt que fabrica e fornece o material. Este gráfico relaciona a energia de soldagem em função da espessura da chapa para diferentes tempos de resfriamento, no intervalo de 800°C até 500°C. A curva de resfriamento de 800°C até 500°C escolhida para a energia de soldagem maior foi a de 25 segundos e para a energia de soldagem menor a de 20 segundos. Definidos os valores de energia de soldagem, interações foram realizadas para obtenção dos parâmetros descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados

Parâmetro	Energia (KJ/mm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)	Diferença entre Energias (%)
<i>Energia Maior</i>	1,33	30	370	400	9
<i>Energia Menor</i>	1,22	28	320	350	

Fonte: O autor (2013)

Foi considerada uma eficiência de 0,8 utilizada comumente para o processo GMAW. Os cálculos de energia foram realizados de acordo com a equação 2 (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

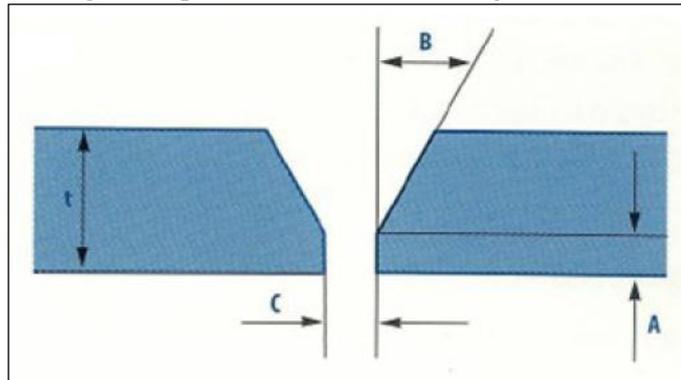
3.1.2 Elaboração de algoritmo para simulação da transferência de calor na soldagem

Utilizando o *Matlab*[®], *Software* interativo para cálculo numérico e programação, as equações de Rosenthal e com base no trabalho de conclusão de curso de ONUKI (2009) foi elaborado um algoritmo com dois modos de simulação que podem ser escolhidos após início do processamento de dados. No primeiro modo são atribuídos como dados de entrada os valores de tensão, corrente e velocidade da tocha. O resultado do algoritmo são as curvas de temperatura versus posição na superfície da chapa. O segundo resultado gerado pelo algoritmo é a curva de ciclo térmico para determinado ponto de interesse, relacionando a temperatura com o tempo. O algoritmo pode ser visto no Anexo A.

3.1.3 Procedimento de soldagem

Foram soldadas chapas em junta de topo com chanfro V e nariz. A Figura 19 mostra de forma ilustrativa uma imagem com o modelo de junta utilizado. A Tabela 3 mostra os parâmetros geométricos para a junta conforme sugestão da SSAB Tunplatt e os parâmetros utilizados na soldagem dos corpos de prova para utilização posterior nos ensaios.

Figura 19 – Imagem esquemática do modelo de junta com chanfro e nariz



Fonte: SSAB TUNNPLAT (2004)

Tabela 3 – Parâmetros geométricos da junta

Processo de Solda	t (mm)	A (mm)	B (α°)	C (mm)
GMAW	4 - 16	1 - 2	25 - 30	2 - 3
Parâmetros Utilizados	6,3	1	27	2

Fonte: Adaptado de SSAB Tunplat (2004)

As juntas foram soldadas utilizando o arame AWS A 5.18 ER 70 S – 6 como metal de adição, diâmetro de 1,2 mm em um único passe. A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas do metal de adição.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do arame de solda AWS A 5.18 ER 70 S - 6

Tensão de Escoamento (MPa) min.	Limite de Resistência a Tração (MPa) min.	Alongamento (%) min.
400	480	22

Fonte: Adaptado de BELGO BEXAERT (2013)

As propriedades mecânicas do arame utilizado são menores que as do material base DOMEX[®] 700 MC. Esta relação é conhecida como “*undermatching*”.

Figura 20 – Robô de Soldagem



Fonte: O autor (2013)

O processo foi realizado com robô pois a utilização deste equipamento garante velocidade, altura da tocha até a peça e parâmetros constantes na realização do processo. A Figura 20 mostra o robô de soldagem utilizado no processo. Trata-se de um robô Kawasaki® modelo FA10L com tocha Sumig® e fonte solda Fronius® TPS5000.

As chapas preparadas para o início do processo de soldagem são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Chapas preparadas para o processo de soldagem



Fonte: O autor (2013)

Utilizou-se um cobre-junta cerâmico, conforme Figura 22, na parte inferior da junta, na região onde as chapas foram unidas.

Figura 22 – Cobre-junta cerâmico



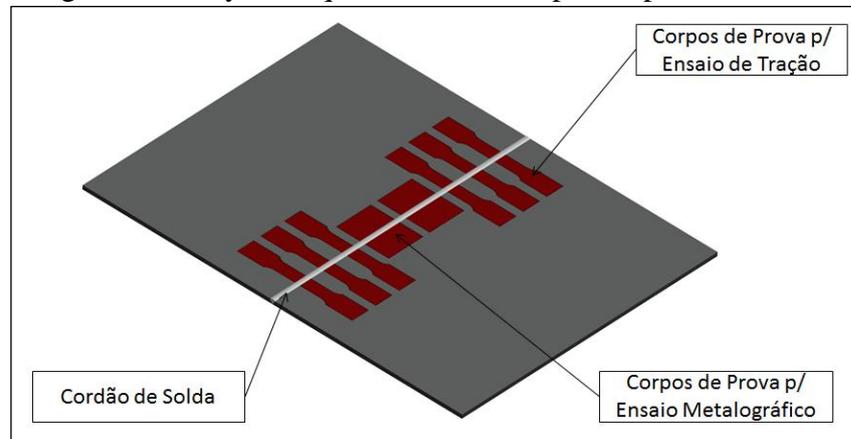
Fonte: O autor (2013)

3.1.4 Procedimento de retirada dos corpos de prova

Foram soldadas chapas de espessura 6,3 mm, com características geométricas já descritas anteriormente, para retirada de corpos de prova para macrografia, microdureza, análise microestrutural e ensaio de tração do aço de alta resistência e baixa liga DOMEX® 700 MC.

Os corpos de prova foram dispostos de forma que o cordão de solda ficasse no meio dos mesmos. A Figura 23 mostra o layout da chapa soldada e os corpos de prova.

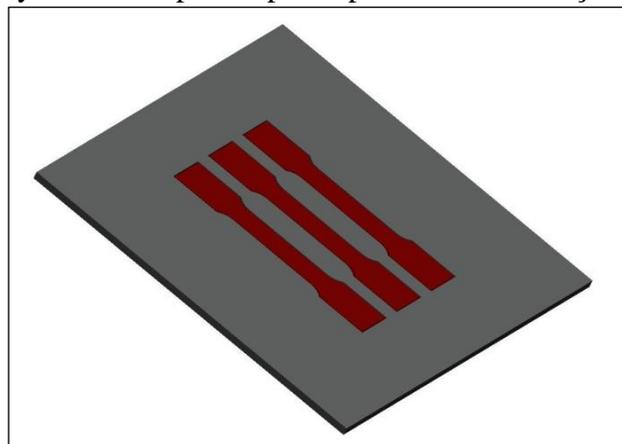
Figura 23 – Layout esquemático dos corpos de prova soldados



Fonte: O autor (2013)

Como existe a necessidade de comparar a resistência mecânica do material original com a do material soldado, foram retirados corpos de prova de uma chapa bruta para a realização de ensaio de tração. Estes corpos de prova também foram dispostos de forma que a tração aconteça perpendicular ao sentido de laminação. A Figura 24 mostra o layout do corte.

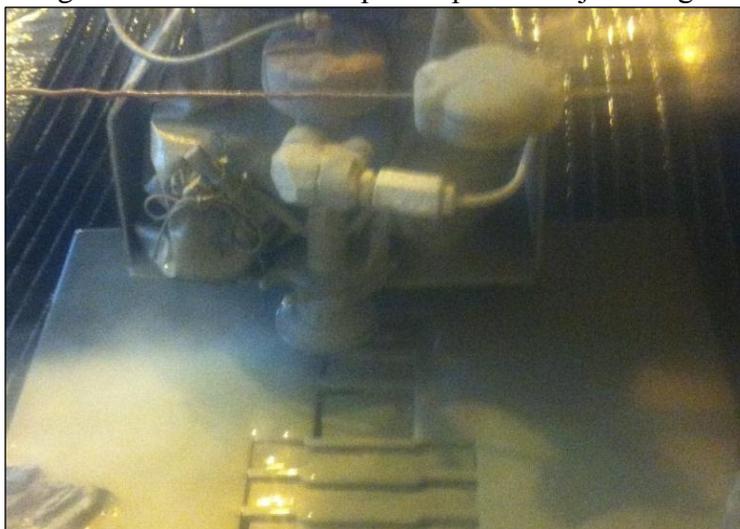
Figura 24 – Layout dos corpos de prova para ensaio de tração da chapa bruta



Fonte: O autor (2013)

Para a retirada dos corpos de prova de ambas as chapas, bruta e soldada, optou-se pelo processo de corte a jato d'água. Neste, o material é cortado através de um jato com água e material abrasivo a alta pressão, não gerando calor, evitando alterações microestruturais que podem ser causadas por processos de sorte como laser ou plasma que aquecem a peça. A máquina utilizada é da marca Flow. A Figura 25 mostra o corte de uma das chapas.

