

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Patrícia Aparecida de Almeida Ferreira

“Avaliação dos parâmetros de soldagem depositado pelo processo arco submerso para a fabricação de uma viga perfil I”

**Belo Horizonte
Julho de 2019**

Patrícia Aparecida de Almeida Ferreira

“Avaliação dos parâmetros de soldagem depositado pelo processo arco submerso para a fabricação de uma viga perfil I”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro

Belo Horizonte

Julho de 2019

F383a Ferreira, Patrícia Aparecida de Almeida.
Avaliação dos parâmetros de soldagem depositado pelo processo arco submerso para a fabricação de uma viga perfil I / Patrícia Aparecida de Almeida Ferreira. – 2019.
101 f. : il.
Orientadora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa
Coorientador: Carlos Alberto Carvalho Castro

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2019.
Bibliografia.

1. Soldagem. 2. Soldagem a arco. 3. Viga perfil I. I. Costa, Maria Celeste Monteiro de Souza. II. Castro, Carlos Alberto Carvalho. III. Título.

CDD: 651.72



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*“AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM
CHAPAS DE AÇO ESTRUTURAL DE ALTA RESISTÊNCIA
DEPOSITADO POR ARCO SUBMERSO PARA A
FABRICAÇÃO DE UMA VIGA DE GRANDE PORTE DE
PERFIL I”*

Autora: Patrícia Aparecida de Almeida Ferreira

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof.^a Dr.^a Maria Celeste Monteiro de Souza Costa (ORIENTADORA)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. João Luiz Turchetti Lara Rezende
Ge Transportation, a Wabtec company

Belo Horizonte, 26 de Abril de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que permitiu que eu pudesse caminhar até aqui, que me concede a cada dia sabedoria para continuar alcançar meus sonhos da melhor forma e ao lado de pessoas de bem. Obrigada por gozar de saúde e energia, obrigada por não deixar morrer em mim a procura incessante do saber, e por me tornar uma pessoa melhor dia após dia.

Ao meu querido esposo, minha âncora, obrigada por abster de suas vontades colocando a frente as minhas, obrigada por cuidar tão bem de nossa família, e por fazer com que este fardo fosse mais leve. A minha doce e alegre filha Júlia, obrigada por entender o quanto o estudo é importante para minha vida e o quanto me faz bem. Anseio que eu possa ser inspiração para sua vida acadêmica. Ao meu amado caçula Arthur, que muitas vezes esteve ao meu colo durante a criação de algumas destas páginas, o meu amor por vocês vai além de minha compreensão.

Minha gratidão Dra. Maria Celeste M. S. Costa, minha orientadora. Tenho que ressaltar que seu empenho em me suportar com os melhores conselhos, reuniões, ajuda moral, ideias, ações, etc. com certeza foi um diferencial para que eu pudesse chegar até aqui. A sua simplicidade revestida de conhecimento, competência e força, torna você a professora que nós alunos precisamos. Agradeço por me ensinar a buscar e fazer o que deve ser feito, o seu exemplo de vida me inspirou a entregar o melhor de mim.

O meu muito obrigado ao Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro, meu co-orientador. Agradeço pelo compartilhamento de toda sua experiência, conhecimento e pela prontidão em ajudar, pelas dicas valiosas e por ser decisivo nos momentos de dificuldades, obrigada por enxergar o potencial deste trabalho.

Agradeço a GE transportes ferroviários, agora a Wabtec Company por estimular o conhecimento e crescimento de seus profissionais, obrigada pelo suporte a este trabalho.

Obrigada ao Time MECBRUN pelo suporte experimental, por acreditar que as análises realizadas aqui podem trazer benefícios e conhecimento para o processo de soldagem desta viga. Agradeço especialmente ao time de soldagem e inspeção por todo suporte concedido para que esta soldagem pudesse ser realizada. Ao Operador de Soldagem SAW Adriano que executou a soldagem dos corpos de prova deste trabalho, sempre muito cuidadoso e zeloso ao processo.

Obrigada aos meus familiares, pais e irmãs que estiveram sempre por perto nos acompanhando e estimulando a vencer mais esta etapa de minha vida.

Ao CEFET/MG pelo suporte na análise macroestrutural, microestrutural e mecânica, especialmente a professora Elaine Carballo Siqueira Corrêa pelo suporte a este laboratório e por todos os seus conselhos ao longo desta caminhada.

Agradeço a professora Ivete pela sua prontidão em me ajudar nas análises das micrografias das amostras deste trabalho.

Ao CAPES - Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

Ao CT INFRA – Financiadora de inovação e Pesquisa (FINEP).

RESUMO

Atualmente, o mercado tem encorajado e impulsionado as empresas para oferecer produtos ou serviços de forma diferenciada, onde quebra de paradigmas, novas tecnologias e ciclo produtivo otimizado são pilares para obtenção de resultados efetivos. Os processos de união por soldagem têm alcançado avanços tecnológicos e oferece a indústria um leque de alternativas de processos de união. Dentro deste contexto o presente trabalho propõe a utilização do processo de soldagem a arco submerso (SAW) para a soldagem de uma viga estrutural de um veículo ferroviário (Locomotiva), que até então era fabricada somente pelo processo de laminação a quente, pois haviam receios relacionados à resistência inadequada, torções e empenos que inviabilizavam a soldagem, porém fatores como importação e a necessidade de nacionalização impulsionaram fortemente a fabricação desta viga por soldagem. Inicialmente algumas vigas foram soldadas, porém, os resultados alcançados das soldas não eram conhecidos a fundo de forma a garantir que as mesmas estavam sendo produzidas com os melhores parâmetros que conseqüentemente ofereceriam um melhor custo, qualidade e um desempenho adequado para o produto. Por isso, com base nos parâmetros de soldagem utilizados anteriormente foi proposto a soldagem de 27 corpos de prova com parâmetros de corrente e velocidade variados, com intuito de se obter os resultados desta soldagem por meio de ensaios macroestruturais, microestruturais e mecânicos. O aço utilizado foi o ASTM A-572 grau 50, um aço estrutural de alta resistência de baixa liga. Fabricar esta viga pelo processo de soldagem permitiu a nacionalização de um componente, que além de gerar produção para o mercado nacional, eliminou o processo de importação, que neste caso possuía alto prazo de entrega, transporte especial e custos elevados.

Palavras Chaves: Soldagem, Soldagem a Arco Submerso, Viga Estrutural.

ABSTRACT

Nowadays the market has encouraged and pushes companies to offer products or services in a differentiated way, where breaking paradigms, new technologies and optimized production cycle are pillars to obtain effective results. The processes of union by welding have reached technological advances and offer the industry a range of alternatives of union processes. In this context, the present work proposes the use of the submerged arc welding process (SAW) to weld a structural beam of a railway vehicle (Locomotive), which until then was only manufactured by the hot rolling process, since there were fears related to the inadequate resistance, twisting and bends that could be irreversible, but factors such as importation and the need for nationalization strongly stimulated the manufacturing of this beam by welding. Initially some beams were welded, however, the results of the welds were not known deeply to ensure that they were being produced with the best parameters that would consequently will offer a better cost, quality and adequate performance for the product. Therefore, based on the welding parameters previously used, it was proposed the welding of 27 specimens with varied current and velocity parameters, in order to obtain the results of this welding through macrostructural, microstructural and mechanical tests. The steel used was ASTM A-572 grade 50, a high strength low alloy structural steel. Manufacturing this beam by the welding process allowed the nationalization of a component, which besides generating production for the domestic market, eliminated the import process, which in this case had high lead time, special transport and high costs.

Key Words: *Welding, Submerged Arc Welding, Beam.*

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Locomotiva de Carga Modelo AC-44i.	2
Figura 2 - Processo Arco submerso tandem arc com seis arames.	5
Figura 3 - Representação esquemática em perspectiva, do processo de laminação. 6	
Figura 4 - Laminador Trio.	6
Figura 5 - Aspecto do arco elétrico na soldagem (a) GTAW e (b) destaque para a poça de fusão.	8
Figura 6 - Soldagem a Arco Submerso (Esquemático).	8
Figura 7 - Equipamento para a Soldagem ao Arco Submerso.	11
Figura 8 - Variação do limite de escoamento, do módulo de elasticidade e do coeficiente de expansão térmica de aços com a temperatura.	14
Figura 9 - Representação esquemática das regiões de uma soldagem.	15
Figura 10 - Representação esquemática dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem em uma junta de solda.	16
Figura 11 - Dissipação de calor durante a soldagem de juntas de (a) topo e de (b) ângulo (em T).	16
Figura 12 - Procedimento experimental	19
Figura 13 – Representação da soldagem preliminar em viga perfil I.	19
Figura 14 - Representação da soldagem de cordões em chapas.	20
Figura 15 – Representação da soldagem final em uma amostra de viga perfil I.	20
Figura 16 – Corte e preparação das chapas a serem soldadas respectivamente. ...	23
Figura 17 - a) Perfil da junta e b) chanfro reto em I.	24
Figura 18 - Posição plana de soldagem.	24
Figura 19 - Simbologia para execução da soldagem.	25
Figura 20 – Representação da garganta do cordão em juntas T, com cordão de filete e cálculo.	25
Figura 21 - Equipamento para soldagem na posição 1F.	26
Figura 22 - Comprimento da viga em perspectiva.	27
Figura 23 - Medidas para minimizar distorções.	27
Figura 24 - Processo de Desempeno da Viga.	28
Figura 25 - Gabarito de solda.	28

Figura 26 - Perfis aceitáveis e inaceitáveis de um filete de solda.	29
Figura 27 - Desenho esquemático de retirada de corpo de prova, destaque face 1 e face 2.	30
Figura 28 - Forma final da amostra da viga para ensaio.	30
Figura 29 - Foto de uma macrografia em uma face da viga.	31
Figura 30 - Serra industrial utilizada para cortar as extremidades da amostra.	32
Figura 31 - a) Amostra original b) amostra cortada para adequação ao microscópio MEV.	32
Figura 32 - Microscópios utilizados na técnica de avaliação da microestrutura.	33
Figura 33 - Disposição dos locais onde foram realizados o ensaio de dureza e microdurômetro.	34
Figura 34 - Chapas utilizadas para soldagem dos corpos de prova.	37
Figura 35 – Preparação do metal de base antes da soldagem.	37
Figura 36 - Soldagem de cordões do passe 1 sobre a chapa de #2.	38
Figura 37 - Soldagem dos cordões sobre chapa.	38
Figura 38 – Parâmetro de soldagem do 9º cordão do passe 3, 38 V e 97 cm/min. ...	39
Figura 39 - Soldagem finalizada sobre chapas.	39
Figura 40 - Processo de corte dos cordões sobre chapas para obtenção de amostras.	40
Figura 41 – Cortadora metalográfica e amostra final a ser embutida.	41
Figura 42 – Amostra sendo embutida no porta amostra e resina e líquido utilizado.	41
Figura 43 - Lixas rotativas e politrizes rotativas utilizadas na preparação das amostras.	42
Figura 44 - Amostra polida, ataque com Nital 5% e a macrografia da área da soldagem revelada.	43
Figura 45 - Medição das áreas de soldagem.	43
Figura 46 - Perfil de dureza realizado no CP e detalhe do micrômetro acoplado ao microdurômetro.	46
Figura 47 - Marca do indentador deixada no ZF e microdurômetro Shimadzu utilizado no ensaio.	46
Figura 48 - Amostra da viga perfil I.	47
Figura 49 - Amostra de viga perfil I a ser soldada.	48
Figura 50 - Desenho esquemático de retirada de corpo de prova.	49
Figura 51 - Foto de uma Macrografia da Amostra da viga A1 aba inferior.	50

Figura 52 - Filete final de soldagem.....	55
Figura 53 - Medição realizada no filete final de solda e perfil do filete de solda.	56
Figura 54 - Aspecto da solda e regiões do cordão da amostra de número 3.....	57
Figura 55 – Macrografia da amostra 3 face 1 e 2 respectivamente	57
Figura 56 - Dados de Penetração da amostra 3 da viga 1.....	58
Figura 57 - Micrografia das áreas de soldagem da amostra A3 face 1 observadas no MO.	58
Figura 58 - Micrografia das áreas de soldagem da amostra A3 face 1 observadas no MEV.	59
Figura 59 - Micrografia da área transição da amostra A3 face 1 observadas no MEV.	59
Figura 60 - Resultados das medições das áreas designadas para o ensaio de dureza.	60
Figura 61 - Imagem de uma impressão deixada na zona fundida.	61
Figura 62 - Cordões de solda avaliados.....	62
Figura 63 - Resultado das medições do reforço.	65
Figura 64 - Resultado das medições da largura.....	66
Figura 65 - Resultado das medições da penetração.....	66
Figura 66 - Resultado das medições da área da ZTA.....	67
Figura 67 - Macrografia da amostra 9.1, 2.2 e 8.3, respectivamente.....	67
Figura 68 - Macrografia dos cordões de solda do passe #1.	68
Figura 69 - Macrografia dos cordões de solda do passe #2.	68
Figura 70 - Macrografia dos cordões de solda do passe #3.	69
Figura 71 - Gráficos das análises estatísticas dos cordões do passe 1.....	70
Figura 72 - Gráficos das análises estatísticas dos cordões do passe 2.....	71
Figura 73 - Gráficos das análises estatísticas dos cordões do passe 3.....	72
Figura 74 - Imagens do metal de base realizadas no MO com aumento de 400X. ...	73
Figura 75 - Imagens da zona fundida realizadas no MO com aumento de 400X.	74
Figura 76 - Imagens da zona termicamente afetada realizadas no MO com aumento de 400X.....	74
Figura 77 - Micrografia da ZTA e ZF da amostra 9.1 realizadas no MO com aumento de 400X.....	75
Figura 78 – Micrografia da ZTA e ZF da amostra 9.1 realizada no MEV com aumento de 1200X.....	76

Figura 79 - Micrografia da ZF e ZTA da amostra 2.2 realizadas no MO com aumento de 400X.....	76
Figura 80 - Micrografia da ZF e ZTA da amostra 8.3 realizadas no MO com aumento de 400X.....	77
Figura 81 - Micrografia da ZTA e ZF da amostra 8.3 realizada no MEV com aumento de 1200X.....	77
Figura 82 - Formato em gota dos cordões de solda.	79
Figura 83 - Ponto de medição de dureza da amostra 6.1 na área de transição de ZF para ZTA.	80
Figura 84 – Média do perfil de dureza vertical e horizontal para as amostras do passe 1.....	80
Figura 85 - Média do perfil de dureza vertical e horizontal para as amostras selecionadas.	81
Figura 86 - Amostra da viga perfil I após soldagem final.	82
Figura 87 - Filete final de solda.	83
Figura 88 - Medição realizada no filete final de solda e perfil do filete de solda.	83
Figura 89 - Macrografia da amostra final.	84
Figura 90 – Macrografia da amostra 1 aba superior e inferior, respectivamente.	84
Figura 91 - Dados de penetração da amostra 1.....	85
Figura 92 - Micrografia do metal de base da amostra 1 observadas no MO.	86
Figura 93 - Micrografia da ZF e ZTA da amostra 1 observadas no MO.....	86
Figura 94 - Resultados do ensaio de microdureza da amostra 1 aba superior e inferior.	87
Figura 95 - Comparação do perfil do filete de solda.	88
Figura 96 - Penetração da soldagem preliminar (1º etapa) X soldagem final (3º etapa).	89
Figura 97 – Penetração da solda preliminar X solda final fora do passe de raiz.	90
Figura 98 - Macrografia da solda preliminar (1º etapa) X solda final (3º etapa).	92
Figura 99 – Micrografias da solda preliminar (1º etapa) X soldagem final (3º etapa).	93

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A572 grau 50.	21
Tabela 2 - Requisitos de Composição Química do aço ASTM A572 Grau 50	21
Tabela 3 - Média dos dados coletados nos certificados dos materiais utilizados.	21
Tabela 4 - Média dos dados coletados nos certificados dos materiais - Chapas até 1 1/2"	21
Tabela 5 – Consumíveis utilizados para executar a soldagem.	22
Tabela 6 - Faixa dos parâmetros de soldagem da EPS qualificada.....	26
Tabela 7 - Variáveis retiradas da matriz de dados para formação dos níveis de variação.....	35
Tabela 8 – Divisão de blocos de parâmetros para execução da soldagem de corpos de prova.	35
Tabela 9 - Matriz de classificação.	44
Tabela 10 - Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem final.....	48
Tabela 11 - Parâmetros coletados na soldagem preliminar da viga perfil I #1.....	52
Tabela 12 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 1.	53
Tabela 13 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 2.	53
Tabela 14 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 3.	54
Tabela 15 - Dimensões das regiões dos cordões soldados sobre chapas, referente ao passe #1.....	62
Tabela 16 - Dimensões das regiões dos cordões soldados sobre chapas, referente ao passe #2.....	63
Tabela 17 - Dimensões das regiões dos cordões soldados sobre chapas, referente ao passe #3.....	63
Tabela 18 - Matriz de classificação para os resultados do passe #1.....	64
Tabela 19 - Matriz de classificação para os resultados do passe #2.	64
Tabela 20 - Matriz de classificação para os resultados do passe #3.	65
Tabela 21 - Valores de penetração de demais amostras da soldagem preliminar. ...	91
Tabela 22 – Microdureza da amostra preliminar (1º etapa) X e final (3º etapa).....	94