Figura 25 – Corte dos corpos de prova em jato d'água



Fonte: O autor (2013)

3.1.5 Análise macroestrutural

A análise macroestrutural foi realizada com o auxílio de microscopia óptica para verificar a penetração da solda e as zonas fundida e termicamente afetada. Foram feitas análises de um corpo de prova para cada energia de soldagem utilizada. Os corpos de prova foram preparados lixado-se e respeitando a ordem de granulação das lixas de 120, 220, 400, 600, 1200 e 1500 mesh. Após as amostras foram atacadas com Nital 2% durante 10 segundos.

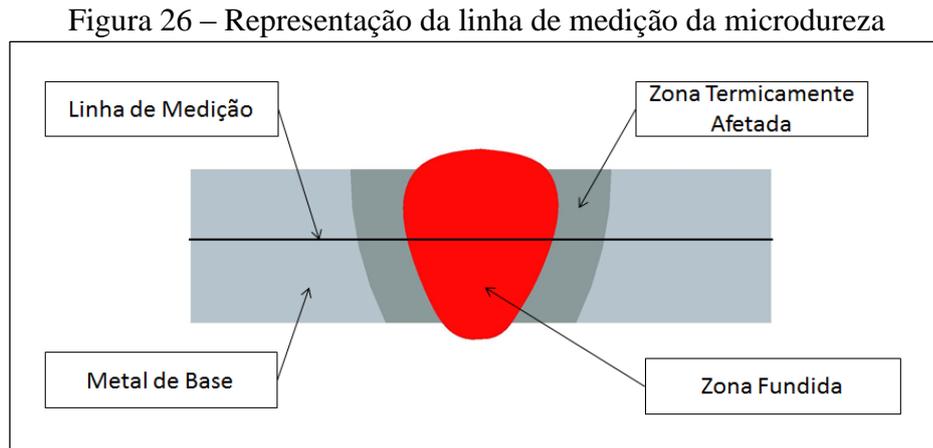
3.1.6 Análise microestrutural

As análises microestruturais também foram realizadas por microscopia óptica com o objetivo de investigar as transformações metalúrgicas em torno da junta soldada. O procedimento foi realizado de acordo com a norma ASTM E3-95, com amostras embutidas, preparadas com uma seleção de lixas e polimento com pasta de diamante. Posterior a esta etapa as amostras foram atacadas com Nital 2% por 10 segundos. O microscópio ótico utilizado para obtenção das imagens foi o ZEISS® AXIO®. Da mesma forma que na análise macrográfica, foi verificada uma amostra para cada energia de soldagem.

3.1.7 Ensaio de microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados a partir dos corpos de prova preparados para micrografia. O equipamento utilizado foi o HMV-2T da fabricante SHIMADZU®.

Utilizou-se a escala Vickers de acordo com a norma DIN 50133: 1985-2. As medições foram realizadas em um corpo de prova para cada energia de soldagem, em uma linha perpendicular a espessura da chapa e a aproximadamente 2.5 mm da borda superior da peça, como mostra de forma esquemática a Figura 26, atravessando o metal de base, a zona termicamente afetada e a zona fundida.



Fonte: O autor (2013)

3.1.8 Ensaio de tração

O dimensionamento dos corpos de prova para o ensaio de tração e a realização do mesmo foi de acordo com a norma ABNT NBR 6673/81. Foram ensaiadas três amostras para cada energia de soldagem e três amostras com corpos de prova com o material original, sem passar pelo processo de soldagem. Os ensaios foram realizados para analisar e comparar as resistências ao escoamento e a tração das amostras soldadas com diferentes parâmetros e das amostras brutas. O laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Caxias do Sul foi o responsável pela realização do ensaio.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item do trabalho apresenta os resultados e discussões referentes a implementação do algoritmo de transferência de calor e aos ensaios de laboratório realizados ao longo do estudo.

3.2.1 Soldagem dos corpos de prova

Como pode ser observado na Figura 27, a mesa onde as chapas foram acomodadas para a soldagem possuía uma inclinação de aproximadamente 35°. Sendo assim, o metal de adição tendeu a escorrer sobre a peça concentrando-se fora do centro da junta.

Figura 27 – Local para acomodação das chapas para soldagem e robô utilizado



Fonte: O autor (2013)

A primeira amostra a ser soldada utilizou os parâmetros de *Energia Maior* e a segunda amostra utilizou os parâmetros com *Energia Menor*.

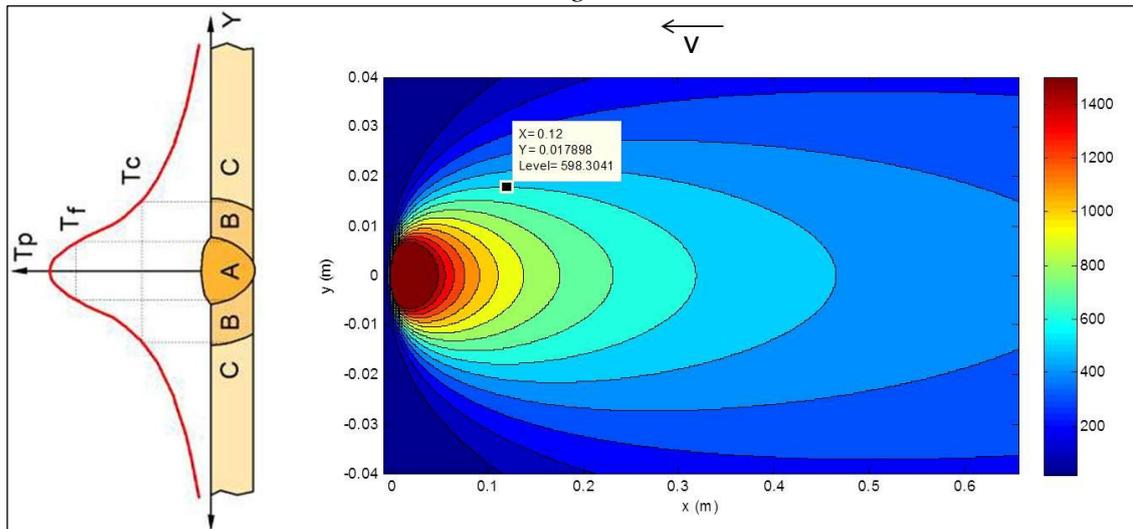
Ocorreu nos dois casos um empenamento angular da junta de aproximadamente 3°.

3.2.2 Simulação da transferência de calor durante o processo de soldagem

Conforme SSAB Tunntplat (2004), o aquecimento do aço Domex[®] 700 MC em temperaturas acima de 580 °C inicia a redução das propriedades mecânicas do material. Optou-se desta forma pela escolha de um ponto com temperatura de 600 °C, na simulação computacional de transferência de calor durante o processo de soldagem, para verificar a largura em que a temperatura de pico atingiu esta marca.

A Figura 28 representa a transferência de calor durante o processo de soldagem, com parâmetros de *Energia Maior*, sobre a superfície da chapa obtidos do algoritmo computacional. São apresentadas na Figura as coordenadas do ponto cuja máxima temperatura foi de 600 °C.

Figura 28 – Representação do fluxo de calor sobre a chapa durante o processo de soldagem com *Energia Maior*

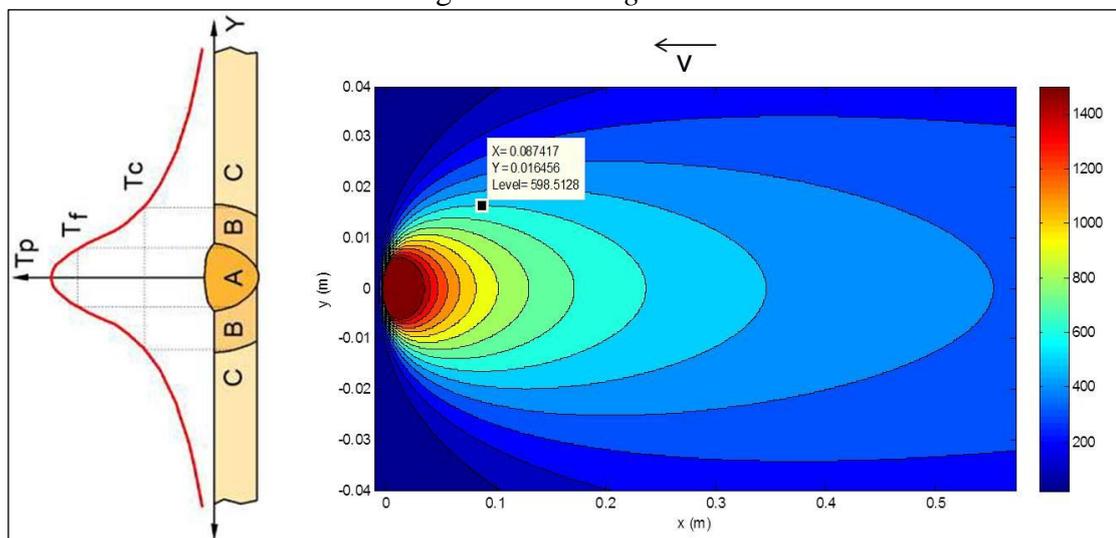


Fonte: O autor (2013)

A temperatura aproximada e não exata marcada sobre o gráfico se deu devido a restrições no sistema programado, não permitindo a coleta do valor no correto $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. O valor de y coletado que representa a largura da região que teve temperatura de pico de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi de $0,0178\text{ m}$ ou aproximadamente $17,8\text{ mm}$.

Para os parâmetros de *Energia Menor* a mesma metodologia de coleta do ponto foi aplicada. A Figura 29 representa a transferência de calor durante o processo de soldagem, com parâmetros de *Energia Menor*, sobre a superfície da chapa, da mesma forma que o item anterior.

Figura 29 – Gráfico de simulação do fluxo de calor sobre a chapa durante o processo de soldagem com *Energia Menor*



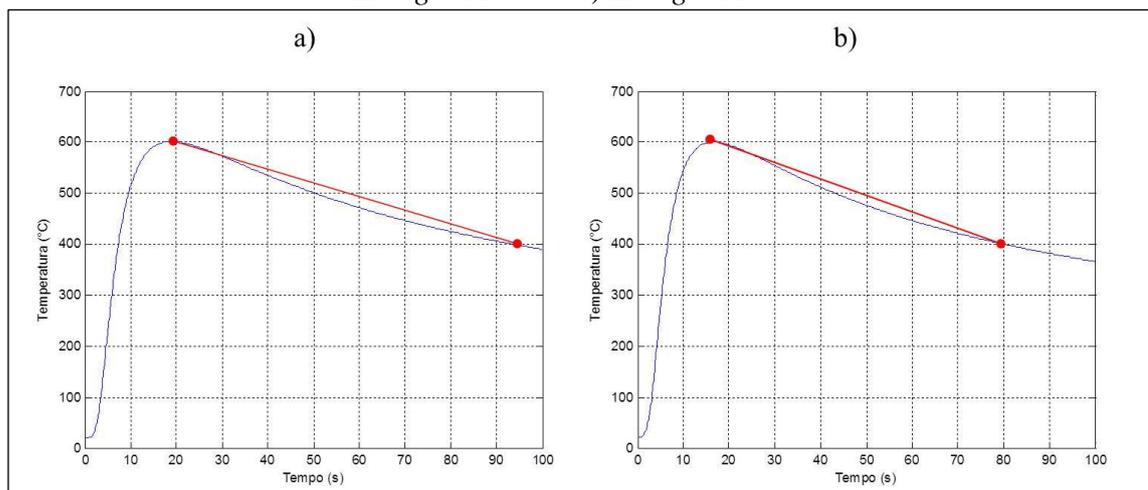
Fonte: O autor (2013)

O ponto de interesse foi coletado da mesma maneira que foi na simulação com *Energia Maior*. O valor de y mediu aproximadamente 0,0164 m ou 16,4 mm.

As curvas de ciclo térmico, de temperatura em função do tempo, para os pontos com temperatura de pico de 600 °C foram geradas pelo algoritmo de simulação e são representadas na Figura 30. A amostra soldada com parâmetros de *Energia Maior* é representada pela letra **a)** e a amostra soldada com parâmetros de *Energia Menor* é representada pela letra **b)**. Pode-se observar que a taxa de resfriamento cresce inversamente proporcional a energia de soldagem. Quanto maior a energia aplicada no processo, menor é a taxa de resfriamento.

Na soldagem com parâmetros de *Energia Maior* a taxa de resfriamento, calculada de 600 a 400°C conforme linhas vermelhas na Figura 30, foi de aproximadamente 2,60 °C/s e para a soldagem com parâmetros de *Energia Menor* ficou em 3,10 °C/s.

Figura 30 – Curva de ciclo térmico para o ponto de interesse sobre a chapa. a) soldagem com *Energia Maior* e b) *Energia Menor*



Fonte: O autor (2013)

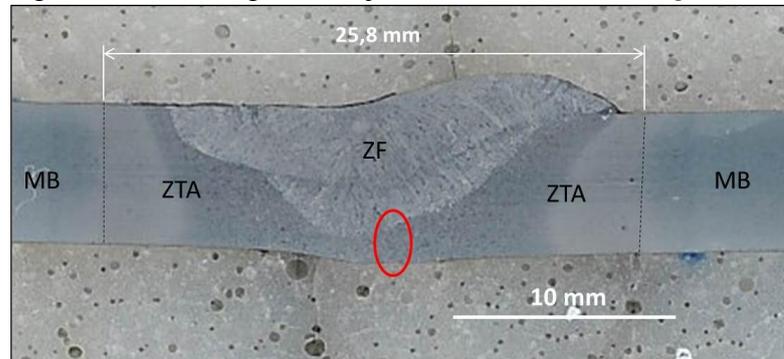
3.2.3 Análise macroestrutural

A Figura 31 apresenta a macroestrutura resultante do processo de solda utilizando os parâmetros de soldagem com *Energia Maior*. As condições de preparação da amostra e o ataque químico realizado não permitiram visualização clara das regiões entorno da junta soldada. Conforme dimensões apresentadas observa-se que a amostra com *Energia Maior* possui uma zona termicamente afetada (ZTA) maior que a mesma região da amostra com *Energia Menor*.

Conforme simulação apresentada no item anterior, a largura da zona termicamente afetada na soldagem com *Energia Maior* apresentou valor aproximado de 17,8 mm e através

da macrografia o valor foi de 12,9 mm, sendo este 28% menor que o resultado obtido na simulação.

Figura 31 – Macrografia da junta soldada com *Energia Maior*

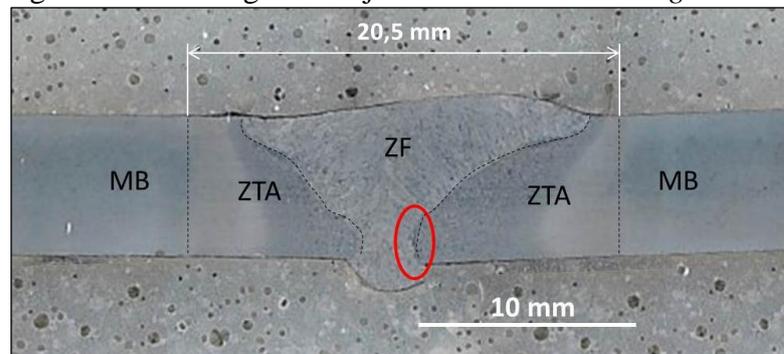


Fonte: O autor (2013)

Para a amostra soldada com *Energia Menor*, conforme Figura 32, o valor medido na simulação foi de aproximadamente 16,4 mm e na macrografia observou-se um valor de 10,2 mm, este sendo 38% menor que o resultado da simulação.

O metal de solda da amostra com *Energia Menor*, da Figura 32, atravessou a peça indicando a penetração total da junta soldada.

Figura 32 – Macrografia da junta soldada com *Energia Menor*



Fonte: O autor (2013)