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANTF	- Associação nacional dos transportadores ferroviários
ASTM	- American society for testing and materials
ASME	- American society of mechanical engineers
AWS	- American welding society
CQS	- Certificado de qualificação de soldadores
CP	- Corpo de prova
EPS	- Especificação procedimento de soldagem
FCAW	- Flux cored arc welding
FSW	- Friction stir welding
GMAW	- Gas metal arc welding
GTAW	- Gas tungsten arc welding
HB	- Dureza brinell
MB	- Metal de base
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
MO	- Microscopia ótica
PAW	- Plasma arc welding
RQPS	- Registro de qualificação do procedimento de soldagem
SAW	- Submerged arc welding
SMAW	- Shielded metal arc welding
ZF	- Zona fundida
ZTA	- Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 - Objetivos específicos	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Introdução	4
3.2 Processo de laminação	5
3.3 Processos de Soldagem	7
3.4 Soldagem a arco submerso	8
3.4.1 Equipamentos da Soldagem SAW	11
3.4.2 Consumíveis	12
3.5 - Efeitos da variação de alguns parâmetros de soldagem	13
3.6 Tensões residuais e distorções devidas à soldagem	14
3.7 – Metalurgia da soldagem	15
3.8 Vigas soldadas	17
4 – Procedimento experimental.....	18
4.1 Descrição Geral do Trabalho	18
4.2 Materiais e Consumíveis	20
4.2.1 Arame-Eletrodo e Fluxo – Processo SAW.....	22
4.3 Soldagem preliminar em viga perfil I	22
4.3.1 Preparação das chapas para soldagem da viga.....	23
4.3.2 Soldagem da viga	24
4.3.2.1 Parâmetros de soldagem.....	25
4.3.2.2 Aspectos térmicos	26
4.3.3 Coleta dos parâmetros de soldagem.....	28
4.3.4 Ensaio visual do cordão de solda	28
4.3.5 Corte da seção transversal da viga	29
4.3.6 Caracterização macroestrutural.....	30
4.3.7 Caracterização microestrutural.....	31
4.3.8 Caracterização mecânica	33
4.4 Soldagem em corpos de prova	34

4.4.1	Preparação dos parâmetros para execução da soldagem	34
4.4.2	Preparação e soldagem de cordões sobre chapas	36
4.4.3	Ensaio Visual do cordão de solda	40
4.4.4	Corte da seção transversal das chapas	40
4.4.5	Caracterização macroestrutural.....	41
4.4.6	Caracterização microestrutural.....	44
4.4.7	Caracterização mecânica	45
4.5	Soldagem final em amostra de viga perfil I	47
4.5.1	Preparação das chapas para soldagem da viga.....	47
4.5.2	Soldagem da amostra de viga	47
4.5.2.1	Parâmetros de Soldagem da amostra de viga	48
4.5.3	Ensaio Visual do cordão de solda	48
4.5.4	Corte da seção transversal da amostra de viga I	49
4.5.5	Caracterização macroestrutural.....	50
4.5.6	Caracterização microestrutural.....	51
4.5.7	Caracterização mecânica	51
4.5.8	Comparar resultados da soldagem da 1º etapa com a soldagem da 3º etapa	51
5	– RESULTADOS e discusSÃO	52
5.1	– Testes preliminares.....	52
5.1.2	Ensaio visual dos cordões de solda do teste preliminar	55
5.1.3	Caracterização macroestrutural.....	56
5.1.4	Caracterização microestrutural.....	58
5.1.5	Caracterização mecânica	60
5.2	– Soldagem em corpos de prova	61
5.2.1	Ensaio visual dos cordões de solda	61
5.2.2	Caracterização macroestrutural.....	62
5.2.3	Caracterização microestrutural.....	73
5.2.4	Caracterização mecânica	78
5.3	Soldagem final em amostra de viga perfil I	82
5.3.1	Ensaio visual do cordão de solda da soldagem final em amostra de viga perfil I.....	82
5.3.2	Caracterização macroestrutural.....	84
5.3.3	Caracterização microestrutural.....	85

5.3.4 Caracterização mecânica	87
5.4 Análise Comparativa	87
5.4.1 - Ensaio visual do cordão de solda	87
5.4.2 - Caracterização macroestrutural.....	88
5.4.3 - Caracterização microestrutural.....	92
5.4.4 Caracterização mecânica	93
6 - CONCLUSÕES.....	95
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

1 – INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário brasileiro possui um grande potencial devido toda a sua extensão territorial. Porém, devido aos insuficientes recursos empregados no modal ferroviário no país, permite que o Brasil tenha atualmente somente cerca de 30.000 km de extensão de malha ferroviária. Na matriz do transporte no Brasil, este modal representa aproximadamente 25%, ao passo que o modal rodoviário possui cerca de 58%. Quando comparado com outros países desenvolvidos e também de grande extensão territorial, a matriz de transporte ferroviária representa em torno de 43%.

Por isso, toda melhoria que venha contribuir para minimizar os custos de uma locomotiva (veículo ferroviário), resultarão em benefícios para os concessionários, que, atualmente, gerenciam grande parte da malha ferroviária brasileira. Investimentos na área de transportes ferroviários são indispensáveis para desenvolvimento e maior integração territorial.

O segmento industrial tem sido desafiado constantemente a se adaptar às transformações socioeconômicas mundiais, e este fato faz com que as empresas busquem trabalhar de forma diferente, propondo soluções até então não pensadas ou até mesmo não testadas por serem consideradas pouco apropriadas.

As empresas que deixam de realizar tais mudanças com foco em melhorias, tais como utilização de ferramentas Lean, metodologia agile e etc, logo terão suas linhas produtivas, processos e layout superados, pois, não acompanharam o avanço da tecnologia. Terão seu ciclo produtivo, custo e qualidade comprometidos com relação à perspectiva de mercado.

A subsistência desta indústria tem foco em uma forma de trabalho eficaz propondo recursos que irão gerar maior produtividade com menor custo de fabricação sem perder a qualidade exigida pelo mercado. A figura 1 apresenta uma locomotiva de carga que utiliza um par de vigas do tipo “I”, as quais são objeto principal deste estudo. Estas vigas são utilizadas como base estrutural da Locomotiva.

Figura 1 - Locomotiva de Carga Modelo AC-44i.



Fonte: Banco de Imagens da Associação Nacional dos Transportes Ferroviários¹.
Disponível em: <<https://www.antf.org.br/banco-de-imagens/>> Acesso em Fev. 2019.

A diversidade dos processos de soldagem aliada a gama de variáveis inerente a cada processo permite realizar uniões permanentes, de forma a obter qualidade e exigência mecânica necessária a cada produto. Pode-se soldar, por exemplo, uma dada junta metálica utilizando diferentes processos e parâmetros de soldagem, e no final é possível obter resultados satisfatórios para ambos os processos.

A soldagem a arco submerso se apresenta como alternativa competitiva, por ser um processo mecanizado e fornecer cordões de solda de alta qualidade, além da alta produtividade em função da sua elevada taxa de deposição.

Neste trabalho pretende-se realizar testes para construção de um procedimento com os melhores parâmetros de soldagem para fabricação de uma viga metálica de grande porte, que é utilizada para fabricar a plataforma de uma locomotiva, que por sua vez é a base para o início de montagem de uma locomotiva. Atualmente, esta viga é fabricada pelo o processo de laminação a quente, e a proposta deste estudo é demonstrar que a viga soldada pode oferecer as características inerentes e necessárias para a funcionalidade do produto.

2 – OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aprimorar um procedimento de soldagem de uma viga perfil I por meio da variação de alguns parâmetros de soldagem para o aço ASTM A572 grau 50, fabricada pelo processo de soldagem SAW.

2.2 - Objetivos específicos

- Realizar soldas variando parâmetros de corrente e velocidade nos passes de soldagem.
- Verificar a geometria do cordão de solda sobre chapas por ensaio de macrografia (penetração, reforço, largura do cordão de solda e zona termicamente afetada (ZTA)).
- Verificar o dimensional do cordão de solda da viga por ensaio de macrografia (penetração, perna, garganta e perfil do cordão de solda).
- Avaliar as propriedades mecânicas por meio de ensaio de microdureza Vickers.
- Realizar análise metalográfica das soldas, visando identificação das microestruturas.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

A soldagem é um processo de fabricação amplamente utilizado pela indústria e é indispensável na concepção de uma variedade de produtos, tais como fabricação de locomotivas, vagões, veículos rodoviários, aviões e veículos espaciais, estruturas metálicas, reatores nucleares e periféricos, escavadeiras de mineração, caminhões fora de estrada, prédios, oleodutos, gasodutos, plataformas marítimas, navios, pontes, trocadores de calor, componentes eletrônicos, utilidades domésticas e etc. Ainda conforme Marques, Modenesi e Santos (2012), a soldagem é o mais relevante processo industrial de fabricação de peças metálicas e ainda tem um papel relevante no reparo de peças que sofrem desgaste e que são recuperadas por soldagem através da aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas.

De acordo com diversas literaturas da área, denomina-se soldagem ao processo que proporciona a união de metais e não metais, utilizando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão e com ou sem o uso de material de adição, de forma assegurar a junta soldada a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas. A figura 2 mostra a soldagem utilizando o processo arco submerso, em uma de suas variações, o *Tanden arc*, que é muito utilizado na indústria com objetivo de aumento de produtividade e deposição. Este possui dois ou mais arames alimentados simultaneamente, montados um após o outro, com arco e fontes distintas.

Figura 2 - Processo Arco submerso tandem arc com seis arames.



Fonte: https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/produtividade_soldagem.cfm.

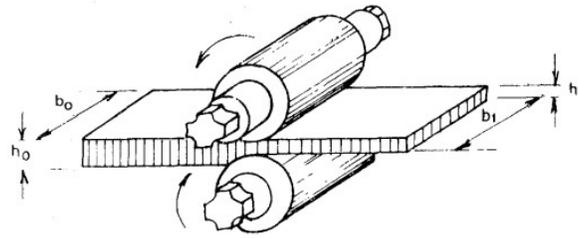
3.2 Processo de laminação

É um processo de conformação mecânica que consiste na redução da seção transversal de um metal na forma de barra, lingote, placa, fio, tira, etc., passando por cilindros laminadores, os quais devem possuir uma distância entre eles menor que a espessura inicial da peça a ser laminada. Conforme Dieter (1988) é um dos mais utilizados processos de metalurgia, com alta produção e controle rigoroso do produto final.

Ao passar entre os cilindros, o metal sofre deformação plástica, a espessura é reduzida e o comprimento e a largura são aumentados. (CHIAVERINI, 1986, p. 58).

A passagem do material é forçada entre um conjunto de cilindros por várias vezes e diminuindo-se a distância entre os cilindros, entre cada passe, desta forma o material sofre deformação plástica, a espessura é reduzida e o comprimento e a largura são aumentados, conforme figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática em perspectiva, do processo de laminação.



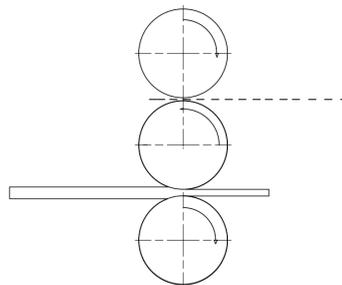
Fonte: Chiaverini (1986, p.59).

A laminação ainda pode ser classificada como a quente e a frio, onde está irá depender da temperatura de trabalho do produto, que poderá ser acima ou abaixo da temperatura de recristalização do metal.

Conforme Araujo (2005) a função dos laminadores primários ou de desbaste é inicialmente transformar os lingotes em produtos semi-acabados como placas, tarugos ou blocos, já os laminadores acabadores irão promover a forma final, como perfilados, trilhos, tubos, etc.

Ainda de acordo com Araujo (2005) a cadeira de laminação do tipo Trio é bastante utilizada na laminação de barras e perfis, difere da laminação de planos, pois a seção transversal do material é reduzida em duas direções, conforme figura 4.

Figura 4 - Laminador Trio.



Fonte: Próprio Autor, 2017

Ainda conforme Dieter (1988) barras de seção transversal circular ou hexagonal e perfis estruturais como vigas em I, calhas e trilhos ferroviários são produzidos em alta quantidade pelo processo de laminação a quente com laminadores ranhurados, Conforme Monteiro (2013) a conformação do processo de laminação a quente ocorre com temperaturas de trabalho relativamente altas, entre 1000 e 1200°C, onde é possível verificar a recristalização que ocorre no aço durante a deformação,

sendo este processo necessário para minimizar o possível encruamento, fenômeno relacionado com a transformação mecânica com grandes reduções. A laminação a quente permite uma redução elevada de carga no processo, pois a resistência mecânica do aço é menor a altas temperaturas, e conseqüentemente, deforma mais que na laminação a frio.

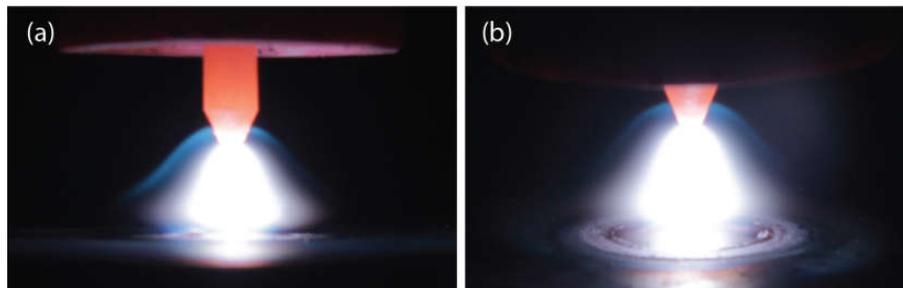
3.3 Processos de Soldagem

Existe uma infinidade de processos de soldagem, os quais podem ser divididos pelo o tipo de fonte de energia a ser utilizada, o tipo de proteção e pela natureza de união. Conforme Wainer, Brandi e Mello (2011) os tipos de fonte de energia utilizadas nos processos de soldagem são mecânica, química, elétrica e radiante.

Alguns processos de soldagem não utilizam nenhum tipo de proteção, como por exemplo, o processo de soldagem por explosão, por atrito, por ultrassom, por ponto etc. Já para os processos que utilizam proteção, esta tem um papel importantíssimo no resultado da soldagem. As proteções utilizadas nestes processos podem melhorar a estabilidade do arco e transferência de metal, melhorar a molhabilidade e fluidez da poça de fusão, formar escória nas temperaturas de soldagem, proteger o material aquecido da contaminação atmosférica, etc. Os tipos de proteção podem ser a vácuo, gás inerte, gás e fluxo.

A natureza de união dos processos de soldagem pode ser classificada em dois grandes grupos, considerando o método pelo o qual ocorre a soldagem: soldagem por pressão ou por deformação e soldagem por fusão. Dentre os processos por fusão a arco têm-se os seguintes destaques quanto à utilização na indústria: SMAW (Shielded metal arc welding), FCAW (Flux-cored arc welding), GTAW (Gas tungsten arc welding), GMAW (Gas metal arc welding), PAW (Plasma arc welding), SAW (Submerged arc welding). Todos estes processos citados anteriormente utilizam o arco elétrico como fonte térmica para obter a fusão necessária à união. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p.51) “O arco elétrico consiste em uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, estabelecida entre o metal de base e o metal de adição, produzindo energia térmica suficiente para a fusão localizada das peças a serem unidas”. A figura 5 apresenta o aspecto do arco elétrico na soldagem.

Figura 5 - Aspecto do arco elétrico na soldagem (a) GTAW e (b) destaque para a poça de fusão.

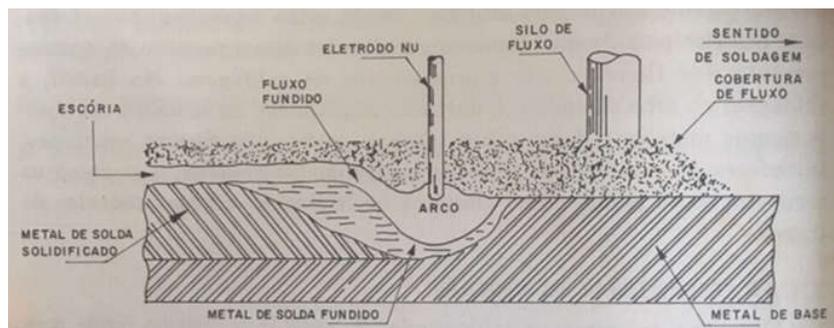


Fonte: Voigt, Louise (2017).

3.4 Soldagem a arco submerso

O processo de soldagem a arco submerso (SAW) é normalmente automático, onde as movimentações são mecanizadas e apenas controladas pelo operador. O arco elétrico é estabelecido entre um arame (eletrodo) e o metal de base (peça). Este arco é encoberto por uma camada de fluxo, que irá exercer um importante papel de proteção e juntamente com o metal de base e de adição, determinará as propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas do cordão de solda. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o fluxo irá proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica, fornecer elementos de liga para o metal de solda, estabilizar o arco, e formar a escória que irá influenciar no aspecto e formato do cordão de solda. A figura 6 ilustra este processo de soldagem.

Figura 6 - Soldagem a Arco Submerso (Esquemático).



Fonte: Wainer; Brandi e Mello (2011, p.134).