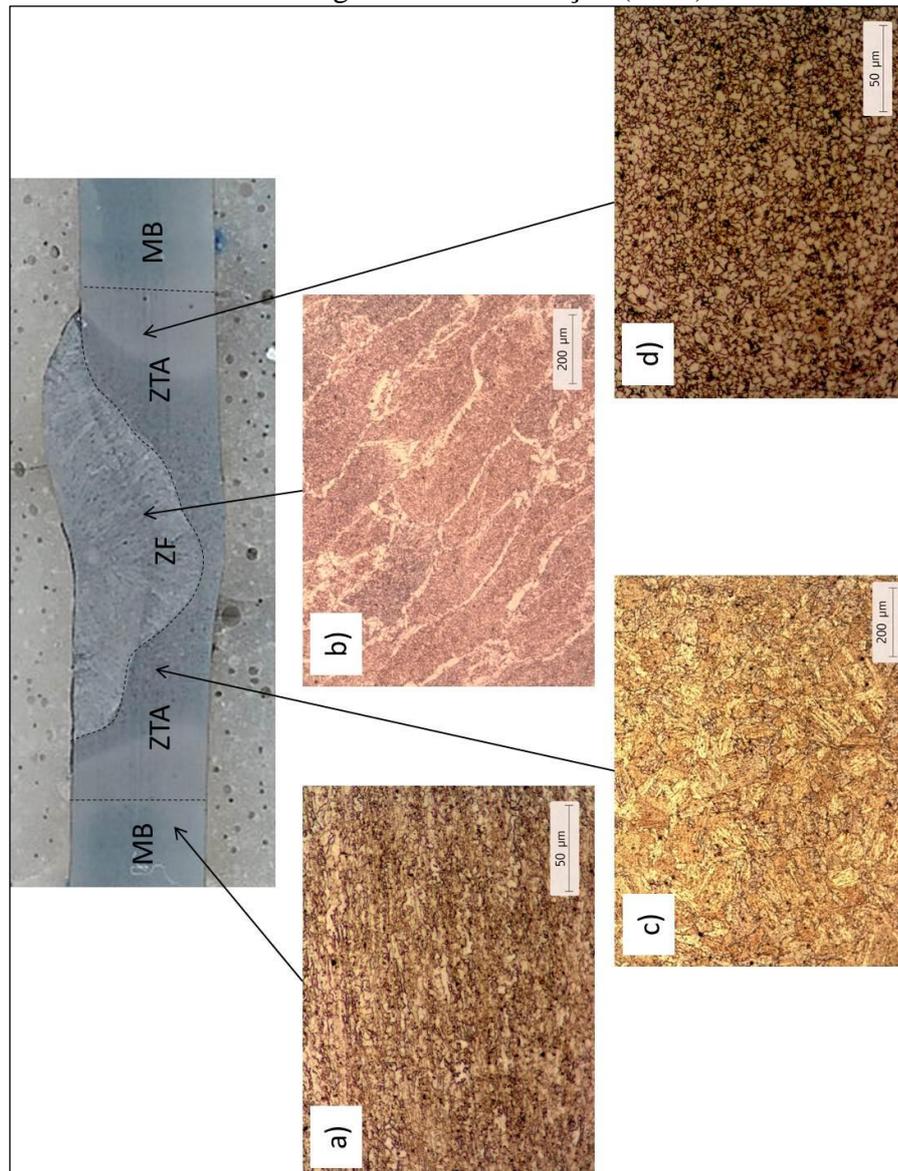
Na amostra com *Energia Maior*, observa-se que o material de adição não atravessou a peça e a região circulada na Figura 31 mostra falta de fusão e penetração total na junta. Observa-se também na macrografia, principalmente da amostra soldada com parâmetros de *Energia Maior*, que o metal de adição encontra-se concentrado fora do centro da junta. Isso ocorreu devido a posição de soldagem realizada inclinada, conforme apresentado anteriormente.

Na amostra soldada com parâmetros de *Energia Menor* observa-se uma pequena inclusão na região circulada da Figura 32, que pode ter sido causada por falta de fusão.

3.2.4 Análise microestrutural

Nesta seção são apresentadas as micrografias da junta soldada com *Energia Maior*, conforme Figura 33. Neste perfil pode-se verificar as microestruturas do metal base, do metal de solda da ZF, da região de crescimento de grão e da região de refino de grão.

Figura 33 – Micrografias encontradas na amostra soldada com *Energia Maior*; a) metal base (500x), b) material de solda (100x), c) região de crescimento de grão (100x), d) região de refino de grão ou normalização (500x)

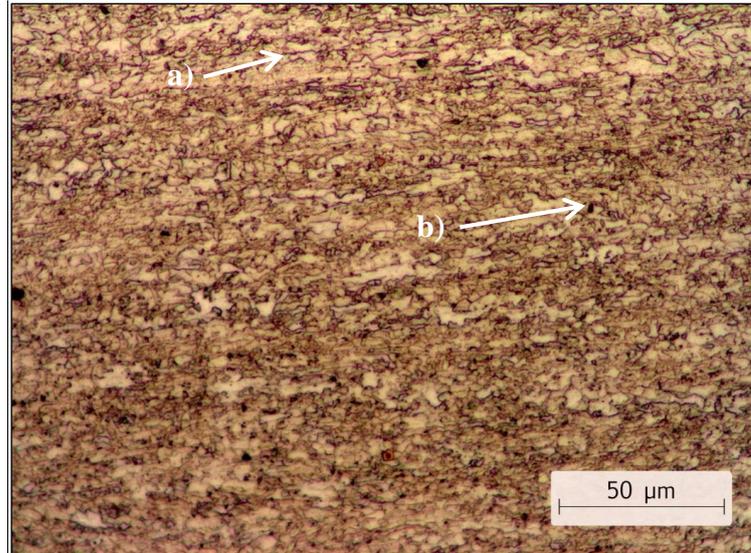


Fonte: O autor (2013)

A amostra com *Energia Menor* também foi analisada porém, por não apresentar variação microestrutural em relação a amostra soldada com *Energia Maior*, suas fotografias podem ser vistas no Anexo B deste trabalho.

Na Figura 34 é apresentada a microestrutura do metal base DOMEX[®] 700 MC. Esta apresenta grãos de ferrita muito finos e alongados no sentido de laminação da chapa e agulhas de martensita. A granulação refinada é oriunda do processo de laminação termocontrolado que, com a presença de carbonetos, retarda o crescimento do grão. Esta característica de grãos refinados garante ao material a boa resistência mecânica apresentada (RODRIGUES 2012).

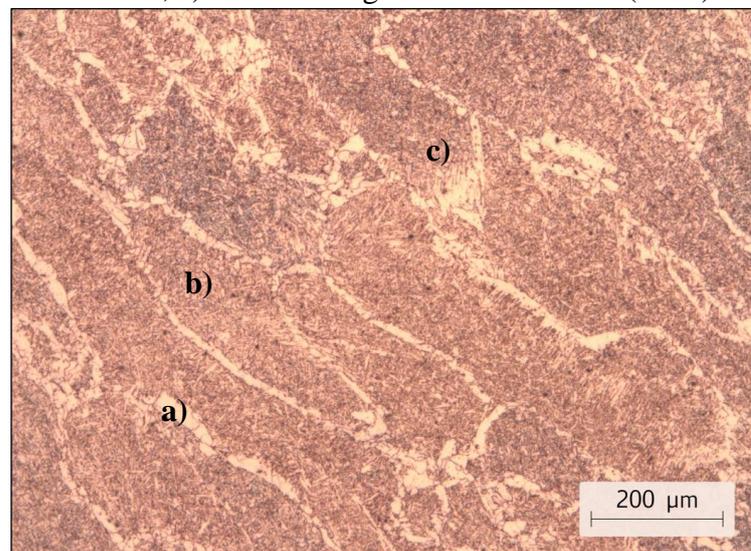
Figura 34 – Microestrutura do metal base de: a) ferrita, e b) agulhas de martensita (500x)



Fonte: O autor (2013)

A Figura 35 apresenta a microestrutura do metal de solda. Três morfologias de ferrita são vistas na microestrutura do metal de solda.

Figura 35 – Microestrutura do metal de solda; a) ferrita de contorno de grão, b) ferrita acicular, c) ferrita de segunda fase alinhada (100x)



Fonte: O autor (2013)

Saindo do metal de solda e entrando na ZTA, observa-se a região de crescimento de grãos. A Figura 36 apresenta a micrografia desta região.

Pode-se observar grãos de ferrita, mais claros e indicados pela letra **a)** e agregados de ferrita e carbonetos, regiões mais escuras indicadas pela letra **b)**. Nos aços ARBL estes constituintes aparecem em pequena quantidade e com o ataque de nital 2% formam regiões escuras difíceis de serem interpretadas na microscopia ótica.

O crescimento de grão desta região é atribuído as temperaturas atingidas bem como as taxas de resfriamento do local (MODENESI, 2012).

Figura 36 – Microestrutura da região de crescimento de grão apresentando microestrutura com grãos de: a) ferrita e b) agregados de ferrita e carbonetos (100x)

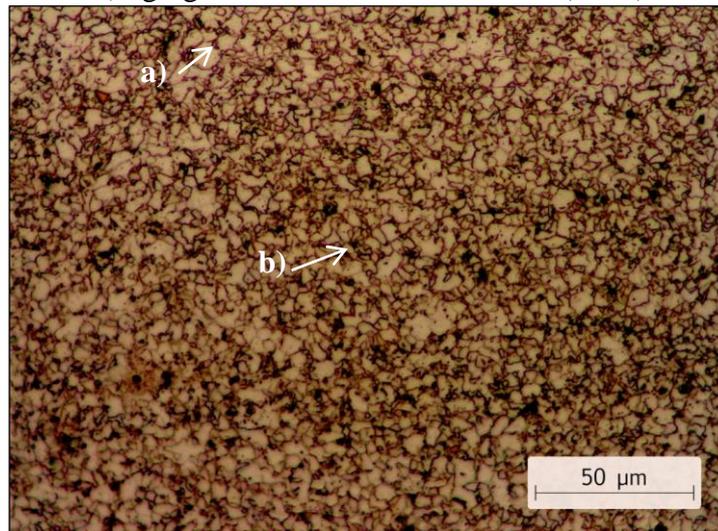


Fonte: O autor (2013)

Após a região de crescimento de grão dá-se início a região de refino de grãos ou também chamada de região de normalização, ainda na ZTA. A Figura 37 mostra a micrografia desta região.

Observa-se uma microestrutura composta também de grãos de ferrita, mais claros, e representados pela letra **a)** e agregados de ferrita e carbonetos, representados pela letra **b)**. Observam-se grãos regulares decorrentes do ciclo térmico do local, suficiente para causar a recristalização do material, passando de uma estrutura cristalina deformada, para uma estrutura isenta de deformação e com crescimento de grão em relação ao metal base (MODENESI, 2005).