Conforme Da Silva (2003) durante o processo de soldagem SAW o calor produzido pelo o arco elétrico, irá fundir parte do fluxo, o metal de base e o de adição, originando a poça de fusão (escória líquida), ver figura 6. Ainda de acordo com Da

Silva (2003), a zona de soldagem fica protegida pelo fluxo escorificante, parte fundido e não fundido. O eletrodo está a uma pequena distância da poça de fusão e o arco elétrico se desenvolve nesta posição. O eletrodo se desloca ao longo da junta e o fluxo fundido sobrenada e se divide da escória líquida, formando assim a escória solidificada. O metal de solda que possui ponto de fusão mais elevado que a escória se solidifica e a escória permanece fundida. Neste instante a escória irá proteger o metal de solda que estará suscetível ao nitrogênio e oxigênio da atmosfera, pois tais elementos podem prejudicar as propriedades da junta soldada devido à facilidade destes na formação de óxidos e nitretos. Conforme LI et. al. (2017) um dos fenômenos mais característicos da soldagem a arco é a transferência de metal fundido pelo arco proveniente do arame para poça de fusão, onde este fenômeno possui influência direta na aparência e a qualidade da solda.

A junção entre os parâmetros de soldagem como corrente elétrica e tipo, tensão do arco e velocidade originam o heat input (calor cedido à junta), que na soldagem SAW é altamente influenciada por altas temperaturas.

É importante o conhecimento durante a soldagem e também no que diz respeito ao controle de temperatura por interpasse, a fim de minimizar o risco, por exemplo, de fissuração por hidrogênio para o aço carbono, aço carbono-manganês e aço ferrítico. Também conforme POLIDO, et al. (2005) o volume de material afetado pelo expressivo aumento de temperatura e que se encontra próxima da poça de fusão é chamada de zona termicamente afetada (ZTA), onde normalmente as propriedades mecânicas do metal são críticas.

De acordo com CARY e HELZER (2013) a taxa de deposição deste processo é superior que nos demais processos de soldagem a arco. Quatro fatores controlam a taxa de deposição do processo SAW, sendo eles, polaridade, stickout, componentes químicos no fluxo e arames adicionais. Como o arco elétrico fica completamente coberto pelo o fluxo, este não é visível, e por este fato, a soldagem se desenvolve sem radiação, faíscas e sem respingos, ou seja, o arco é fechado, e por estes e outras fatores oferece alta produtividade.

Cunha, T. e Ribeiro (2018) também destacam as características marcantes do processo SAW, que está em seu elevado rendimento de deposição e fusão, excelentes acabamento do cordão e poucas perdas por projeções e respingos.

Como possui baixa perda de calor para o meio, conseqüentemente tem um rendimento térmico próximo a 100%. Por possuir um alto aproveitamento de calor do arco elétrico, não é necessário refrigerar a tocha de soldagem, mesmo se empregada em elevados valores de corrente de soldagem. Como trabalha com altos valores de corrente e densidades, proporciona a este processo, alta taxa de deposição, muitas vezes não verificadas em outros processos de soldagem.

Ainda sob o aspecto de produtividade, de acordo com JORGE et. al. (2015) o processo SAW possui uma grande vantagem com relação aos demais processos, que é justamente uma melhor eficiência e taxa de deposição, bem como a possibilidade da realização de soldagens mecanizadas, eliminando desta forma a dependência de mão-de-obra especializada.

O processo de soldagem com arco submerso pode ser semi ou totalmente automático, e em ambos os casos o eletrodo é alimentado mecanicamente a partir de um rolo para pistola ou cabeçote de soldagem, à medida que vai sendo fundido. O fluxo é alimentado independentemente, caindo por gravidade imediatamente à frente do eletrodo ou de forma concêntrica em relação a ele (WAINER, BRANDI, MELLO 2011, p. 134).

Conforme Modenesi e Marques (2006, p. 23) o processo SAW apresenta vantagens peculiares, como:

- altas velocidades de soldagem e taxas de deposição;
- produz soldas uniformes e de bom acabamento superficial;
- ausência de respingos e fumos;
- dispensa proteção contra radiação devido ao arco não visível;
- facilmente mecanizado;
- elevada produtividade.

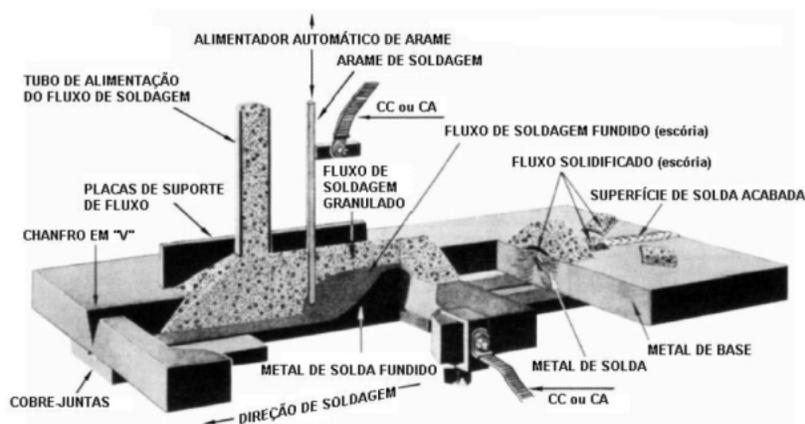
Uma particularidade deste processo é que ele é limitado às posições plana e filete horizontal. O aporte térmico elevado pode prejudicar propriedades da junta e a produtividade do processo pode ser prejudicada na soldagem multipasses, pois será necessário interromper o processo para a retirada de escória entre passes.

O processo SAW aplica-se a soldagem de aços carbonos e ligados, níquel e suas ligas. É utilizado para soldagem de componentes estruturais de maior porte, recobrimento, manutenção e reparo. Conforme Cunha, L. (1989) o uso do processo SAW necessita de cuidado especial, no diz respeito à diluição, pois como neste caso é alta, existe maior participação do metal base e ainda utilizando a polaridade inversa (+), seria importante que resíduos como fósforo e enxofre presentes no material, estejam em quantidades mínimas possíveis. Como o volume de escória é alta devido ao processo, elementos como manganês e silício, podem ser inseridos na poça de fusão. Sobre questões metalúrgicas deste processo, devido ao elevado aporte térmico tem-se o prejuízo a questão microestrutural.

3.4.1 Equipamentos da Soldagem SAW

Conforme Machado (1996) o arame sólido fornecido em bobinas é tracionado por rolos, onde é energizado ao passar pelo tubo de contato. Este é conduzido pela tocha de soldagem. À frente do arco elétrico o tubo de alimentação deposita fluxo do reservatório na junta a ser soldada, sendo viável aspirar a porção não fundida do fluxo, após a solda ocorrer. Um conjunto de controles como regulagem da tensão, corrente, devem estar inseridos na máquina, assim como, um sistema para início do arco e regulagem da velocidade de deslocamento. As fontes utilizadas são do tipo transformador-retificador ou motor gerador (figura 7).

Figura 7 - Equipamento para a Soldagem ao Arco Submerso.



Fonte: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1_apostilaarco_submerso.pdf.

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2009), neste processo de soldagem outros dispositivos podem ser utilizados, seja para deslocamento da tocha ou deslocamento da peça a ser soldada. Sensores ópticos ou eletrônicos são bastante usuais no que diz respeito a posicionamento da tocha em relação à junta. Ainda sistema de reutilização de fluxo pode ser adaptado ao equipamento de soldagem SAW.

3.4.2 Consumíveis

No processo a arco submerso são utilizados basicamente dois consumíveis, os arames e fluxos de soldagem. A AWS (*American Welding Society*) A5.17 especifica os consumíveis da soldagem a arco submerso de aço carbono e A5.23 consumíveis de soldagem SAW para aço de baixa liga. Nestas normas são abordadas todas as especificações de fabricação para estes arames e fluxos do processo SAW.

Os consumíveis possuem um papel fundamental nas propriedades mecânicas do cordão de solda, claro que em conjunto com metal de base e controle das variáveis de soldagem.

De com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), no processo SAW os arames podem ser sólidos, tubulares ou fitas e podem ser viabilizados na forma de carretéis e bobinas em diferentes dimensões.

Os fluxos utilizados no processo de soldagem SAW são fabricados para suportar altas correntes de soldagem, que é uma característica deste processo. Eles são compostos por uma mistura de óxidos e outros minerais e têm como principal função, proteger a poça de fusão contra o ar atmosférico, fornecer elementos desoxidantes e ainda tem a função de alterar a composição química da solda. Como garantem uma excelente concentração de calor, por consequência irá produzir uma alta penetração. Quanto ao processo de fabricação, é classificado como do tipo aglomerado ou fundido. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2011, p. 135).

Quanto à influência sobre a composição química do metal depositado, os fluxos podem ser classificados como neutros, ativos ou ligados. Onde os fluxos neutros não irão produzir mudanças químicas significativas no metal de solda e são normalmente utilizados para soldagem multipasses. Os ativos contêm pequenas

quantidades de manganês e silício, já os ligados adicionam outros elementos além do manganês e silício.

De forma geral, o fluxo é selecionado com base nas propriedades mecânicas requeridas para o metal de solda. O arame deve ser selecionado em conjunto com o fluxo, onde esta combinação irá fornecer as propriedades mecânicas desejadas.

3.5 - Efeitos da variação de alguns parâmetros de soldagem

Assim como em outros processos de soldagem, as variáveis de soldagem do SAW também irão influenciar no resultado da soldagem. Neste processo, a corrente elétrica é proporcional à taxa de deposição e de penetração, quanto maior a corrente maior estas duas características, ou seja, a corrente elétrica possui relação direta com a taxa de deposição, profundidade de penetração, reforço e diluição. Conforme Wainer (2011), se todos outros parâmetros fossem mantidos constantes e somente a corrente fosse elevada, a penetração e a taxa de deposição aumentariam. Para a soldagem SAW, o tipo de corrente mais usual é a corrente contínua com polaridade reversa CCPR (+), ainda podendo ser utilizada a corrente contínua com polaridade direta CCPR (-) e a corrente alternada.

Ainda de acordo com Wainer, Brandi e Mello (2004), a tensão irá influenciar no formato da seção transversal do cordão de solda, bem como aparência da solda (aspecto visual externo). Possui pouco efeito sob a taxa de deposição, influi diretamente no comprimento do arco. Um aumento da tensão com os demais parâmetros fixados irá gerar cordões mais largos e planos, aumento do consumo de fluxo. Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a tensão excessivamente alta aumenta a dificuldade para remoção de escória e ainda formarem um cordão em forma de chapéu, sujeitos a trincas.

Na velocidade de soldagem (as variáveis, dimensão do filete de solda e penetração) são influenciadas. Ao fixar os demais parâmetros e elevar excessivamente a velocidade, de acordo com Wainer (2011) diminui ação de caldear e pode produzir mordeduras, apagamento de arco, surgimento de porosidades e trincas. Assim como uma velocidade excessivamente baixa, pode ter influência em um cordão em forma de chapéu, sujeitos a trinca, conforme mencionada acima.

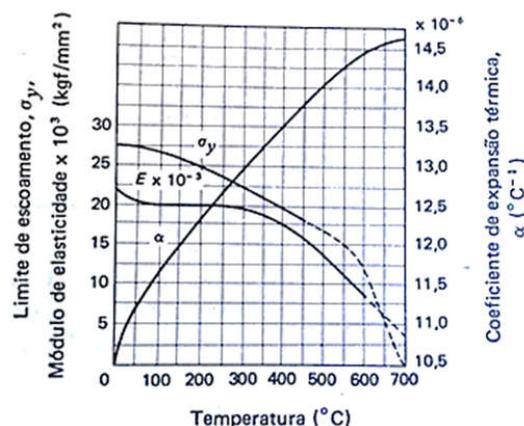
3.6 Tensões residuais e distorções devidas à soldagem

A soldagem é amplamente utilizada nos processos de fabricação industrial, mas, fatores como distorções, empenos e tensões não podem ser negligenciadas, precisam ser corrigidos e tratados quando possível previamente à soldagem. Sendo a soldagem um processo de aquecimento localizado e intenso na junta, inevitavelmente irão ocorrer distorções na peça ou produto soldado, e conseqüentemente tensões residuais (internas) também irá se manifestar no produto soldado.

Durante a soldagem ocorrem expansões térmicas nas regiões aquecidas, e parte delas são restringidas pelas regiões frias, gerando campos de tensões bastante complexos. As deformações resultantes são então acompanhadas por plastificação localizada. (Okumura; Taniguchi, 1982, p.153)

De acordo com Okumura e Taniguchi (1982) o metal é aquecido pontualmente e também ao mesmo tempo é resfriado devido a transferência de calor, ocasionando as contrações e expansões térmicas na peça soldada, onde as tensões de soldagem são ocasionadas pelas áreas frias próximas a junta soldada. Ocorre a deformação plástica na área da soldagem, onde, o limite de escoamento do metal baixa e as tensões de restrição aumentam a altas temperaturas. A figura 8 ilustra este esquema.

Figura 8 - Variação do limite de escoamento, do módulo de elasticidade e do coeficiente de expansão térmica de aços com a temperatura.



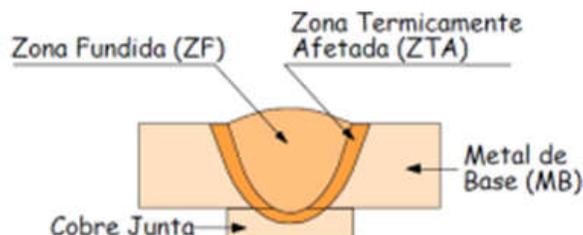
Fonte: Okumura e Taniguchi (1982, p.154).

3.7 – Metalurgia da soldagem

As temperaturas usadas nos processos de soldagem, bem como, a variação dos ciclos térmicos de soldagem, ocasionados por uma elevada densidade de energia em uma pequena área de material, são características presentes nas transformações metalúrgicas do processo de soldagem.

Conforme Lancaster (1999, *apud* OLIVEIRA, Fabiano Farias de, 2015, p.30) junta soldada possui basicamente três regiões principais, chamadas de região da zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base (MB). A figura 9 apresenta esquematicamente essas três regiões de uma solda.

Figura 9 - Representação esquemática das regiões de uma soldagem.



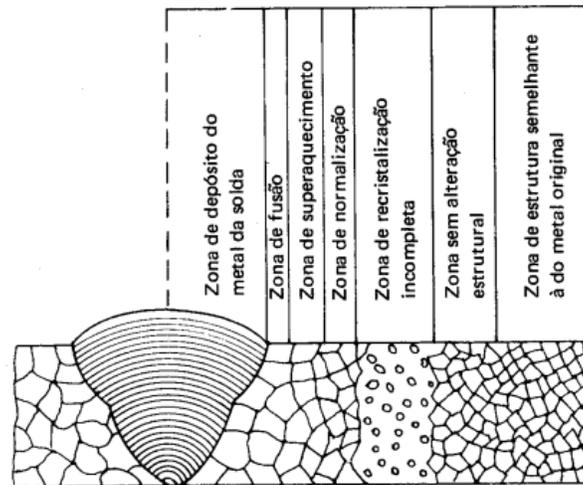
Fonte: Modenesi, (2009)

A ZTA é a região mais próxima da ZF, e devido ao rápido aquecimento e resfriamento nesta área, ocorre à modificação da estrutura do metal. Nesta região não irá ocorrer variação na composição química do metal de base.

Conforme Wainer (2011) a microestrutura adquirida para a zona fundida terá influência dos seguintes fatores dependentes: teor e concentração de elementos de liga; composição química e distribuição de tamanho de inclusões não-metálicas, microestrutura de solidificação, tamanho do grão da austenita anterior e ciclo térmico de soldagem.

Conforme Chiaverini (1986), quando a distância do metal depositado aumenta, é verificado menor influência na estrutura do material, considerando a utilização de menores temperaturas. A figura 10 representa esta transformação nas áreas de solda.

Figura 10 - Representação esquemática dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem em uma junta de solda.

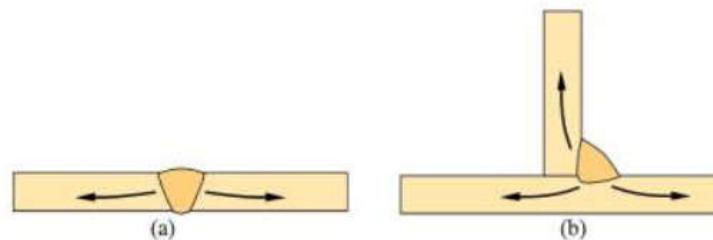


Fonte: Chiaverini (1988, p.166).

Conforme Marques, Modenesi e Santos (2012), diversas variáveis de uma operação de soldagem podem afetar o fluxo de calor na peça e, portanto, os ciclos térmicos associados. A condutividade térmica é influenciada, pois, quanto menor a condutividade de um material, a dissipação de calor na junta irá ocorrer de forma lenta, já para materiais de elevada condutividade, necessitam, por exemplo, utilizar um pré-aquecimento para obtenção de uma solda com fusão adequada.

Com relação à espessura, quanto mais espessa a junta, mais rapidamente esta tenderá a se resfriar durante a soldagem. Fazendo um paralelo com a geometria da junta, esta irá influenciar a velocidade de resfriamento de acordo com o tipo de junta. Esta velocidade será maior na soldagem de juntas em T (possui 3 caminhos) do que em juntas de topo (possui 2 caminhos), a figura 11 ilustra este escoamento de calor nas juntas mencionadas.

Figura 11 - Dissipação de calor durante a soldagem de juntas de (a) topo e de (b) ângulo (em T).



Fonte: Marques, Modenesi e Santos (2012, p.3.21).

Ainda conforme Marques, Modenesi e Santos (2012), a energia de soldagem é bastante inerente ao processo de soldagem. Desta forma, a temperatura de pré-aquecimento pode diminuir a velocidade de resfriamento. Além do pré-aquecimento pode-se fazer o uso do pós-aquecimento que também poderá ainda mais contribuir para diminuição da velocidade de resfriamento e conseqüentemente minimizar problemas na soldagem devidos a resfriamentos bruscos.

3.8 Vigas soldadas

A utilização de perfis soldados ou até mesmo de perfis laminados, porém emendado por solda tem crescido espantosamente, na área da construção civil e indústria mecânica. Conforme Borges e Gomes (2016) apesar do Brasil possui escassez de mão de obra qualificada a utilização de estruturas metálicas nas edificações tem aumentando consideravelmente. Conforme CARY e HELZER (2013) o processo SAW é amplamente utilizado para fabricação de produtos de caldeiraria pesada como vasos de pressão, tanques, reatores nucleares, caldeiras, vasos químicos dentre outros, além de treliças e vigas. No caso das vigas o processo é utilizado para soldagem de abas e alma.

Ainda conforme Da Silva (2003) o mercado mundial de estruturas metálicas está em constante desenvolvimento e as usinas siderúrgicas do Brasil também estão trabalhando em soluções de desenvolvimento de estruturas metálicas, a fim de possibilitar um decréscimo do déficit habitacional, caminhando para uma melhor organização do espaço urbano das cidades. Conforme Cunha, T. e Ribeiro (2018) a utilização do processo de soldagem SAW na construção pesada como em estaleiros, mineradoras, siderúrgicas, fábricas de perfis e estruturas metálicas é algo bastante usual.

4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Descrição Geral do Trabalho

A metodologia experimental deste trabalho foi dividida em três etapas conforme apresentado na figura 12. A primeira etapa consistiu na execução da soldagem preliminar da viga perfil I, onde foram soldadas quatro vigas, sendo executados três passes de soldagem em uma junta em ângulo com chanfro reto, em cada lado da viga de perfil I, ou seja, nos quatro lados, conforme estabelecido no projeto de fabricação. Os parâmetros de soldagem iniciais utilizados foram os parâmetros que já estavam definidos em uma especificação do processo de soldagem (EPS) qualificada conforme norma AWS D1.1. Com esta etapa foi possível obter uma base de dados que foi coletada durante cada passe de soldagem. Após tratamento destes dados, estes foram utilizados na segunda etapa deste trabalho, chamada de soldagem em corpos de prova.

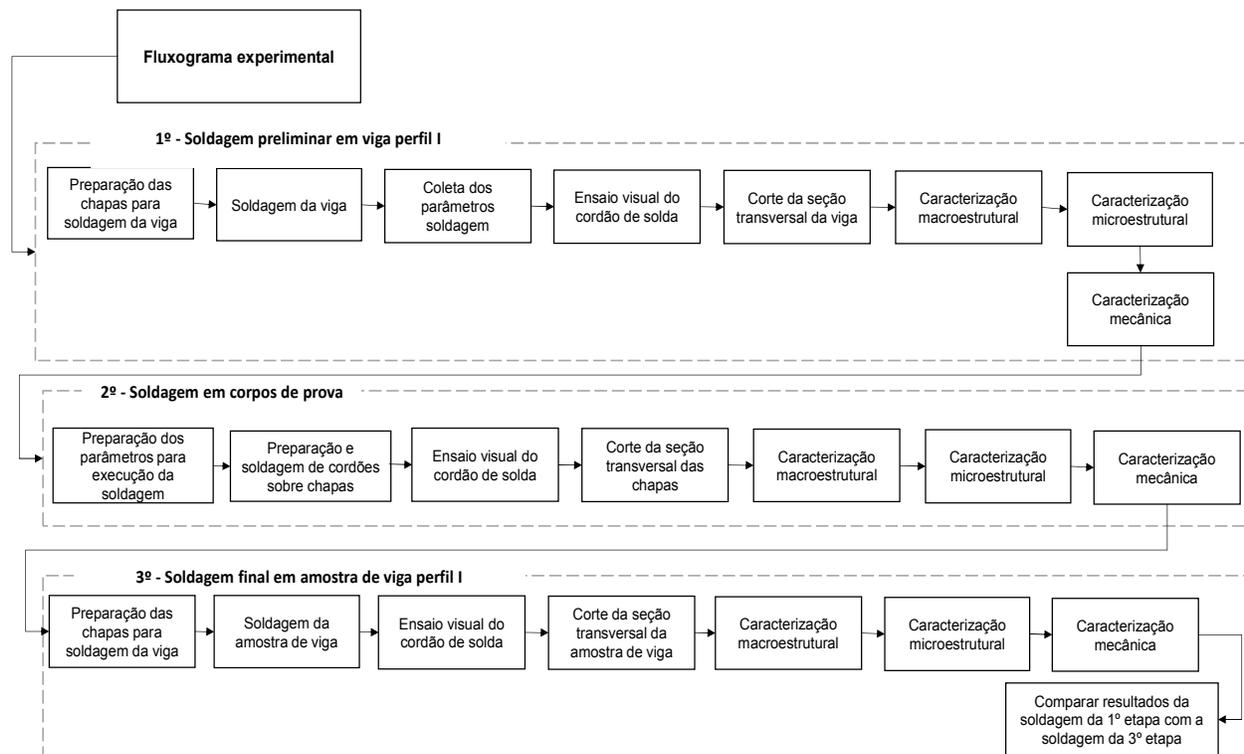
Na etapa de soldagem dos corpos de prova, foram realizadas soldas de cordões sobre chapas. Como em cada junta da viga são realizados 3 filetes de solda (3 passes), nesta etapa foram feitos vinte e sete cordões, que representaram estes passes, sendo soldados nove cordões para cada passe, variando alguns parâmetros de soldagem. Foram utilizados dados mínimos, médios e máximos da soldagem de cada passe, e a partir destes dados iniciais foi possível construir uma faixa de parâmetros em três níveis de corrente. Para validação dos resultados, foi soldado uma réplica para cada cordão. O intuito desta etapa foi selecionar os melhores parâmetros de soldagem por passe para serem utilizados na terceira e última etapa deste trabalho, chamada de soldagem final em amostra de viga perfil I.

Nesta terceira etapa, foram escolhidos os três melhores cordões de solda, juntamente com os parâmetros de soldagem utilizados para a execução dos cordões. Esta escolha foi feita com base nos melhores resultados dos ensaios de macrografia, micrografia e dureza. Após selecionar os três melhores cordões que representariam os três novos passes de soldagem (raiz, enchimento e acabamento), foi soldada uma junta em ângulo com chanfro reto, em cada lado de um perfil I. Ao

final foi feita uma comparação desta última soldagem com a soldagem realizada na primeira etapa. A posição de soldagem para todas as etapas foi a posição plana (1F). O fluxograma da figura 12 apresenta de forma detalhada todas as etapas para realização dos testes experimentais deste trabalho.

Figura 12 - Procedimento experimental

Fonte: Próprio Autor, 2019.



As figuras 13, 14 e 15 representam, respectivamente, a soldagem preliminar da viga de perfil I, a soldagem nos corpos de prova e a soldagem final na amostra de viga perfil I.

Figura 13 – Representação da soldagem preliminar em viga perfil I.



Fonte: Próprio Autor, 2017.

Figura 14 - Representação da soldagem de cordões em chapas.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Figura 15 – Representação da soldagem final em uma amostra de viga perfil I.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.2 Materiais e Consumíveis

Para a realização da soldagem da viga com perfil em “I” e dos corpos de prova foram utilizadas chapas do aço ASTM A572 grau 50. A tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas deste aço, e a tabela 2 apresenta a composição química especificada.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A572 grau 50.

Limite de resistência à tração, ksi (Mpa) min.	65 (450)
Limite de escoamento, ksi (Mpa) min.	50 (345)
Alongamento em 2 polegadas (50 mm) % min.	21

Fonte: Adaptado de standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel, for general application ASTM A572/A572M-15.

Tabela 2 - Requisitos de Composição Química do aço ASTM A572 Grau 50 - Chapas até 1 1/2".

Carbono máx.% em peso	Manganês máx.% em peso	Fósforo máx. % em peso	Enxofre máx.% em peso	Silício máx.% em peso
0.23	1.35	0.03	0.03	0.40

Fonte: Adaptado de standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel, for general application ASTM A572/A572M-15.

A tabela 3 apresenta a média dos valores das propriedades mecânica coletados nos certificados de materiais de todas as chapas utilizadas para fabricar as vigas soldadas com perfil I, referente à primeira etapa da soldagem e também dos corpos de prova, referente a segunda etapa da soldagem.

Tabela 3 - Média dos dados coletados nos certificados dos materiais utilizados.

Propriedades Mecânicas ASTM A572 Grau 50	
Limite de resistência, à tração, Mpa	566
Limite de escoamento, Mpa	442
Alongamento em 2 polegadas (50 mm) % min	32

Fonte: Próprio Autor, 2017.

A tabela 4 apresenta a média dos valores de requisitos químicos dos mesmos certificados citados acima.

Tabela 4 - Média dos dados coletados nos certificados dos materiais - Chapas até 1 1/2".

Carbono em peso	Manganês em peso	Fósforo em peso	Enxofre em peso	Silício em peso
0.16	1.40	0.022	0.007	0.32

Fonte: Próprio Autor, 2017.

Conforme estabelecido na norma ASTM A572/572M (2015), para cada redução de 0,01 pontos percentual abaixo do máximo de carbono especificado, é permitido um aumento de 0,06 pontos percentual de manganês acima do máximo especificado, até um máximo de 1,60%, sendo assim, todos os valores obtidos nas médias dos certificados para construção das tabelas 3 e 4 estão de dentro dos padrões de especificação da Norma.

4.2.1 Arame-Eletrodo e Fluxo – Processo SAW

Os consumíveis utilizados para realização da soldagem estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Consumíveis utilizados para executar a soldagem.

Variáveis	Nomenclatura
Arame	AWS A5.17 EM12K
Diâmetro do Arame	3,2 mm
Fluxo	AWS A5.17 F7A5-EM12K
Tipo do Fluxo	Aglomerado – Neutro

Fonte: Próprio Autor, 2017.

De acordo com a especificação do fabricante, o consumível AWS A5.17 EM12K é um arame sólido cobreado, acalmado com médio teor de manganês. É geralmente combinado com fluxos neutros ou ativos. O fluxo aglomerado neutro básico AWS A5.17 F7A5-EM12K é utilizado especialmente para aplicações de alta responsabilidade, soldagem em mono ou multipasses de ações de média e alta resistência. É aplicado em construção navais, plataformas marítimas, vasos de pressão, pontes e soldas multipasses independentes da espessura do metal de base.

4.3 Soldagem preliminar em viga perfil I

Na primeira etapa foi executada a soldagem em quatro vigas, sendo três passes para cada junta. Como cada viga possui quatro lados, ao final, dezesseis lados (juntas) foram soldadas, obtendo desta forma dezesseis filetes para cada passe. A partir destes dados foi possível conseguir os parâmetros de soldagem que seriam

utilizados na da segunda etapa, que é a soldagem dos corpos de prova. Os parâmetros de soldagem utilizados nesta etapa são de uma especificação de soldagem qualificada pela norma AWS D1.1.

4.3.1 Preparação das chapas para soldagem da viga

Inicialmente as chapas foram cortadas com auxílio de uma máquina de corte a plasma nas dimensões de projeto para montagem das abas e alma. A preparação do metal de base antes da soldagem foi feita utilizando as técnicas de esmerilhamento e escovamento, com intuito de retirar impurezas, carepas de laminação a fim de prover uma área limpa para início da soldagem. A figura 16 apresenta, respectivamente, o corte e o acabamento destas chapas após realização das mesmas.

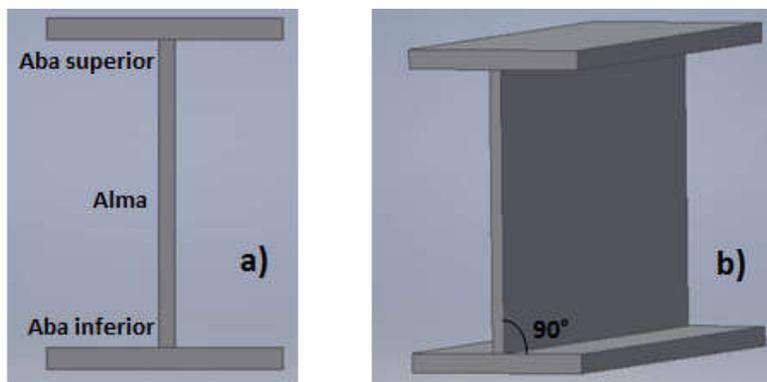
Figura 16 – Corte e preparação das chapas a serem soldadas respectivamente.



Fonte: Próprio Autor, 2017.

Para a construção da viga em “I” soldada, foram utilizadas duas chapas para formação das abas, denominadas de aba superior e aba inferior, sendo que estas abas possuem o mesmo tamanho e espessura superior a uma polegada. No centro, de forma análoga, tem-se a alma da viga que possui uma espessura menor que a espessura das abas, onde a relação entre abas e alma é de aproximadamente de 1.66. A figura 17a apresenta o perfil da viga, já a figura 17b mostra o ângulo reto formado entre as abas e a alma da viga.

Figura 17 - a) Perfil da junta e b) chanfro reto em I.

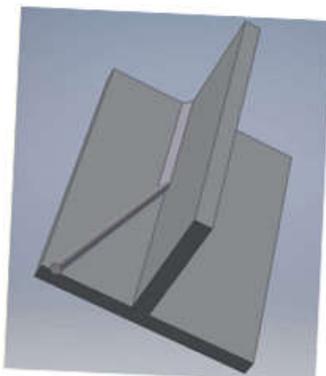


Fonte: Próprio Autor, 2017.

4.3.2 Soldagem da viga

A soldagem foi executada na posição 1F em uma junta de ângulo chanfro reto em “I”, conforme apresentado na figura 18. Para a execução da solda, foram realizados três filetes, sendo um passe de raiz, um passe de enchimento e um passe de acabamento. Entre as execuções dos passes de soldagem foram empregadas as técnicas de esmerilhamento e escovamento, com o objetivo de realizar a limpeza do cordão de solda. O processo de limpeza entre passes tem como principal objetivo a retirada de escória, a fim de evitar inclusões de escória, pois quando deixadas entre um passe e outro funcionam como concentrador de tensão, reduzindo assim, a resistência mecânica do conjunto.

Figura 18 - Posição plana de soldagem.

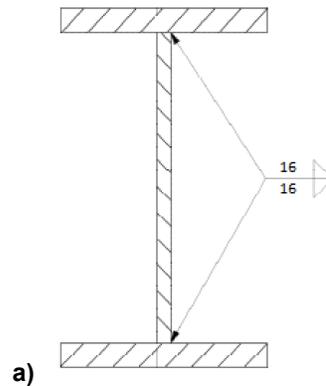


Fonte: Próprio Autor, 2017.

O filete de solda especificado em projeto para esta junta é de 16 mm de perna em ambos os lados, com tolerância $-1/32'' + 1/8''$ da medida nominal. A figura 19

apresenta a simbologia para auxiliar a execução da solda de filete.

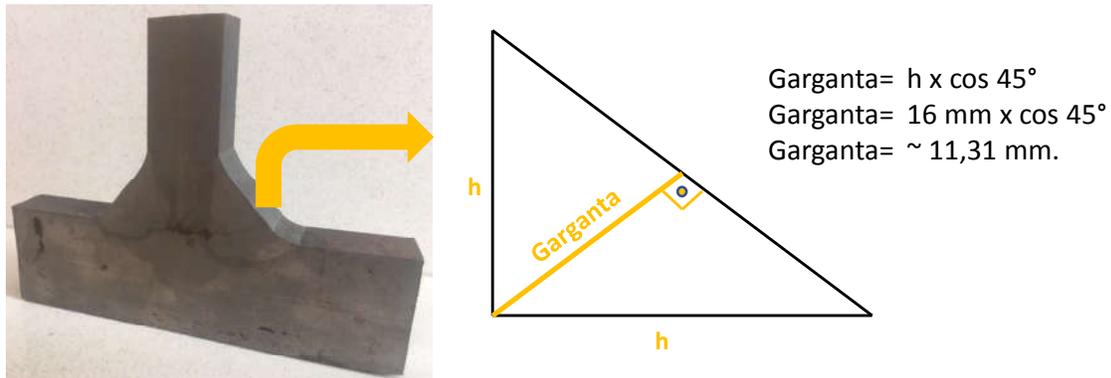
Figura 19 - Simbologia para execução da soldagem.



Fonte: Próprio Autor, 2017.

A garganta da solda calculada para este filete foi de aproximadamente 11.31mm, a figura 20 apresenta a figura e cálculo desta garganta.

Figura 20 – Representação da garganta do cordão em juntas T, com cordão de filete e cálculo.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.3.2.1 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros utilizados para a execução da soldagem preliminar em viga perfil I estão formalizados em uma especificação do procedimento de soldagem (EPS), documento qualificado conforme requisitos da norma AWS D1.1. Todos os testes para aprovação deste documento foram executados, aprovados e liberados por um inspetor de soldagem qualificado conforme exigência desta mesma norma. A

tabela 6 apresenta a faixa de parâmetros desta EPS, sendo estes os parâmetros utilizados na soldagem das vigas.

Tabela 6 - Faixa dos parâmetros de soldagem da EPS qualificada.

Polaridade	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Max Veloc. aliment. arame (m/min)	Aporte térmico max.(J/cm)
CC+	610 - 785	34 - 41	54 - 96	4,9	22.547

Fonte: Próprio Autor, 2017.