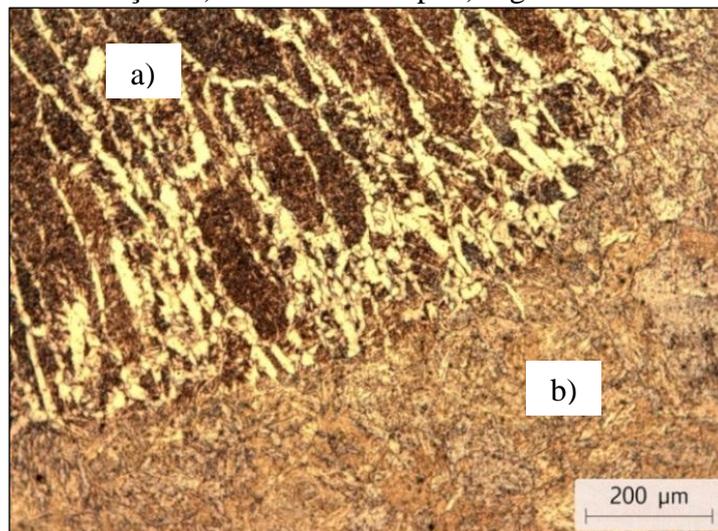
Figura 37 – Microestrutura da região de refino de grãos ou normalização: a) grãos de ferrita e b) agregados de ferrita e carbonetos (500x)



Fonte: O autor (2013)

A seguir são apresentadas as regiões de transição entre as diferentes microestruturas analisadas. A Figura 38 apresenta a região de transição entre o metal de solda e a região de crescimento de grãos. O metal de solda possui grãos colunares e a região de crescimento de grãos apresenta grãos um pouco menores mantendo a continuidade da junta.

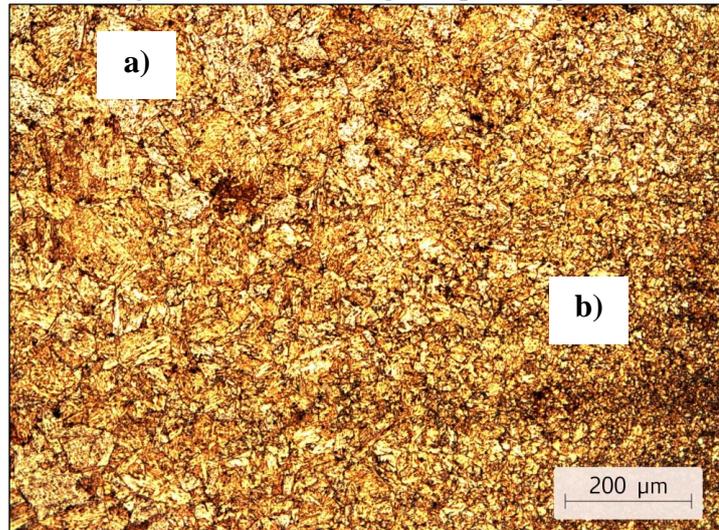
Figura 38 – Região de transição: a) metal de solda p/ b) região de crescimento de grãos (100x)



Fonte: O autor (2013)

Na Figura 39 observa-se a transição da região de crescimento de grãos, representada por **a)**, para a região de refino de grãos ou normalização, **b)** na figura. A taxa de resfriamento vai diminuindo conforme se avança para longe da zona fundida, permitindo a homogeneização dos grãos.

Figura 39 – Região de transição: a) crescim. de grãos p/ b) região de homogeneização (100x)

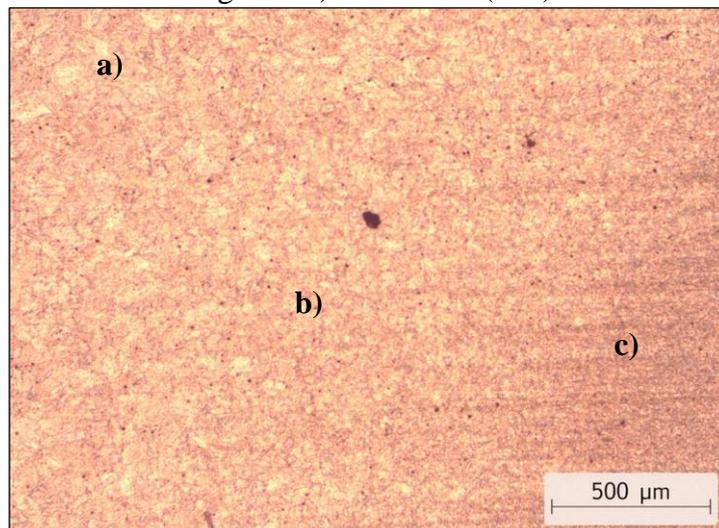


Fonte: O autor (2013)

A Figura 40 apresenta as regiões de crescimento de grão mais a esquerda, a região de refino de grãos no centro e o metal base a direita da imagem. É possível verificar as transições entre as regiões.

Um detalhe que chama a atenção é o tamanho do grão da região do metal base, localizada a direita da imagem com leves traços da laminação, apresentando-se menor que os grãos da chamada região de refino de grãos. Foi atribuída a nomenclatura de região de refino de grãos porém percebe-se aqui que esta não condiz com o que ocorre já que em comparação ao metal base os grãos aumentaram. Mesmo assim a nomenclatura foi mantida mas destaca-se novamente que ocorre o crescimento de grão na região.

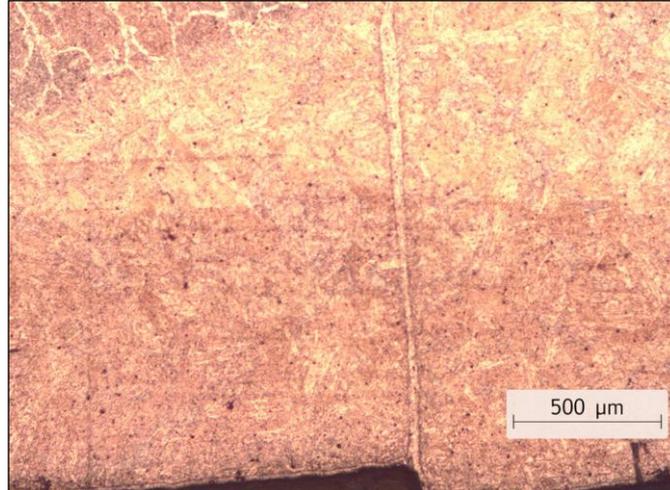
Figura 40 – Região de transição entre: a) região de crescimento de grãos, b) região de refino de grão e c) metal base (50x)



Fonte: O autor (2013)

A região com possível defeito de soldagem vista na macrografia da amostra com parâmetros de *Energia Maior*, conforme Figura 31, foi verificada. A Figura 41 apresenta a micrografia da região.

Figura 41 – Região com defeito de soldagem na amostra com *Energia Maior* (50x)

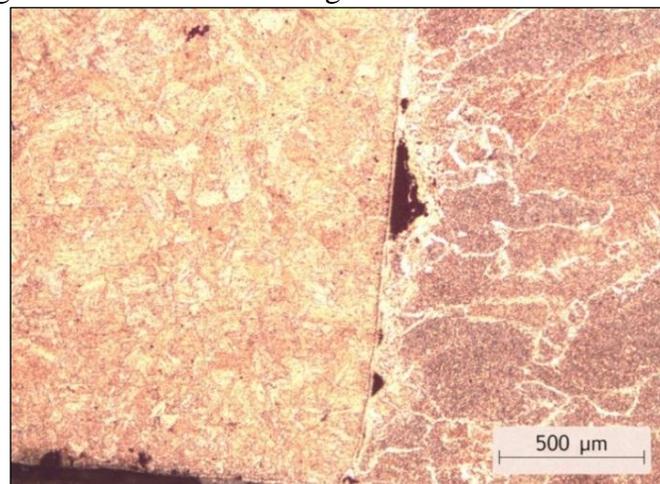


Fonte: O autor (2013)

Observa-se na imagem o defeito de falta de fusão na região. As principais causas do ocorrido podem estar ligadas a parâmetros inadequados, folga do chanfro da solda insuficiente, problemas no fluxo de gás, problemas com limpeza da região e posição de soldagem favorável para o acontecimento deste defeito.

A região da macrografia da solda com parâmetros de *Energia Menor*, conforme Figura 32, também foi verificada e apresentou o mesmo defeito de falta de fusão, conforme pode ser verificado na Figura 42. As causas do defeito são as mesmas do item anterior.

Figura 42 – Região com defeito de soldagem na amostra com *Energia Menor* (50x)

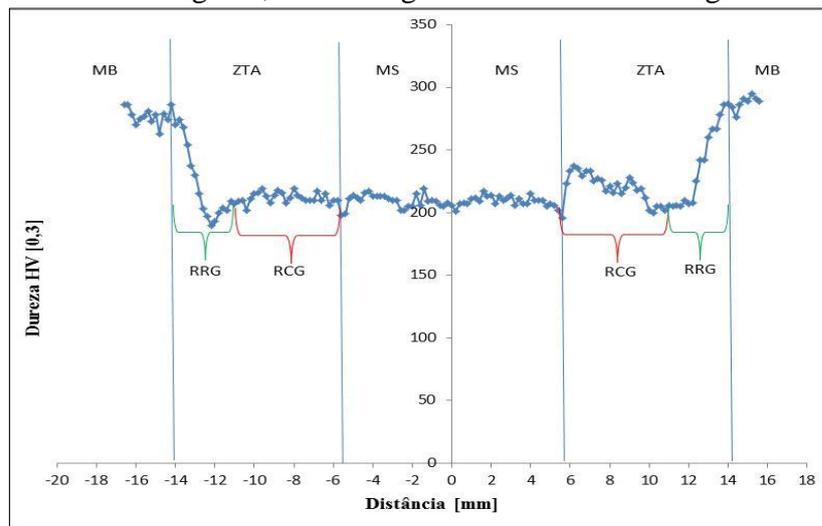


Fonte: O autor (2013)

3.2.5 Ensaio de microdureza

A Figura 43 apresenta o perfil de microdureza para a amostra soldada com *Energia Maior*.

Figura 43 – Perfil de microdureza para amostra soldada com parâmetros de *Energia Maior*
 MB – metal base, ZTA – zona termicamente afetada, MS – metal de solda, RRG – região de refino de grãos, RCG – região de crescimento de grãos



Fonte: O autor (2013)

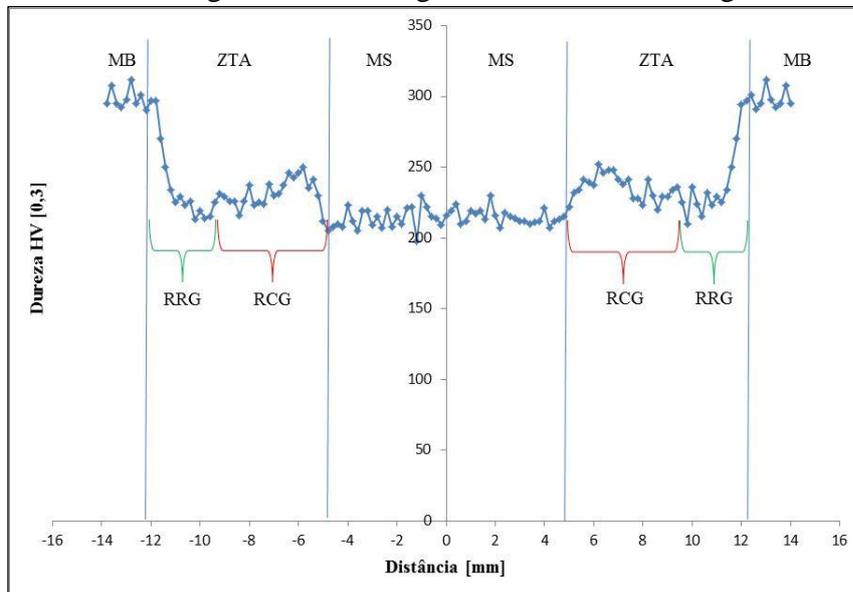
Ao entrar na região da zona termicamente afetada (ZTA) a dureza do material decresce. Isso ocorre pela presença de grãos regulares na região em comparação ao material base, ocasionando o alívio de tensões e com isso a redução nas propriedades mecânicas, tal como a dureza. Após a queda observa-se aumento na dureza, caracterizado pela entrada na região de crescimento de grãos, onde a disposição dos grãos favorece o aumento das tensões no local.

A região central, que compreende o metal de solda (MS), apresenta dureza menor que a encontrada no metal base (MB), característica dada ao fato de que o metal de solda utilizado apresenta propriedades mecânicas menores que as do aço DOMEX[®] 700 MC.

A Figura 44 apresenta o perfil de microdureza para a amostra soldada com parâmetros de *Energia Menor*.

O comportamento do perfil segue os mesmos moldes do perfil de microdureza da amostra soldada com parâmetros de *Energia Maior*. O tamanho da zona termicamente afetada é menor na amostra soldada com *Energia Menor*. O aumento da energia de soldagem é proporcional ao aumento do tamanho da zona termicamente afetada.

Figura 44 – Perfil de microdureza para amostra soldada com parâmetros de *Energia Menor*
 MB – metal base, ZTA – zona termicamente afetada, MS – metal de solda, RRG – região de refino de grãos, RCG – região de crescimento de grãos



Fonte: O autor (2013)

As regiões de crescimento de grãos (RCG) localizadas no lado direito das imagens apresentam-se maiores quando comparadas as regiões do lado esquerdo. Este fato está atrelado a posição do sobre-metal da junta soldada, o qual escorreu para este lado em virtude da inclinação no processo de soldagem, apresentada anteriormente, e que provocou diferenças na temperatura e na taxa de resfriamento da região.

A Tabela 5 apresenta os tamanhos da zona termicamente afetada obtidos por simulação computacional, macrografia e microdureza para comparação.

Tabela 5 – Tamanhos da zona termicamente afetada (ZTA) obtida por simulação computacional, ensaio macrográfico e perfil de microdureza

Parâmetro	Região	Tamanho Simulado (mm)	Tamanho Macrográfico (mm)	Tamanho Microdureza (mm)	Diferença Simulado/Macrografia (%)	Diferença Simulado/Microdureza (%)
<i>Energia Maior</i>	ZTA	17,8	12,9	14,3	38	20
<i>Energia Menor</i>	ZTA	16,4	10,2	12,5	28	24

Fonte: O autor (2013)

Tanto na comparação entre os resultados por simulação, por microdureza e por macrografia da amostra com *Energia Maior* quanto na amostra soldada com *Energia Menor* erros foram observados. Estas diferenças são menores na comparação entre dos valores simulados com os dados obtidos do ensaio de microdureza. Os valores obtidos da microdureza apresentam maior confiabilidade, trazendo um resultado refinado, por isso a proximidade com os valores simulados. Fatores como as simplificações da equação de Rosenthal, a revelação da macrografia não permitindo boa visualização, posição onde o perfil de microdureza foi coletado e arredondamento nos resultados são causas da diferença entre os valores simulados e os obtidos nos ensaios.

3.2.6 Ensaio de tração

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram numerados de 1 a 9. Os de números 1, 2 e 3 foram soldados utilizando-se a *Energia Maior*. Os corpos de prova de números 4, 5 e 6 foram soldados utilizando-se a *Energia Menor*.

Os corpos de prova de números 7, 8 e 9 apresentam o Material Original, sem passagem pelo processo de soldagem.

A Tabela 6 apresenta os resultados da tensão de escoamento e o limite de resistência a tração para as amostras soldadas e para as amostras de Material Original.

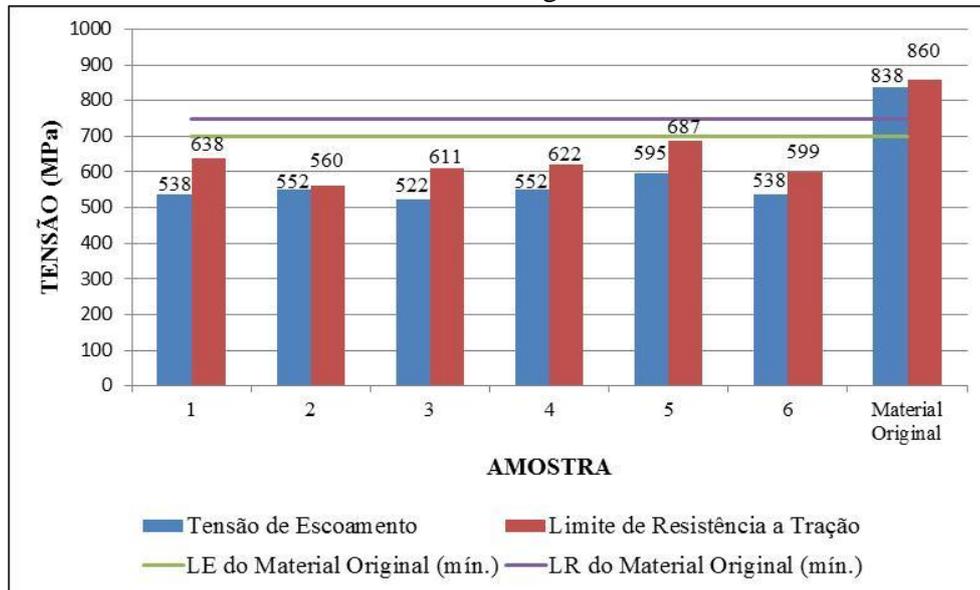
Tabela 6 – Propriedades mecânicas das amostras submetidas ao ensaio de tração

Corpo de Prova		Tensão de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência a Tração (MPa)
<i>Energia Maior</i>	1	538	638
	2	552	560
	3	522	611
<i>Energia Menor</i>	4	552	622
	5	595	687
	6	538	599
<i>Material Original</i>	7	832	855
	8	845	865
	9	836	859

Fonte: O Autor (2013)

A Figura 45 mostra graficamente o comportamento mecânico das amostras soldadas, juntamente com os valores da média das amostras do material bruto.