As vigas foram soldadas na posição 1F com a utilização de uma fonte retificadora com tensão constante e capacidade de corrente de até 800A. Esta fonte trabalha com uma unidade de comando para soldagem automatizada, onde esta unidade comanda simultaneamente a velocidade de avanço do arame e a velocidade de deslocamento do carro. Para possibilitar a soldagem automática ao longo do comprimento da junta, foi utilizado um pórtico posicionador, conforme apresentado na figura 21, juntamente com a fonte de soldagem e a unidade de comando.

Figura 21 - Equipamento para soldagem na posição 1F.



(a)

(b)

(c)

(a) Fonte de soldagem, (b) unidade de comando, (c) pórtico posicionador.

Fonte: Próprio Autor, 2017.

4.3.2.2 Aspectos térmicos

O comprimento total da viga soldada é de aproximadamente 11 metros, a figura 22 ilustra uma vista geral da viga soldada.

Figura 22 - Comprimento da viga em perspectiva.



Fonte: Próprio Autor, 2017.

Pelo fato do processo de soldagem SAW fornecer um elevado e localizado aporte térmico na junta, em ambos os lados, e ao longo de todo este comprimento, tensões residuais, contrações e distorções são esperadas após a soldagem. Durante a montagem foi utilizado um dispositivo que apoiava a viga e ajudava manter a linearidade entre alma e abas. Com o objetivo de minimizar as distorções esperadas para o processo em questão, travas foram colocadas ao longo da viga do lado oposto da soldagem. A Figura 23 apresenta a montagem realizada e o travamento desta viga.

Figura 23 - Medidas para minimizar distorções.



Fonte: Próprio Autor, 2017.

Para melhorar o paralelismo das abas após a soldagem, processos de desempenho foram empregados a fim de retornar as chapas para o estado inicial. Foi utilizado um maçarico de solda para aplicação direta de calor no centro do perfil em uma margem aproximada de 50 mm da região que o filete de solda foi realizado, conforme figura 24.

Figura 24 - Processo de Desempeno da Viga.

Fonte: Próprio Autor, 2017.

4.3.3 Coleta dos parâmetros de soldagem

Durante a soldagem de cada passe os parâmetros de corrente, tensão e velocidade de soldagem foram coletados. O diâmetro do arame foi o mesmo para todos os passes. O objetivo desta fase foi obter uma matriz de dados, que depois de trabalhados fossem utilizados na soldagem de corpos de prova.

4.3.4 Ensaio visual do cordão de solda

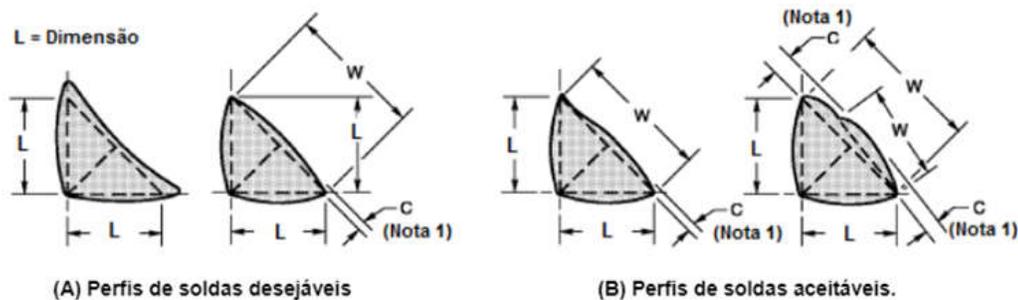
Após a soldagem, inicialmente foi realizado ensaio visual no filete de solda da viga perfil I. De acordo com Chiaverini (1986), o ensaio visual é um dos métodos não destrutivos para detectar falhas e defeitos das juntas soldadas. Primeiramente foi avaliada a presença de possíveis discontinuidades, tais como: mordeduras, porosidades, respingos excessivos, falta de fusão, trincas. Posteriormente foi realizado a medição da perna da solda e da garganta com auxílio de um gabarito para ângulo de solda de 0 á 20 mm (figura 25) e a ainda a convexidade.

Figura 25 - Gabarito de solda.

Fonte: Próprio Autor, 2018.

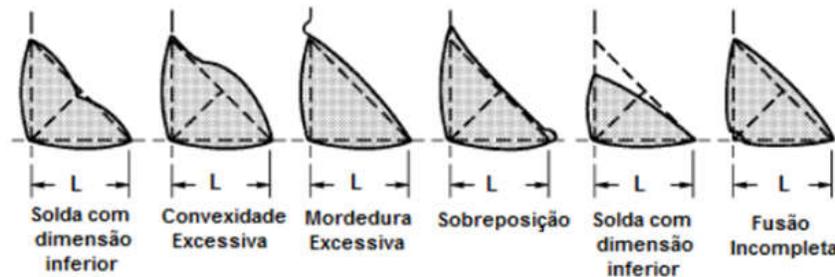
Por último, foi avaliado nesta inspeção visual o perfil do filete de solda. Conforme AWS D1.1 item 5.24, as faces das soldas de filete podem ser ligeiramente convexas, plana ou ligeiramente côncava. A figura 26 apresenta os perfis aceitáveis e inaceitáveis de um filete de solda, conforme norma AWS D1.1. Ainda a figura 26 apresenta uma tabela com os limites aceitáveis para máxima convexidade, pois, quando se encontra de forma excessiva, poderá comprometer os demais dimensionais do filete de solda.

Figura 26 - Perfis aceitáveis e inaceitáveis de um filete de solda.



Nota 1: A Convexidade "C", de uma solda ou superfície individual de um filete com dimensão "W" não deve exceder aos valores da tabela

Largura da Face da solda ou da superfície individual do filete (W)	Máxima convexidade (C)
$W \leq 8\text{mm}$ (5/16")	2mm (1/16")
$W > 8\text{mm}$ (5/16") até $W < 25\text{mm}$ (1")	3mm (1/8")
$W \geq 25\text{mm}$ (1")	5mm (3/16")



Perfis de soldas de filete inaceitáveis.

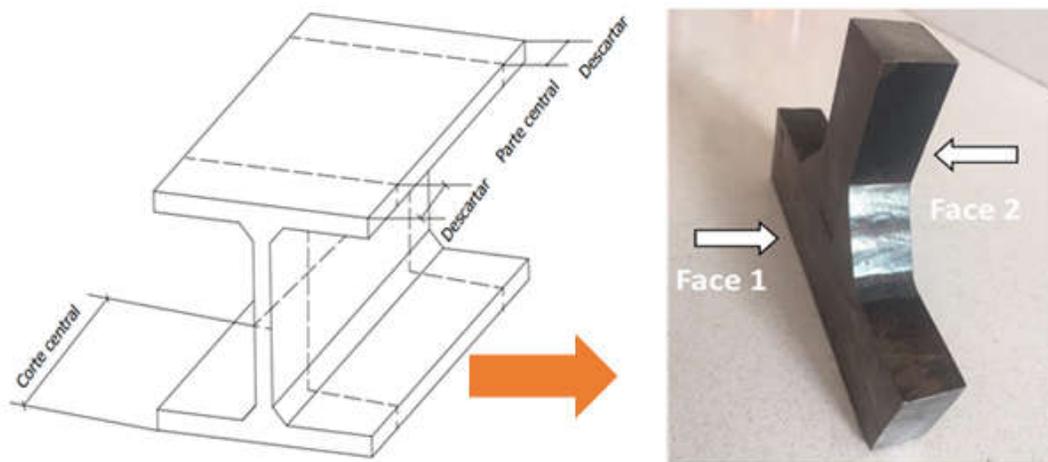
Fonte: Adaptado da norma AWS D1.1/D1.1M: 2004, (figura 5.4 do item 5.24, p. 198).

4.3.5 Corte da seção transversal da viga

Após o ensaio visual do cordão de solda, foi realizado um corte na seção transversal da viga, deixando aproximadamente 200 mm de comprimento em cada uma das extremidades da viga. O primeiro corte foi realizado com auxílio de um maçarico para retirada de dois corpos de prova de 200 mm por extremidade de viga. Logo

após, obteve-se duas amostras de aproximadamente 180 mm devido à perda de material esperada para este tipo de corte. Foi realizado outro corte com uma serra industrial onde foram desprezados 73 mm de cada extremidade, restando somente a parte central da amostra com aproximadamente 34 mm. Ao final, a alma da viga foi cortada ao meio, gerando dois corpos de prova de aproximadamente 150 mm de altura. A figura 27 ilustra este o esquema de corte e a figura 28 ilustra a forma final da amostra da viga para realização do ensaio de macrografia.

Figura 27 - Desenho esquemático de retirada de corpo de prova, destaque face 1 e face 2.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Figura 28 - Forma final da amostra da viga para ensaio.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

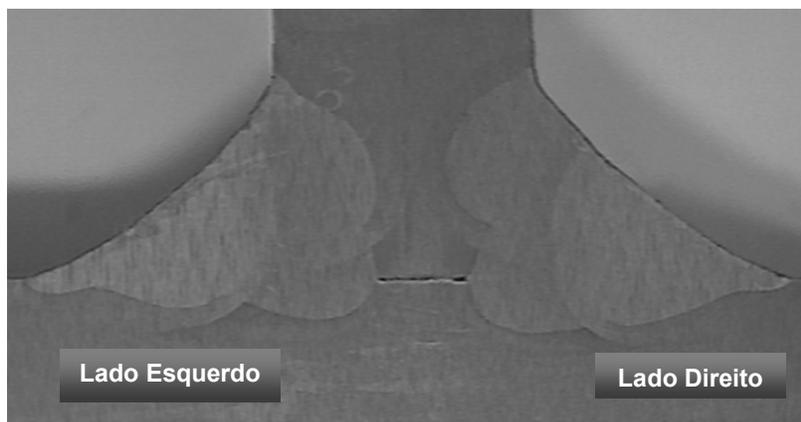
4.3.6 Caracterização macroestrutural

Para a caracterização macroestrutural das três principais regiões de soldagem:

metal de base (MB), zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA), foi realizado um corte transversal nas amostras, conforme mencionado no item 4.3.4. Como as amostras foram retiradas do meio da peça, o ensaio de macrografia foi realizado nas duas faces da amostra, as quais se denominam neste de trabalho de face 1 e face 2 (figura 27). Estas faces foram retificadas e a preparação das amostras para a caracterização macroestrutural seguiu as técnicas macrográficas convencionais estabelecidas na literatura, ou seja, lixamento da superfície a ser analisada com o auxílio de lixa d'água nas seguintes granulometrias: #240, #400, #600 e #1200 *mesh*, respectivamente.

Após o lixamento, todas as amostras foram submetidas ao ataque químico na superfície, conduzido por aplicação do reativo Nital 10% (10 ml HNO₃ (ácido nítrico) e 90 ml etanol (álcool etílico) por 10 segundos. Com as amostras atacadas, foram realizadas pelo o software Medições Electron, a medição de penetração de solda das amostras no lado direito e esquerdo, a figura 29 apresenta a macrografia de uma das faces de uma viga perfil I.

Figura 29 - Foto de uma macrografia em uma face da viga.



Fonte: Relatório de Ensaio SENAI N° 6595/2017, 2017.

4.3.7 Caracterização microestrutural

Para fazer a microscopia ótica (MO) foi utilizado o microscópio Fortel equipado com sistema de digitalização Kontrol. Foram feitas imagens com ampliações de 200X, 400X e 800X para cada região da soldagem (MB, ZTA e ZF).

Para fazer a análise no microscópio eletrônica de varredura (MEV), houve a necessidade de cortar as 3 extremidades da amostra e a espessura para adequação do tamanho do corpo de prova ao porta amostra do MEV. Ao final amostra ficou com aproximadamente 83 mm de comprimento, 44 mm de altura e 15 mm de espessura. Durante o ensaio foi utilizado uma tensão de 15kV e detecção de imagens por elétrons secundários. O equipamento de microscopia (MEV) utilizado foi do fabricante Shimadzu, modelo SSX-550 Superscan. Foram feitas imagens com ampliações de 400X, 800X e 1200X. Na sequência a figura 30 mostra a serra industrial utilizada para o corte de adequação da amostra. A figura 31 exhibe a forma do antes e depois da amostra A3 face 1 cortada para adequação ao MEV.

Figura 30 - Serra industrial utilizada para cortar as extremidades da amostra.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 31 - a) Amostra original b) amostra cortada para adequação ao microscópio MEV.



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A figura 32 mostra os microscópios utilizados na técnica de avaliação da microestrutura. A identificação dos diferentes constituintes das áreas de soldagem foi realizada segundo o sistema de classificação do Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

Figura 32 - Microscópios utilizados na técnica de avaliação da microestrutura.



(a)

(b)

(a) Microscópio óptico e (b) microscópio eletrônico de varredura.

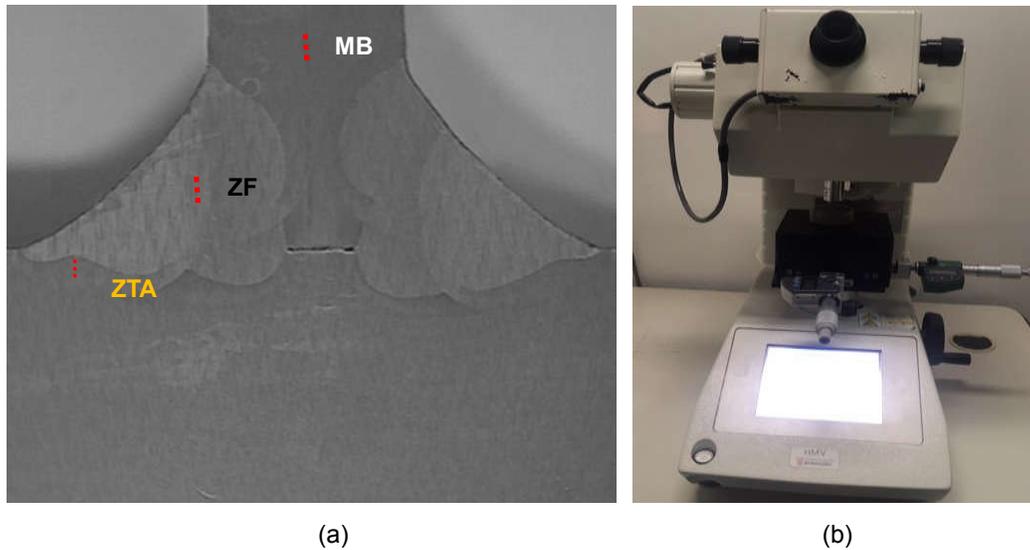
Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.3.8 Caracterização mecânica

Após os testes de caracterização macro e microestrutural, foi realizado caracterização mecânica por meio do ensaio de microdureza. O indentador utilizado foi a pirâmide de diamante Vickers (HV), utilizando uma carga de 9,807N durante 15 segundos.

Foram realizadas três medições de dureza nas regiões da solda, sendo, MB, ZF e ZTA. As medidas foram realizadas na posição vertical. No metal de base e zona fundida as medidas foram iniciadas do centro destas áreas e a partir deste centro foram tomadas uma medida para cima e outra para baixo, espaçadas de 1 mm em 1mm. Na zona termicamente afetada, foi realizada da mesma forma, porém espaçada de 0,5 mm em 0,5mm. A figura 33 apresenta a disposição aproximada da forma como foram tomadas as medidas para realização do ensaio de microdureza e ao lado o microdurômetro do fabricante Shimadzu e modelo HMV-2T utilizado para a realização do ensaio de microdureza.

Figura 33 - Disposição dos locais onde foram realizados o ensaio de dureza e microdurômetro.



(a) Locais onde foi realizado o ensaio de microdureza; (b) microdurômetro utilizado.

Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.4 Soldagem em corpos de prova

Nesta segunda etapa da pesquisa foram soldados cordões sobre chapas, sendo 54 cordões ao total, divididos da seguinte forma: 27 para realização dos testes e mais 27 réplicas, caso necessário validar algum resultado. Os 27 cordões representam os três passes de soldagem de uma viga, sendo nove cordões para o passe 1, nove cordões para o passe 2 e mais nove cordões para o passe 3. O objetivo desta etapa foi selecionar os três melhores cordões de cada passe para que por fim fosse soldado uma viga com estes três melhores passes e comparado esta última soldagem com a soldagem preliminar realizada na primeira etapa.

4.4.1 Preparação dos parâmetros para execução da soldagem

Com a obtenção dos parâmetros de soldagem por intermédio da soldagem preliminar realizada na primeira etapa, foi possível construir uma matriz de dados com a soldagem dos 16 cordões executados para cada passe de soldagem. Foram estabelecidas as variáveis de entrada e seus respectivos níveis de variação para cada passe, os valores dos três níveis foram retirados desta matriz de dados. A

tabela 7 apresenta os valores para estes três níveis considerando como exemplo o passe 1 de soldagem.

Tabela 7 - Variáveis retiradas da matriz de dados para formação dos níveis de variação.

Passe #1			
Variáveis de entrada	Mínimo (nível I)	Média (nível II)	Máxima (nível III)
Corrente (A)	685	711	730
Tensão (V)	38	38	38
Velocidade (cm/min)	76	82	88

Fonte: Próprio Autor, 2018.

As variáveis de entrada possuem um efeito com relação às características dimensionais do cordão, como a penetração (P), área de ZTA (A_{ZTA}), largura do cordão (L) e reforço (R) que foram avaliados no ensaio de macrografia.

Por fim, foram estabelecidos três blocos de variáveis de soldagem, a serem executadas em nove cordões para cada passe de soldagem, sendo a corrente repetida a cada três cordões, a tensão mantida constante variando apenas a velocidade e foi calculado o aporte térmico para cada solda realizada. A tabela 8 apresenta os valores para estes três blocos considerando os três passes de soldagem.