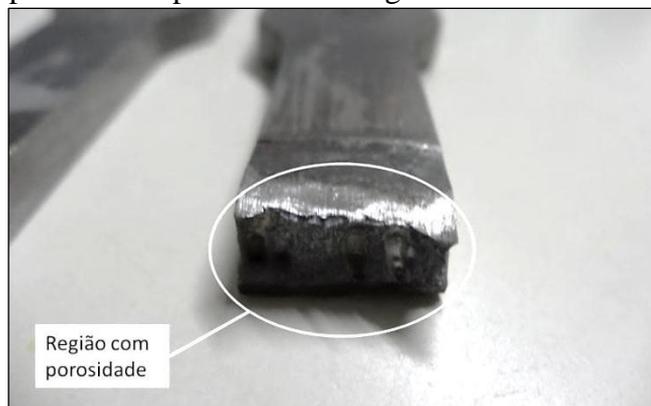
Figura 45 – Gráfico comparativo das propriedades mecânicas das amostras soldadas e do material original



As duas linhas horizontais do gráfico representam o limite de escoamento mínimo e o limite de resistência a tração mínimo para o material bruto, conforme dados do fabricante SSAB.

A amostra número 2 rompeu na zona fundida (ZF) e ao observar o corpo de prova identifica-se alta taxa de porosidade, causada provavelmente pelos problemas observados na região de defeito, conforme Figura 31, vista na micrografia. A Figura 46 mostra a região onde ocorreu a quebra do corpo de prova e a porosidade encontrada.

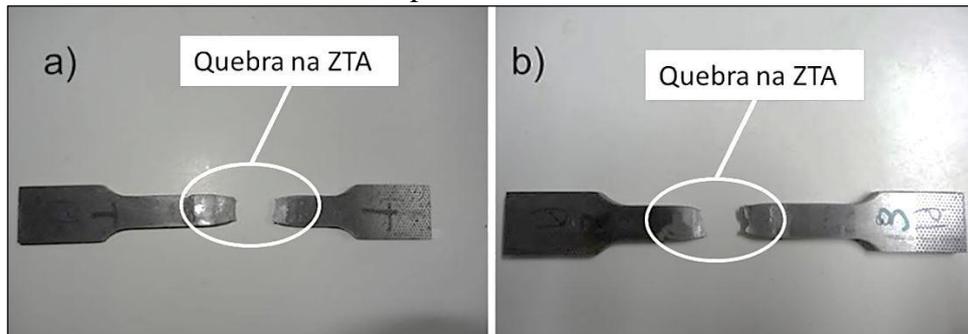
Figura 46 – Região de rompimento em falha de solda do corpo de prova número 2 apresentando porosidade na região do metal de solda



Fonte: O Autor (2013)

As amostras 1 e 3 apresentaram o rompimento na zona termicamente afetada (ZTA), conforme pode ser observado na Figura 47.

Figura 47 – Rompimento dos corpos de prova na ZTA. a) corpo de prova número 1, b) corpo de prova número 3



Fonte: O autor (2013)

A amostra de número 5 apresentou o rompimento na zona termicamente afetada (ZTA), conforme pode ser observado na Figura 48.

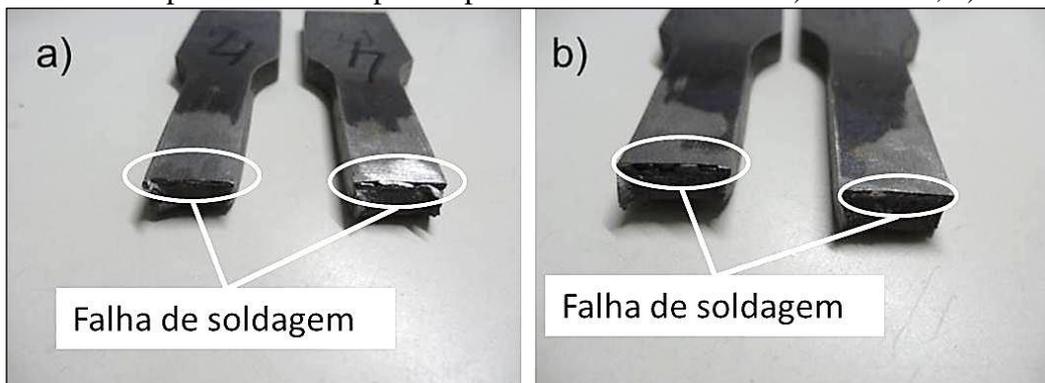
Figura 48 – Rompimento do corpo de prova número 5 na ZTA



Fonte: O autor (2013)

As amostras de números 4 e 6 romperam na zona fundida e pode-se observar na Figura 49 que a quebra nesta região se deu devido a falha de soldagem observada na macrografia, conforme Figura 32, e já discutida suas prováveis causas anteriormente.

Figura 49 – Rompimento dos corpos de prova na falha de solda. a) número 4, b) número 6



Fonte: O autor (2013)

Considerando-se somente as amostras que romperam na zona termicamente afetada (ZTA) na análise dos resultados as de número 1 e 3, provenientes da maioria energia de soldagem, tiveram os limites de resistência ao escoamento e a tração inferiores ao valor encontrado para a amostra de número 5, com energia de soldagem menor.

Conforme observado no perfil de microdureza, a região com a maior taxa de decréscimo de dureza encontra-se no início da zona termicamente afetada. Isso identifica o fato das amostras romperem nesta região. A configuração dos grãos homogênea da ZTA em comparação ao metal base também é indicativo de redução nas tensões do material e queda das propriedades mecânicas, como visto anteriormente.

CONCLUSÕES

Após realizados os testes e as análises conclui-se que:

- Quanto maior a energia de soldagem maior é o tamanho da zona termicamente afetada pelo calor, conforme observado na análise macrográfica e no perfil de microdureza.

- Não foram observadas variações microestruturais na comparação entre o aço soldado com energia maior e o aço soldado com energia menor, conforme metalografia realizada.

- O tamanho de grão em todas as regiões da ZTA é maior que o tamanho de grão do metal base, conforme observado nas imagens metalográficas na região de transição entre a ZTA e o MB. O grão refinado do MB é uma das características das altas propriedades mecânicas do material.

- As propriedades mecânicas do material decrescem com o aumento da energia de soldagem, como mostrado no ensaio de tração e de microdureza.

- O rompimento dos corpos de prova no ensaio de tração se deram na região da ZTA, onde foi observada a redução de dureza do material.

- A simulação computacional da transferência de calor durante o processo de soldagem apresentou diferenças devido as simplificações da equação de Rosenthal.

Os resultados dos ensaios de tração indicaram que as propriedades mecânicas da junta soldada de aço ARBL DOMEX[®] 700 MC são menores do que aqueles obtidos para o material original, fato este associado com a energia térmica gerada pelo processo de soldagem. Os limites de resistência ao escoamento e a tração, contudo, apresentaram-se elevados quando comparados com aços tradicionalmente empregados pela JOST. Desta forma, a utilização do aço ARBL DOMEX[®] 700 MC torna-se uma opção factível de ser empregada nos produtos da empresa, após estudos e testes conforme aplicação, trazendo como principal benefício a redução de peso dos componentes fabricados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho realizado segue sugestões para trabalhos futuros.

- Verificar o comportamento mecânico do aço DOMEX[®] 700 MC através de ensaio de fadiga.
- Utilizar ensaios não destrutivos para garantir a integridade de juntas soldadas de aço ARBL para posterior realização de ensaios destrutivos.
- Estudar a transferência de calor em aços durante o processo de soldagem utilizando termopares.
- Verificar o comportamento mecânico e metalúrgico de uma junta soldada de aço carbono LNE380 e aço DOMEX[®] 700 MC.
- Calcular, a partir dos dados de tamanho de ZTA real, o valor da eficiência de soldagem com o auxílio de simulação computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS Welding Handbook. **Welding Science and Technology**. 9. ed. Miami: AWS, 2001, volume 1.

BELGO BEKAERT **Para soldas, escolha qualidade**. Sweden. Belgo Bekaert, 2013. Disponível em: < <http://www.belgobekaert.com.br>>. Acesso em: 08 agosto 2013.

CORTÉZ, V. H.; MEDINA, G. Y. P.; VALDÉZ, F. A. R.; LÓPEZ, H. F. Effects of the Heat Input in the Mechanical Integrity of the Welding Joints Welded by GMAW and LBW Process in Transformation Plasticity Steel (TRIP) Used in the Automotive Industry. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, n. 3, p. 234-241, Jul/Set 2010.

DEMIR, B.; ERDOGAN M. The hardenability of austenite with different alloy content and dispersion in dual-phase steels. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 208, p. 75 – 84, 2008. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608000174>>. Acesso em: 01 maio 2013.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte & Conformação de Metais**, São Paulo, n. 44, p. 26-57, dez. 2008.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 461p.

MACHADO, I. G. **Condução de calor na soldagem**: Fundamentos & aplicações. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2000. 119p.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas**. Porto Alegre: Do autor, 2007.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 363p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Dos autores, 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2013.