Tabela 8 – Divisão de blocos de parâmetros para execução da soldagem de corpos de prova.

Passe #1					
Divisão de bloco de parâmetro	Corpo de prova	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Aporte térmico (kJ/cm)
1	1.1	670	38	76	20,10
	2.1	670	38	82	18,63
	3.1	670	38	88	17,36
2	4.1	710	38	76	21,30
	5.1	710	38	82	19,74
	6.1	710	38	88	18,40
3	7.1	750	38	76	22,50

Tabela 8 – Divisão de blocos de parâmetros para execução da soldagem de corpos de prova – Continuação.

3	8.1	750	38	82	20,85
	9.1	750	38	88	19,43

Passe #2					
Divisão de bloco de parâmetro	Corpo de prova	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Aporte térmico (kJ/cm)
1	1.2	665	38	88	17,23
	2.2	665	38	92	16,48
	3.2	665	38	96	15,79
2	4.2	700	38	88	18,14
	5.2	700	38	92	17,35
	6.2	700	38	96	16,63
3	7.2	740	38	88	19,17
	8.2	740	38	92	18,34
	9.2	740	38	96	17,58

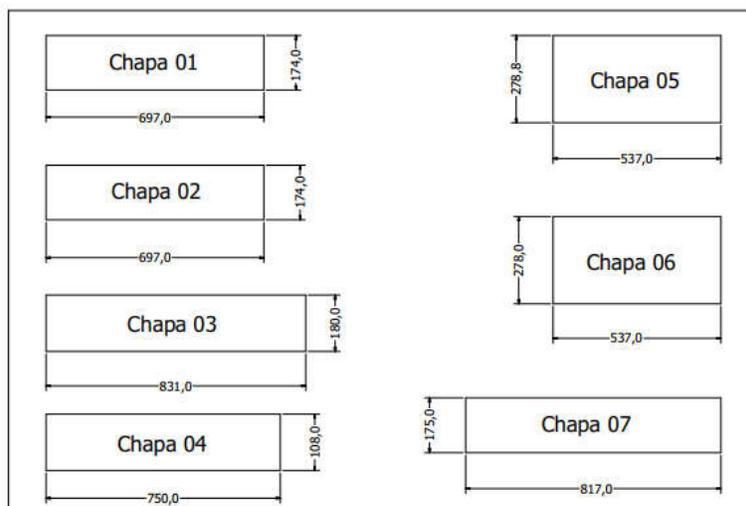
Passe #3					
Divisão de bloco de parâmetro	Corpo de prova	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Aporte térmico (kJ/cm)
1	1.3	595	38	95	14,28
	2.3	595	38	96	14,13
	3.3	595	38	97	13,99
2	4.3	628	38	95	15,07
	5.3	628	38	96	14,92
	6.3	628	38	97	14,76
3	7.3	660	38	95	15,84
	8.3	660	38	96	15,68
	9.3	660	38	97	15,51

Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.4.2 Preparação e soldagem de cordões sobre chapas

Para a soldagem dos cordões de solda sobre chapas, foi utilizada uma chapa de 19 mm de espessura. Estes corpos de prova foram cortados com auxílio de uma máquina de corte a plasma. Para soldagem dos 27 cordões e suas réplicas foram utilizados 7 chapas conforme dimensões apresentadas na figura 34.

Figura 34 - Chapas utilizadas para soldagem dos corpos de prova.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Foi retirada a carepa de todas as chapas com o auxílio de uma esmerilhadeira e escova, a fim de garantir uma solda sem inclusões de impurezas. A figura 35 apresenta uma chapa com corte final e acabamento superficial antes da soldagem.

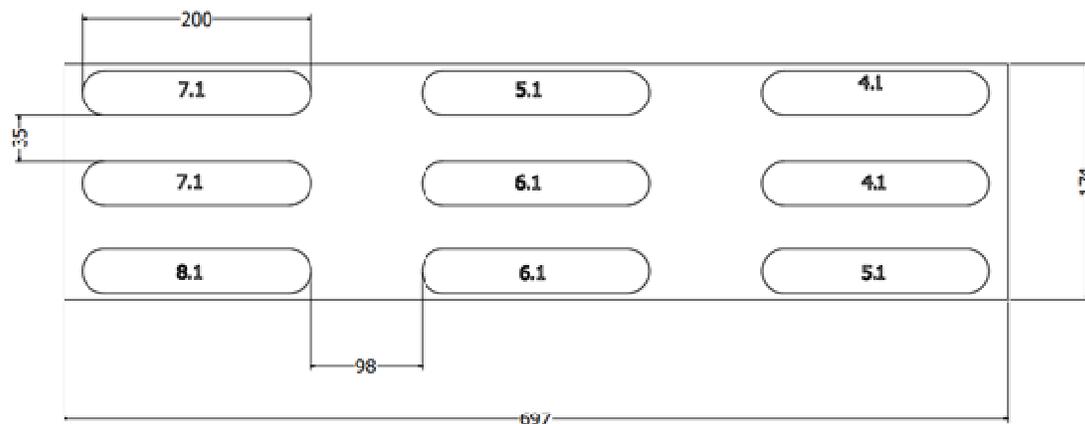
Figura 35 – Preparação do metal de base antes da soldagem.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

A figura 36 representa a forma como os cordões foram depositados sobre as chapas, a cada soldagem de um cordão e de sua réplica, o parâmetro de soldagem era variado conforme previsto na tabela 8.

Figura 36 - Soldagem de cordões do passe 1 sobre a chapa de #2.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

A figura 37 ilustra o momento da execução da soldagem conforme previsto no planejamento da soldagem, soldagem do cordão e de sua réplica.

Figura 37 - Soldagem dos cordões sobre chapa.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

A figura 38 ilustra o cabeçote da máquina de solda com o parâmetro de soldagem do nono cordão de solda do passe 3.

Figura 38 – Parâmetro de soldagem do 9º cordão do passe 3, 38 V e 97 cm/min.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

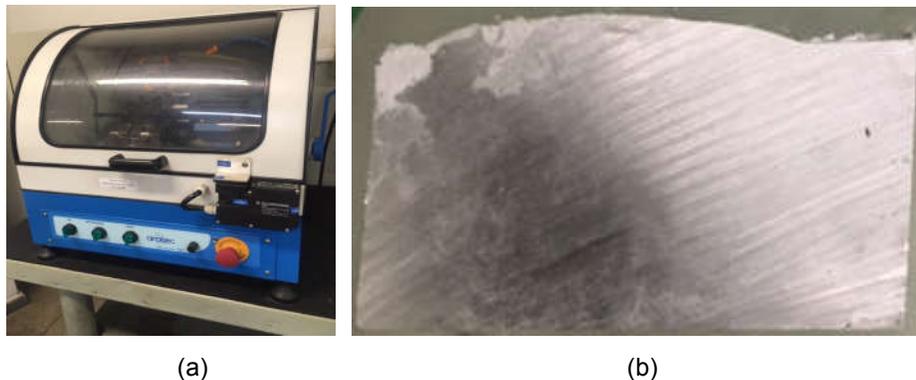
Ao final da soldagem, os cordões foram resfriados a temperatura ambiente e identificados de acordo com o passe de soldagem e sequência, esta identificação possuem relação com os parâmetros de soldagem planejados para realização desta solda, a figura 39 ilustra a finalização deste processo.

Figura 39 - Soldagem finalizada sobre chapas.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Figura 41 – Cortadora metalográfica e amostra final a ser embutida.



a) Cortadora metalográfica e b) amostra final a ser embutida para realização dos ensaios.

Fonte: Próprio Autor, 2018.

4.4.5 Caracterização macroestrutural

Para preparar as amostras para a realização da macrografia, foi necessário o embutimento a frio destas amostras. Este embutimento foi feito com resina acrílica, auto polimerizante, em um porta amostras de 50 mm de diâmetro, conforme figura 42.

Figura 42 – Amostra sendo embutida no porta amostra e resina e líquido utilizado.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Em seguida as amostras foram lixadas em lixadeiras com lixas d'água de granulometrias 100, 120, 240, 320, 400 e 600 *mesh*, respectivamente. Posteriormente, seguiram para o processo de polimento em politrizes rotativas. O polimento foi feito com o auxílio de pasta de diamante com granulometrias de 9 μm ,

3 μm e 1 μm respectivamente. A figura 43 apresenta os equipamentos utilizados no processo de preparação das amostras.

Figura 43 - Lixas rotativas e politrizes rotativas utilizadas na preparação das amostras.



(a)

(b)

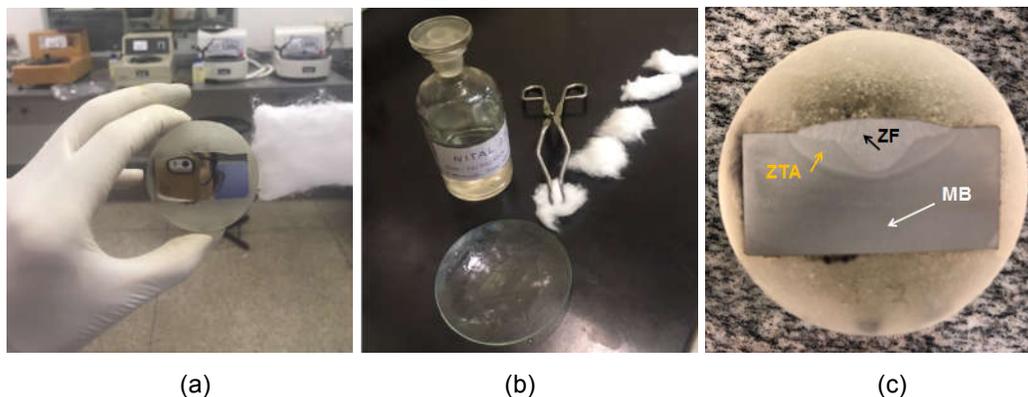
a) Lixas rotativas de 400 e 600 *mesh*, (b) politrizes de 1 μm .

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Após o polimento, todas as amostras foram lavadas e secadas com álcool e submetidas ao ataque químico na superfície, conduzido por aplicação do reativo Nital 5% (ácido nítrico e álcool etílico por 10 segundos). Logo após as amostras foram secadas com álcool, e as mesmas foram fotografadas com o auxílio de uma câmera comum. A figura 37 ilustra as principais etapas do ensaio de macrografia até a revelação das principais regiões da soldagem para amostra 4.3.

Após o polimento, todas as amostras foram lavadas e secadas com álcool e submetidas ao ataque químico na superfície, conduzido por aplicação do reativo Nital 5% (ácido nítrico e álcool etílico por 10 segundos). Logo após as amostras foram secadas com álcool, e as imagens foram fotografadas com o auxílio de uma câmera comum. A figura 44 ilustra as principais etapas do ensaio de macrografia até a revelação das principais regiões da soldagem para amostra 4.3.

Figura 44 - Amostra polida, ataque com Nital 5% e a macrografia da área da soldagem revelada.

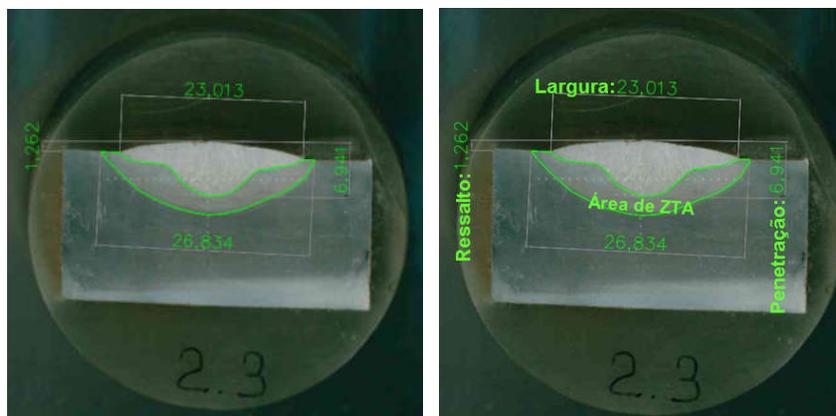


a) Amostra preparada antes do ataque, (b) preparação para o ataque, (c) regiões da soldagem.

Fonte: Próprio Autor, 2018.

Após o ataque químico das superfícies, as amostras foram scaneadas para realização das medições das regiões de soldagem, no software Autodesk Autocad 2017. Foi medido o reforço, largura do cordão, a penetração e a área da ZTA. A figura 45 ilustra as linhas de medições da amostra e destaca as regiões de soldagem.

Figura 45 - Medição das áreas de soldagem.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

Para selecionar o melhor cordão de cada passe, levou-se em consideração os melhores valores obtidos nas regiões da solda. Então, criou-se uma matriz de classificação, considerando uma escala de avaliação de “muito relevante” a “irrelevante”. Esta matriz de classificação foi montada considerando as necessidades específicas de cada passe de soldagem para a viga I em questão, por exemplo, para o passe 1 a penetração é uma dimensão muito relevante, sendo

assim, a amostra que obteve uma penetração alta com relação as demais, será pontuada com peso 10, e assim sucessivamente. Para o passe 2 a largura e a penetração são fatores importantes, desta maneira os cordões do passe 2 que apresentarem melhores dimensões destas características serão conseqüentemente melhores pontuados e por fim, no passe 3, um menor reforço é desejável, bem como uma menor área de ZTA, também desta forma os melhores cordões pontuados neste requisitos obterão uma maior pontuação. Esta avaliação julga o resultado dimensional fazendo uma relação com a soldagem que será realizada na viga, pois, a intenção desta escolha é justamente aplicar estes melhores cordões na soldagem final da viga.

Ao final, o cordão a ser selecionado terá a maior pontuação encontrada. A tabela 9 apresenta esta matriz de classificação e os valores desta escala de pesos. A pontuação é obtida pela multiplicação de pontos de cada região avaliada.

Tabela 9 - Matriz de classificação.

ID Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração sem reforço (mm)	Área ZTA mm ²	Pontuação
1.1					0
2.1					0
3.1					0
4.1					0
5.1					0
6.1					0
7.1					0
8.1					0
9.1					0

Pesos	
Muito relevante	10
Relevante	5
Pouco relevante	3
Irrelevante	1

Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.4.6 Caracterização microestrutural

Na caracterização microestrutural foi verificado a microestrutura das três principais regiões de soldagem, ou seja: metal de base (MB), zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA). Para a microscopia ótica (MO) foi utilizado o microscópio Fortel com sistema de digitalização Kontrol. Foram feitas imagens com ampliações de 200X, 400X e 800X para cada região da soldagem. Para a análise no microscópio eletrônica de varredura (MEV) foi utilizado uma tensão de 15kV e detecção de imagens por elétrons secundários, o microscópio MEV utilizado foi do

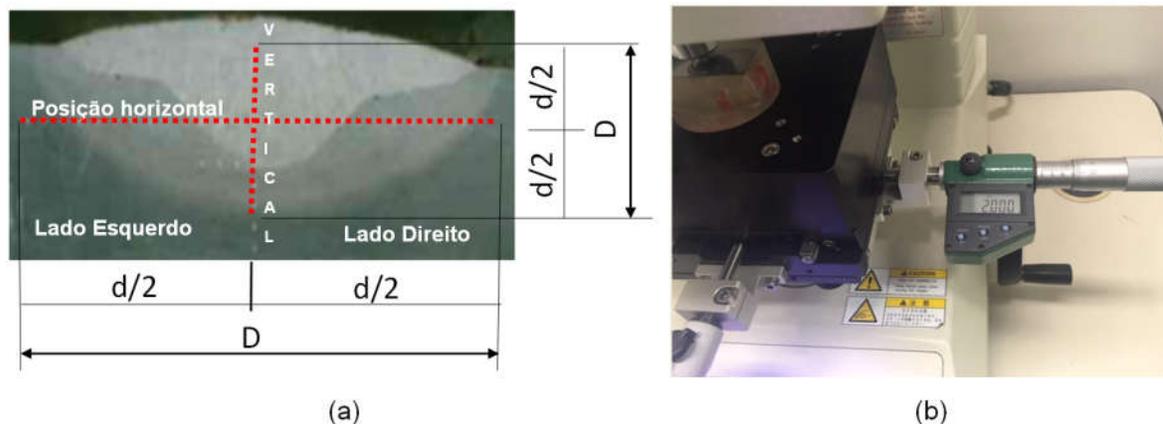
fabricante Shimadzu modelo SSX-550 Superscan, foram feitas imagens com ampliações de 800X, 1200X e 1500X. Utilizados os mesmos equipamentos da primeira etapa de soldagem, conforme figura 32. A identificação dos diferentes constituintes das áreas de soldagem também foi realizada segundo o sistema de classificação do Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

4.4.7 Caracterização mecânica

Após os testes de caracterização macro e microestrutural, foi realizado a caracterização mecânica das amostras por meio do ensaio de microdureza. O indentador utilizado foi a pirâmide de diamante Vickers (HV), utilizando uma carga de 9,807N durante 15 segundos.

Foi feito um perfil de dureza nas regiões da solda, as medidas foram realizadas em duas direções, ou seja, vertical e horizontal da amostra, de forma a evidenciar a variação de dureza provocada pelo ciclo térmico de soldagem. A quantidade de pontos variou de amostra para amostra, visto que o tamanho dos cordões de solda das amostras era diferente devido aos parâmetros de soldagem utilizados. Em média foram realizadas 14 medições por amostra na posição vertical e 25 medições por amostra na posição horizontal. As regiões submetidas ao ensaio foram, MB, ZF e ZTA. Na posição vertical o ensaio sempre se iniciava a 2 mm do reforço (borda da solda) varrendo de 1mm em 1mm, ou seja, indo da ZF até o MB. Na posição horizontal iniciava a medição do centro da ZF varrendo de 1 mm em 1 mm até o MB do lado esquerdo e posteriormente do centro da ZF varrendo de 1mm em 1mm até o MB do lado direito. A figura 46 apresenta a disposição aproximada da forma como foram tomadas as medidas para realização do ensaio de microdureza e detalhe de um dos micrômetros que fica acoplado ao microdurômetro o qual possibilita a movimentação da amostra no sentido vertical e horizontal com precisão centesimal.

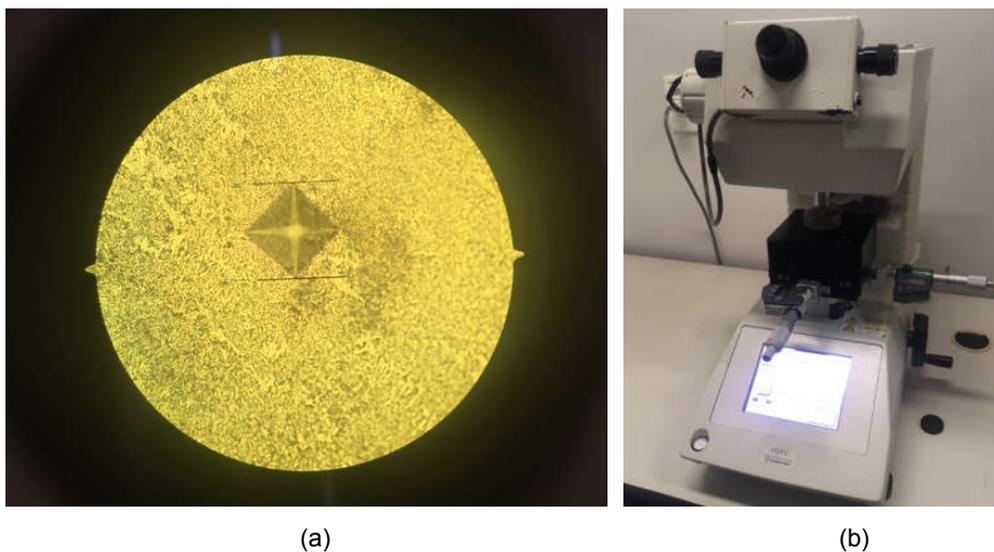
Figura 46 - Perfil de dureza realizado no CP e detalhe do micrômetro acoplado ao microdurômetro.



Fonte: Próprio Autor, 2018.

O microdurômetro utilizado no ensaio de dureza foi do fabricante Shimadzu modelo HMV-2T Conforme figura 47 (a) é possível visualizar a marca do indentador deste microdurômetro deixada na zona fundida de um corpo de prova. Ao lado na figura 45 (b) apresenta a foto do microdurômetro utilizado no ensaio.

Figura 47 - Marca do indentador deixada no ZF e microdurômetro Shimadzu utilizado no ensaio.



(a) CP indentado visto pela lente de um MO; (b) microdurômetro utilizado no ensaio de microdureza.

Fonte: Próprio Autor, 2018.

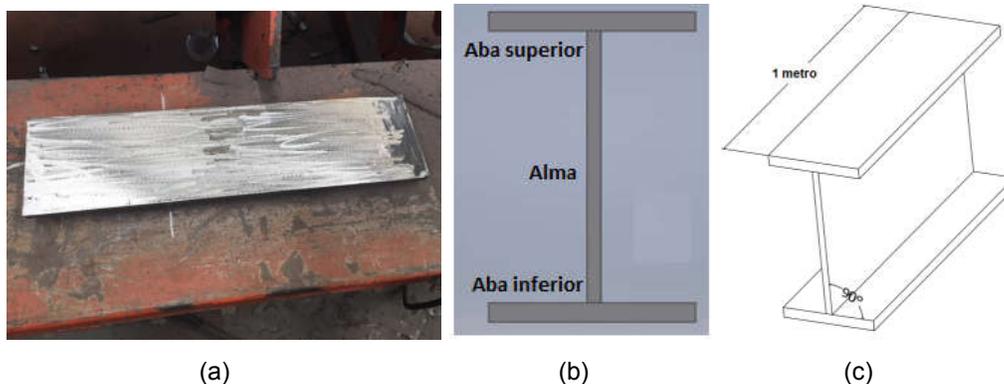
4.5 Soldagem final em amostra de viga perfil I

A finalidade desta última etapa foi executar a soldagem em uma amostra de viga perfil I com os três melhores cordões escolhidos na segunda etapa de soldagem em corpos de prova. A soldagem foi realizada de forma similar à soldagem da primeira etapa, sendo, executados três passes de soldagem: raiz, enchimento e acabamento, em uma junta em ângulo com chanfro reto, em cada lado do perfil I, na posição plana de soldagem.

4.5.1 Preparação das chapas para soldagem da viga

Assim como na soldagem preliminar em viga perfil I da primeira etapa, as chapas para formação da amostra de viga perfil I também foram cortadas com auxílio de uma máquina de corte a plasma e preparadas também pelas as técnicas de esmerilhamento e escovamento. As dimensões da amostra da viga também foram as mesmas da viga perfil I soldada na etapa de soldagem preliminar, (figura 15) exceto o comprimento que neste caso por se tratar de uma amostra, não teria a necessidade de utilizar um comprimento real, portanto o comprimento da amostra foi de aproximadamente 1 metro. A figura 48 detalha, respectivamente, este processo.

Figura 48 - Amostra da viga perfil I.



(a) Preparação das chapas; (b) perfil da amostra da viga I; (c) vista lateral.

Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.5.2 Soldagem da amostra de viga

A soldagem da amostra de viga também foi executada na posição 1F em uma junta de ângulo em um chanfro reto em “I”, conforme soldagem preliminar realizada na primeira etapa, item 4.3.2. Para minimizar empenos e torções foi colocado duas travas na amostra e a soldas foram realizadas nos quatro lados de forma intercalar. Foram feitos três cordões, sendo, um de passe de raiz, o segundo de enchimento e o último de acabamento. O processo de limpeza entre passes para retirada escória foi feito cuidadosamente. A figura 49 apresenta a foto da amostra a ser soldada.

Figura 49 - Amostra de viga perfil I a ser soldada.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.5.2.1 Parâmetros de Soldagem da amostra de viga

Os parâmetros de soldagem utilizados para a soldagem final da amostra de viga foram os mesmos parâmetros utilizados para a soldagem dos três melhores cordões escolhidos. A tabela 10 apresenta estes parâmetros por passe de soldagem.

Tabela 10 - Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem final.

ID Amostra – Passe #	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)
9.1 – Passe 1	750	38	88
2.2 – Passe 2	665	38	92
7.3 – Passe 3	660	38	95

Fonte: Próprio Autor, 2019.

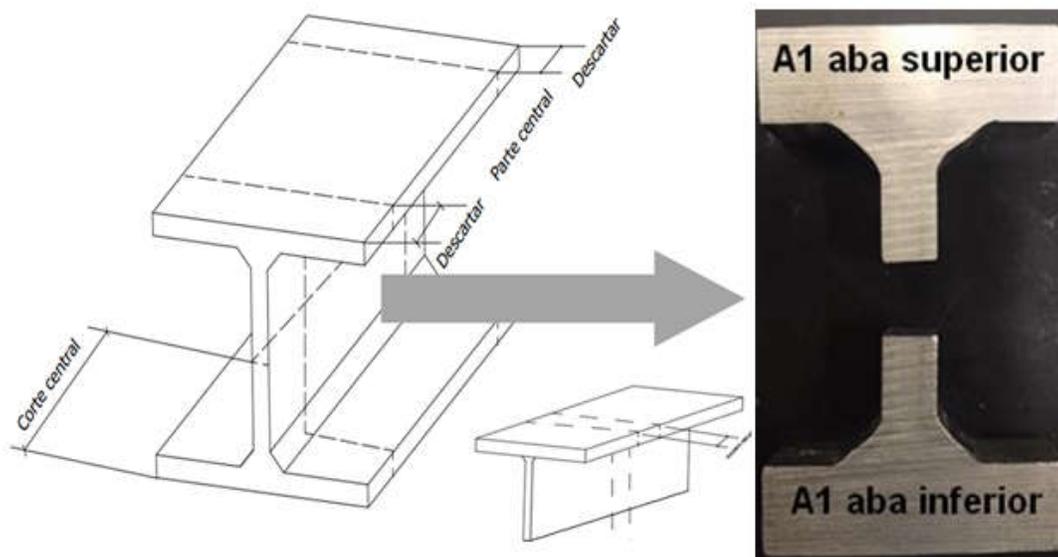
4.5.3 Ensaio Visual do cordão de solda

Foi realizado ensaio visual em toda extensão do filete de solda da amostra da viga perfil I. Novamente o ensaio consistiu na avaliação da presença de possíveis discontinuidades, tais como: mordeduras, falta de fusão, poros, respingos, trincas. Avaliado também a dimensão da perna da solda e da garganta com auxílio de um calibre para ângulo de solda de 0 á 20 mm (figura 25), e a convexidade conforme foi realizado na primeira etapa de soldagem preliminar em viga perfil I. Também foi avaliado o visual do perfil do filete de solda, conforme figura 26.

4.5.4 Corte da seção transversal da amostra de viga I

Após a soldagem foi realizado o corte da seção transversal da amostra da viga. A amostra inicial possuía aproximadamente 1m e desta amostra foi realizado um corte com auxílio de um maçarico, onde a amostra foi cortada primeiro ao meio dividindo o lado superior da aba e o lado inferior da aba da viga. Logo após foram cortados e desprezados aproximadamente 280 mm de cada extremidade, restando 2 peças de 440 mm do centro. Com uma serra fita foi retirada uma amostra do meio de cada lado com as seguintes medidas. 105 mm de comprimento, 77 mm de altura e 30 mm de espessura. A figura 50 ilustra o esquema de corte e tamanho final da amostra da viga para realização do ensaio de macrografia.

Figura 50 - Desenho esquemático de retirada de corpo de prova.

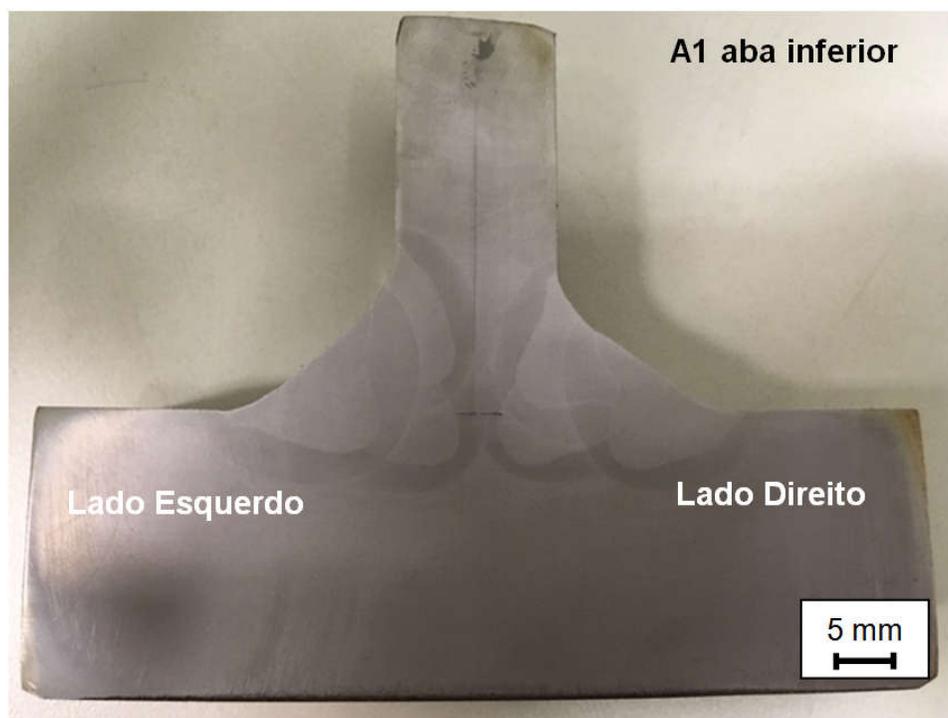


4.5.5 Caracterização macroestrutural

No ensaio de macrografia foram analisadas apenas uma das faces de 2 amostras retiradas do centro. Foram avaliadas as três principais regiões de soldagem, metal de base (MB), zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA), e ainda número de passes, linha de fusão, e possíveis discontinuidades.

Foi executada a preparação de acordo com mesmas técnicas macrográficas, realizadas para as vigas da soldagem preliminar, ou seja, amostras cortado em uma serra, realizado o lixamento da superfície a ser analisada com lixa d'água de cinta de granulometria de #100, #120, #240, #320, #400, #600 *mesh*, respectivamente. Após lixamento, todas as amostras foram secadas com álcool e submetidas ao ataque químico na superfície, conduzido por aplicação do reativo Nital 5% (ácido nítrico e álcool etílico por 10 segundos). As imagens foram fotografadas com o auxílio de uma câmera comum e também scaneadas para realização das medições das áreas de soldagem, no software Autodesk Autocad 2017. A figura 51 ilustra a macrografia de uma destas amostras.

Figura 51 - Foto de uma Macrografia da Amostra da viga A1 aba inferior.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.5.6 Caracterização microestrutural

Neste ensaio foi verificada a microestrutura das três principais regiões de soldagem, metal de base (MB), zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA), sem necessidade de embutir amostra.

Para exame da microestrutura este corpo de prova que já havia sido lixado e atacado conforme procedimento mencionado no item 4.5.5. Para a microscopia ótica (MO) foi utilizado o microscópio Fortel com sistema de digitalização Kontrol. Foram feitas imagens com ampliações de 200X e 400X e 800X para cada região da soldagem. Novamente a identificação dos diferentes constituintes das áreas de soldagem será realizada segundo o sistema de classificação do Instituto Internacional de Soldagem (IIW). As análises no MO e foram realizadas no Laboratório de metalografia do CEFET-MG Campus I em Belo Horizonte.

4.5.7 Caracterização mecânica

Os ensaios de dureza também foram realizados nas três principais regiões de soldagem, MB, ZF e ZT. O microdurômetro usado no ensaio de dureza foi do fabricante Shimadzu modelo HMV-2T, com penetrador vickers usando uma carga de 1 kgf durante 15 segundos. A preparação das amostras foi a mesma realizada para caracterização macro e microestrutural. O ensaio foi realizado conforme foi feito na primeira etapa de soldagem preliminar (ver figura 33). O ensaio também foi realizado no Laboratório de metalografia do CEFET-MG Campus I em Belo Horizonte.

4.5.8 Comparar resultados da soldagem da 1º etapa com a soldagem da 3º etapa

O objetivo desta etapa é fazer uma comparação com a primeira etapa de soldagem, chamada de soldagem preliminar em viga perfil I com a última etapa de soldagem, chamada de soldagem final em amostra de viga perfil I. Verificar quais foram as principais diferenças e se houveram benefícios e até pontos negativos de uma soldagem com a outra.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Testes preliminares

A tabela 11 apresenta os parâmetros de soldagem da viga I de número 1. Estes dados foram coletados durante a execução da solda preliminar nesta viga.

Após a coleta dos parâmetros de soldagem para as quatro vigas, os mesmos foram separados por passes. As tabelas 12, 13 e 14 apresentam, respectivamente, os valores dos parâmetros de soldagem para cada passe realizado nas quatro vigas, os quais totalizaram as dezesseis juntas soldadas.

O agrupamento dos dados por passe foi fundamental para a construção da nova base de dados dos parâmetros de soldagem utilizados na segunda etapa deste trabalho que é a soldagem em corpos de prova, realizada sobre chapas.

Tabela 11 - Parâmetros coletados na soldagem preliminar da viga perfil I de número 1.

Lados da viga # 1	Número de passes	Diâmetro de arame (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
1	Passe 1	3,2	700	36.2	78
	Passe 2	3,2	720	35.0	91
	Passe 3	3,2	630	35.1	96
2	Passe 1	3,2	709	35.8	85
	Passe 2	3,2	700	34.9	91
	Passe 3	3,2	635	35.5	96
3	Passe 1	3,2	715	36.6	88
	Passe 2	3,2	690	35.0	90
	Passe 3	3,2	630	36.2	96
4	Passe 1	3,2	720	36.2	84
	Passe 2	3,2	718	34.8	91
	Passe 3	3,2	620	36.7	96

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 12 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 1.

Passe 1	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
Viga 1 - Lado 1	700	36,2	78
Viga 1 - Lado 2	709	35,8	85
Viga 1 - Lado 3	715	36,6	88
Viga 1 - Lado 4	720	36,2	84
Viga 2 - Lado 5	710	35,8	82
Viga 2 - Lado 6	720	36,2	87
Viga 2 - Lado 7	705	36,1	85
Viga 2 - Lado 8	727	36,6	82
Viga 3 - Lado 9	698	36,2	84
Viga 3 - Lado 10	685	35,8	76
Viga 3 - Lado 11	695	36,8	79
Viga 3 - Lado 12	723	36,3	82
Viga 4 - Lado 13	714	36,2	78
Viga 4 - Lado 14	700	36,8	80
Viga 4 - Lado 15	720	36,9	81
Viga 4 - Lado 16	730	37,0	82

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 13 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 2.

Passe 2	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
Viga 1 - Lado 1	720	35,0	91
Viga 1 - Lado 2	700	34,9	91
Viga 1 - Lado 3	690	35,0	90
Viga 1 - Lado 4	718	34,8	91
Viga 2 - Lado 5	720	34,5	94

Tabela 13 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 2 – Continuação.