MODENESI, P. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Belo Horizonte: Do autor, 2012. Disponível em: < <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2013.

MARTINS, W. P.; NASCIMENTO, C. C. F.; MENESES, V. A.; PAIVA, A. E. M.; LEAL, V. S. Influência dos parâmetros de soldagem no comportamento microestrutural e nas propriedades mecânicas de juntas soldadas em aços ARBL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. Caxias do Sul: Dos autores, 2011.

MIRZAEI, M.; JESHVAGHANI, R. A.; YAZDIPOUR, A.; ZANGENEH-MADAR, K. Study of welding velocity and pulse frequency on microstructure and mechanical properties

of pulsed gas metal arc welded high strength low alloy steel. **Materials & Design**, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913004007>>. Acesso em: 27 abril 2013.

ONUKEI, C. K. T. **Simulação de Ciclos Térmicos a partir da Equação de Rosenthal e a Validação da mesma em Aços Cromo-Molibdênio**. 2009. 50 f. Dissertação (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Laboratório Aplicado de Tecnologia de Soldagem, Curitiba, 2009.

PERINI, F. G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Materiais, Caxias do Sul, 2008.

QUITES, A. M. **Introdução à soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: SOLDASOFT, 2002. 352p.

RODRIGUES, S. M. **Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas de aços bifásicos de alta resistência mecânica**. 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2012.

RODRIGUES, S. M. Estudo do comportamento microestrutural e mecânico de juntas soldadas entre aços de alta resistência – DOMEX 700 MC. In: COLOQUIUM INTERNACIONAL SAE BRASIL DE SUSPENSÕES E IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS & MOSTRA DE ENGENHARIA, 7., 2012, Caxias do Sul. **Artigo**. Caxias do Sul: SAE, 2012.

SSAB TUNNPLAT, **Sheet steel joining handbook**. Sweden. SSAB Tunnplat, 2004. Disponível em: <ssabdirect.com>. Acesso em: 06 abr. 2013.

VASCONCELOS, R. C.; MACIEL, T. M.; GURGEL, J. M. A. M. Estudo teórico e experimental da condução de calor no processo de soldagem ao arco submerso. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 4, n. 1,p. 1-13, 2009. Disponível em: <<http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/index.php/REMAP/article/viewFile/69/107>>. Acesso em: 06 abr. 2013.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 1992. 494p.

ANEXO A

Algoritmo de simulação computacional do fluxo de calor sobre a superfície da chapa e de elaboração da curva de ciclo térmico para pontos específicos sobre a chapa, elaborado no *Software Matlab*[®] (ONUKEI, 2009).

```

clear all
clc
close all

%-----Definição dos parâmetros de trabalho-----
V=input('Tensão [V]: '); % Será solicitada a tensão aplicada
I=input('Corrente Elétrica [A]: '); % Será solicitada a corrente elétrica
e=0.8; %Eficiência da fonte de solda [-]
k=45; %Condutividade térmica do material [W/mm°C]
alpha=9.1575e-6; %Difusidade térmica do material [mm^2/s]
v=input('Velocidade da Tocha [mm/min]: ')/60000; %Velocidade da tocha
h=input('Espessura da Chapa [mm]: ')/1000; %Espessura da chapa [m]
larg=80e-3; % Largura da chapa [m]

%-----Inicialização das variáveis-----
T_zero=20; %Temperatura inicial da chapa antes do inicio da soldagem [°C]
pontos=1000; %Número de pontos para construção da Curva
deltat=0.1; %Acrecimo de tempo para cada ponto [s]

%-----Escolha de Caso-----
C=input('Escolha 1 p/ calor na Chapa ou 2 p/ CCT: '); % Escolher caso

switch (C)

    case (1)
        xzero=-0.01; % Posição inicial de x
        y=linspace(-larg/2, larg/2, pontos); %Largura da leitura de pontos em Y
        x=zeros(1, pontos);
        tempo=zeros(1, pontos);
        T=zeros(pontos, pontos);

    for a=1:pontos
        tempo(a)=deltat*(a-1);
        x(a)=xzero+v*tempo(a);
        for i=1:length(y)
            r=sqrt((x(a))^2 + y(i)^2); %Distância radial até a tocha [m]
            arg_bessel=v*r/(2*alpha); %Argumento para cálculo da função Bessel
            vlr_bessel=besselk(0, arg_bessel); %Valor da função Bessel

            T(i, a)=T_zero+(((V*I*e)/h)/(2*pi*k))*(exp(((v*(x(a)))/(2*alpha)))*(vlr_bessel))); %Temperatura nos pontos
        end
    end

end

figure(1)
[X, Y]=meshgrid(x, y);
contourf(X, Y, T, 0:100:1500)
xlabel('x (m)'); ylabel('y (m)'); zlabel('z')
xmin=min(x);

```

```

ylarg=larg/2;
view([0,0,1])
colorbar

    case (2)
    y=input('Distância Y desejada [mm]: ')/1000; %Posição y escolhida para
coleta de dados
    xzero=-0.01; % Posição inicial de x

for a=1:pontos
    tempo(a)=deltat*(a-1);
    x(a)=xzero+v*tempo(a);
    r(a)=sqrt((x(a))^2 + y^2); %Distância radial [m]
    arg_bessel(a)=v*r(a)/(2*alpha); %Argumento para cálculo da função
Bessel
    vlr_bessel(a)=besselk(0,arg_bessel(a)); %Valor da função Bessel...

T(a)=T_zero+(((V*I*e)/h)/(2*pi*k))*(exp((v*(x(a)))/(2*alpha)))*(vlr_besse
l(a))); %Temperatura nos pontos
end

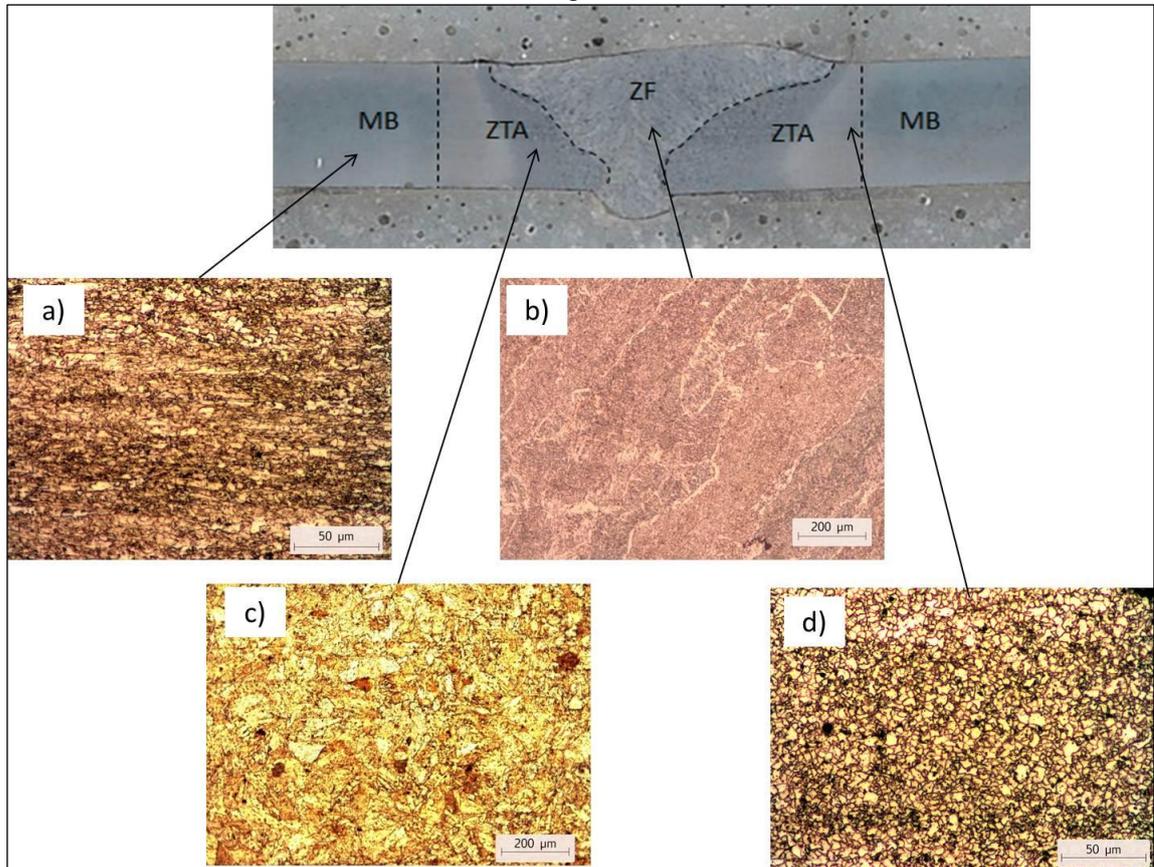
plot(tempo,T)
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Temperatura (°C)')
grid on

end

```

ANEXO B

Figura 50 – Micrografias encontradas na amostra soldada com *Energia Menor*; a) metal base (500x), b) material de solda (100x), c) região de crescimento de grão (100x), d) região de refino de grão (500x)



Fonte: O autor (2013)