Viga 2 - Lado 6	690	34,4	96
Viga 2 - Lado 7	695	34,5	94
Viga 2 - Lado 8	700	34,8	91
Viga 3 - Lado 9	700	34,4	94
Viga 3 - Lado 10	682	34,8	90
Viga 3 - Lado 11	710	35,2	92
Viga 3 - Lado 12	695	35,2	90
Viga 4 - Lado 13	693	34,6	88
Viga 4 - Lado 14	690	34,8	94
Viga 4 - Lado 15	687	35,0	94
Viga 4 - Lado 16	692	35,0	93

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 14 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 3.

Passe 3	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
Viga 1 - Lado 1	630	35,1	96
Viga 1 - Lado 2	635	35,5	96
Viga 1 - Lado 3	630	36,2	96
Viga 1 - Lado 4	620	36,7	96
Viga 2 - Lado 5	635	36,6	96
Viga 2 - Lado 6	630	36,3	96
Viga 2 - Lado 7	625	37,0	96
Viga 2 - Lado 8	615	36,4	96
Viga 3 - Lado 9	635	36,6	96
Viga 3 - Lado 10	620	36,5	96
Viga 3 - Lado 11	635	36,6	95
Viga 3 - Lado 12	631	36,0	95
Viga 4 - Lado 13	630	36,0	96
Viga 4 - Lado 14	640	36,5	96

Tabela 14 - Parâmetros de soldagem das soldas do passe 3 – Continuação.

Viga 4 - Lado 15	613	36,1	96
Viga 4 - Lado 16	630	36,0	96

Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.1.2 Ensaio visual dos cordões de solda do teste preliminar

O ensaio visual foi realizado em 100% das juntas soldadas. Além do aspecto da solda, foi avaliada a existência de possíveis descontinuidades superficiais. Durante a inspeção visual dos cordões de solda, não foi verificado defeitos como: mordeduras, porosidades, respingos excessivos, falta de fusão e trincas. A figura 52 apresenta a foto de uma viga soldada.

Figura 52 - Filete final de soldagem.

Fonte: Próprio Autor, 2018.

A média aritmética obtida na medição da perna das soldas foi de aproximadamente 18 mm, e a garganta em média 11,30 mm, logo estes valores estão dentro da faixa estabelecida pelo projeto, conforme mencionado na metodologia experimental no item 4.3.2. A figura 53 apresenta a forma como foi executada medição do filete de solda e da garganta de solda, respectivamente. E por último foi avaliado o perfil do filete de solda que conforme figura 53 apresentou um perfil ligeiramente convexo, com máxima convexidade com aproximadamente menor que 1 mm.

Figura 53 - Medição realizada no filete final de solda e perfil do filete de solda.



(a) Medição do filete de solda.

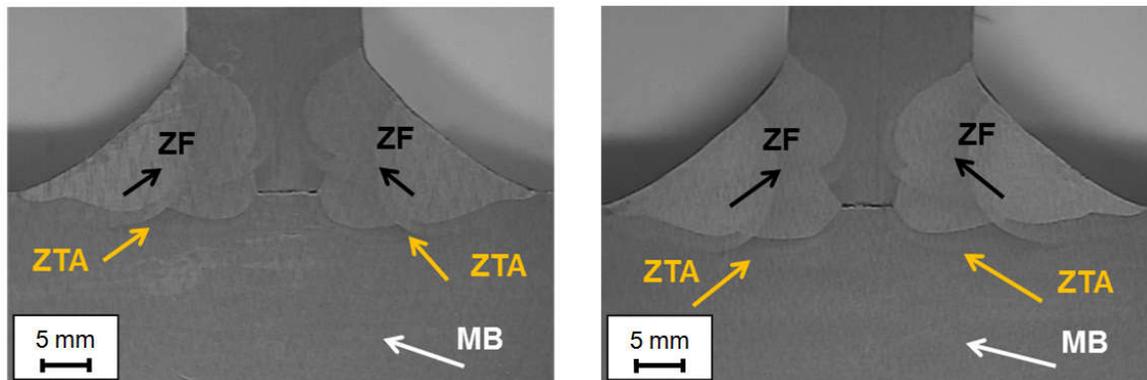
(b) medição da garganta de solda.

Fonte: Próprio Autor, 2018.

5.1.3 Caracterização macroestrutural

A figura 54 apresenta as macrografias das faces da amostra 3 da viga 1. Amostra esta que foi escolhida de forma aleatória, mas como foi realizado a macrografia de 16 juntas, por ventura iremos utilizar estes resultados para comparação com a soldagem final. De acordo com o que foi estabelecido na metodologia experimental, cada amostra possui 2 faces, denominadas neste de trabalho de face 1 e face 2, (figura 27). A solda se apresenta de forma homogênea e sem a presença de discontinuidades como: mordeduras, porosidades, respingos excessivos, falta de fusão, trincas. Ainda nesta figura são mostradas as regiões do cordão de solda MB, ZF e ZTA.

Figura 54 - Aspecto da solda e regiões do cordão da amostra de número 3.



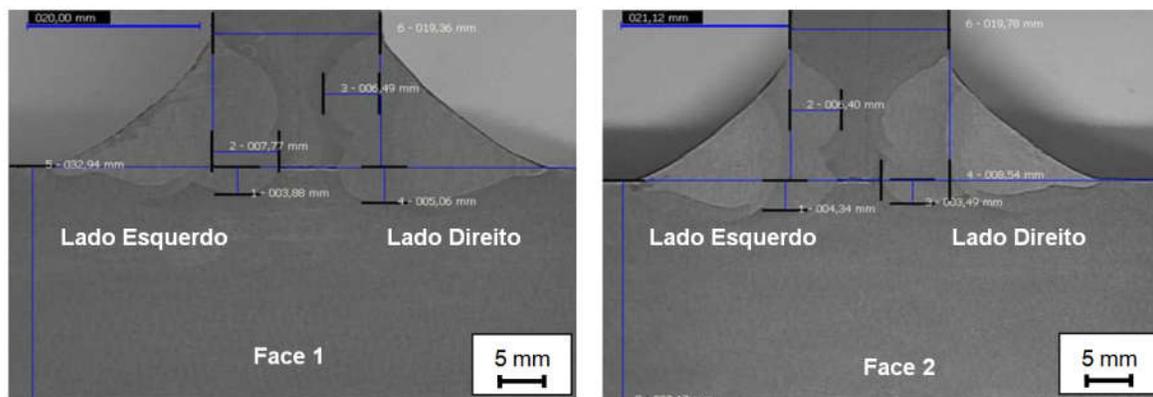
(a) Amostra 3 face 1

(b) Amostra 3 face 2

Fonte: Adaptado relatórios de Ensaio SENAI N° 6595/2017 e N° 6596/2017, 2017.

Além da avaliação visual feita nas macrografias, foi executada a medição da penetração do cordão de solda em ambos os lados da junta, lado esquerdo e direito. A figura 55 apresenta as cotas realizadas nas macrografias da viga 1, face 1 e 2 da amostra 3.

Figura 55 – Macrografia da amostra 3 face 1 e 2 respectivamente



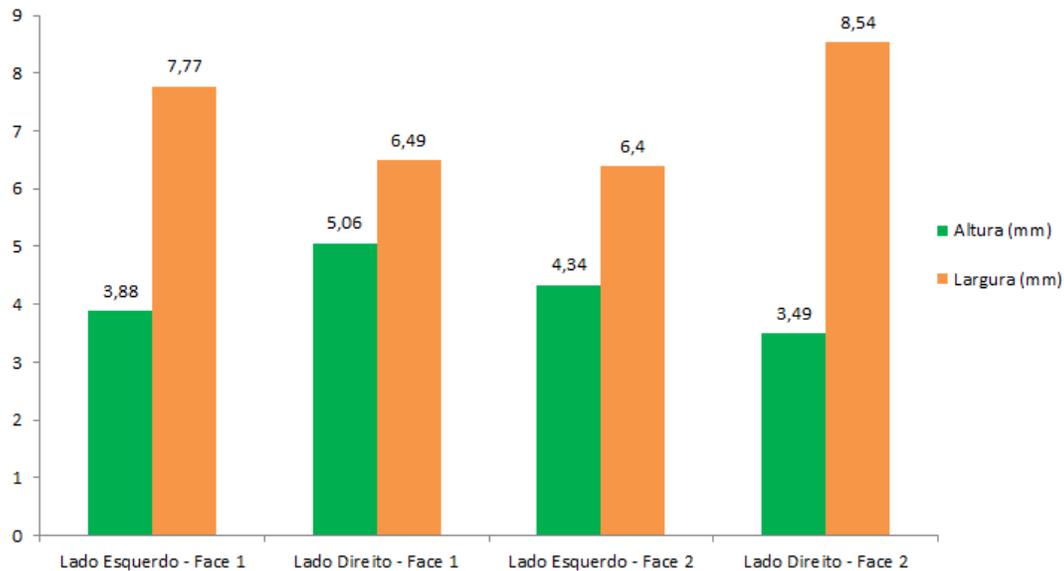
(a) Amostra 3 face 1.

(b) Amostra 3 face 2.

Fonte: Relatórios de Ensaio SENAI N° 6585/2017 e N° 6586/2017, 2017.

A figura 56 a seguir apresenta os dados de penetração medidos nestas juntas, onde é possível verificar que o lado direito da face 1 desta amostra, apresentou maior penetração no sentido da altura e o lado direito face 2 apresentou maior penetração no sentido da largura.

Figura 56 - Dados de Penetração da amostra 3 da viga 1.

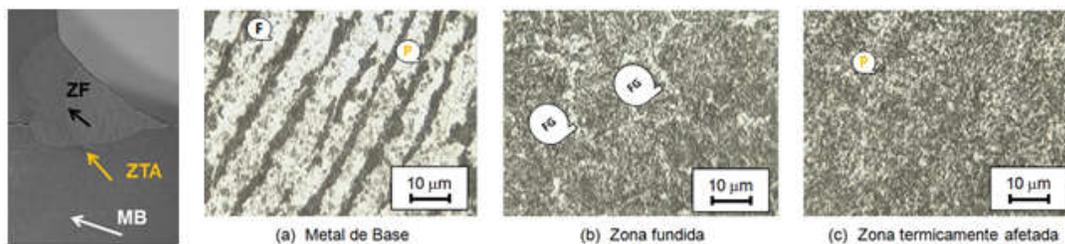


Fonte: Próprio Autor, 2018.

5.1.4 Caracterização microestrutural

Neste ensaio foi verificada a microestrutura da amostra A3, face 1 (A3F1) retirada da viga 1, com auxílio de um microscópio ótico (MO) com aumento de 400X e microscópio eletrônico de varredura (MEV) com aumento de 800X. A figura 56 apresenta as três principais regiões de solda desta amostra. Pode ser verificado que o MB possui basicamente grãos de ferrita (claros) e perlita (escuras). O material possui estrutura bandeada característica do processo de laminação a quente, (tamanho de grão 8-9). A zona fundida (ZF) de forma predominante foi verificada com ferrita de contorno de grão (FG) com alguns pontos de perlita. Na região da ZTA foi verificada uma microestrutura mais refinada com alguns pontos com perlita. A figura 57 apresenta as micrografias das áreas avaliadas da amostra A3 face 1.

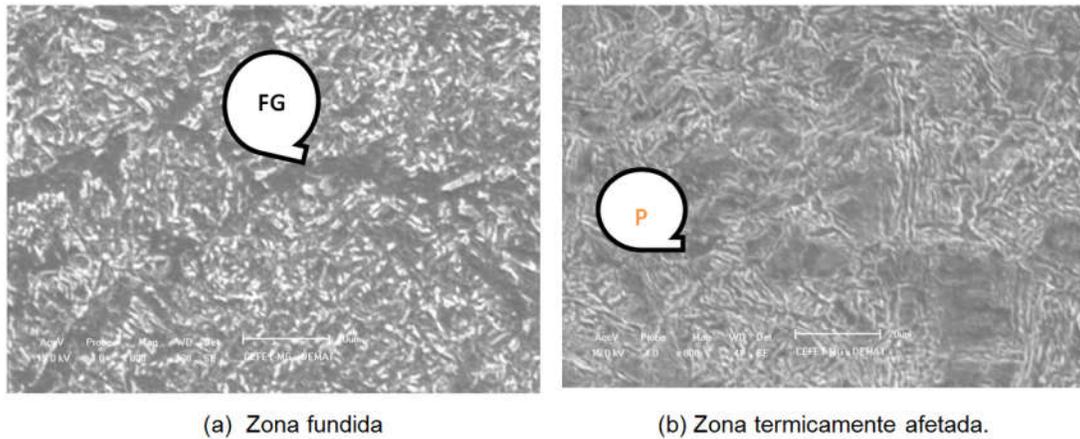
Figura 57 - Micrografia das áreas de soldagem da amostra A3 face 1 observadas no MO.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Foi realizado também avaliação da ZF e ZTA no MEV, com aumento de 800X. As imagens da figura 58 ajudam a validar o que já havia sido visto no MO, a ZF apresentou a ferrita de contorno de grão (FG) e a ZTA apresentou uma microestrutura refinada. A escala das figuras abaixo é de 20 μm conforme escala inserida nas fotos.

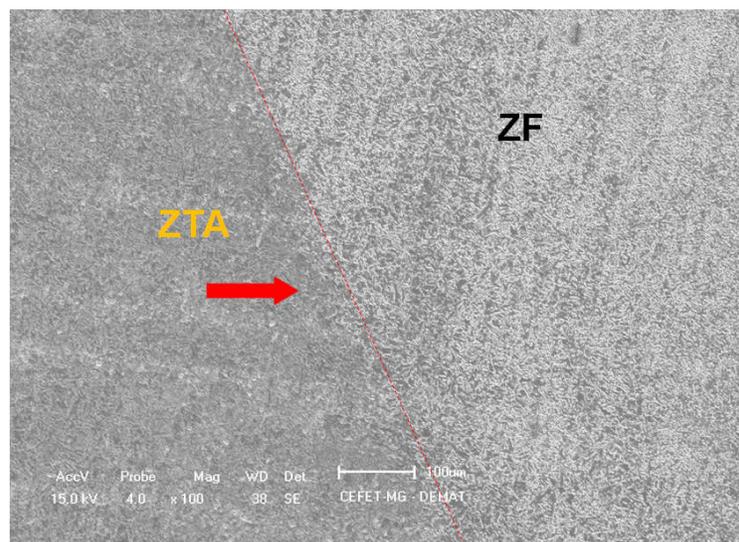
Figura 58 - Micrografia das áreas de soldagem da amostra A3 face 1 observadas no MEV.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Ainda no MEV foi possível visualizar área de transição da zona termicamente afetada para zona fundida (metal de solda), com aumento de 100X e escala de 100 μm , a figura 59 apresenta este detalhe.

Figura 59 - Micrografia da área transição da amostra A3 face 1 observadas no MEV.

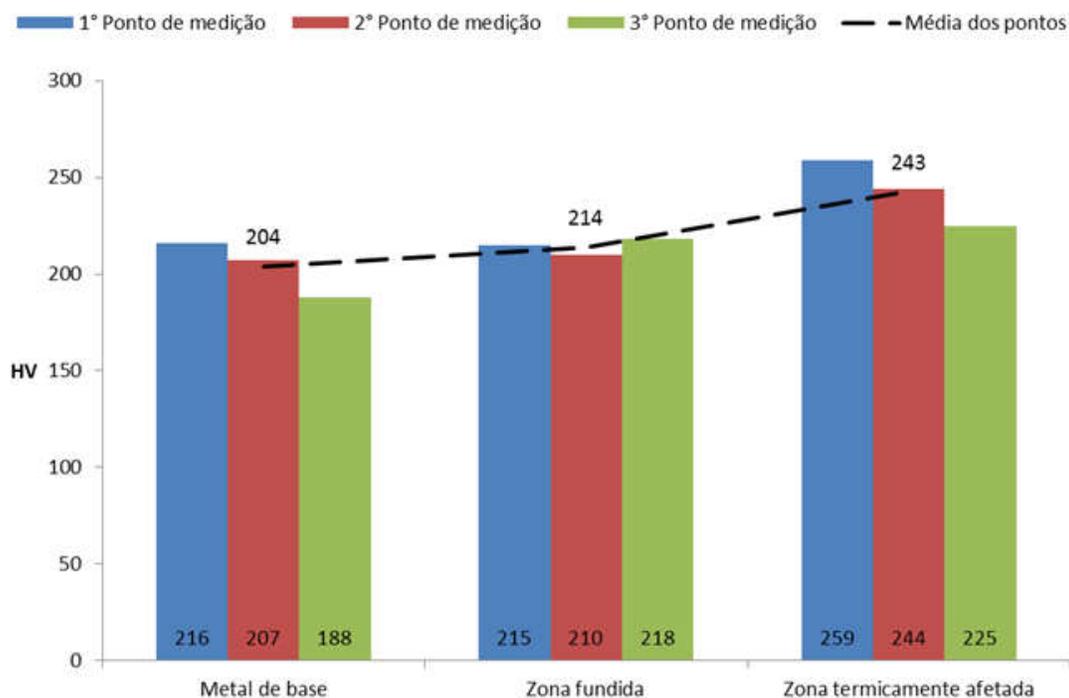


Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.1.5 Caracterização mecânica

Neste ensaio foi verificado a dureza das áreas de solda para amostra A3 face 1 conforme proposto na metodologia. A figura 60 apresenta os resultados das medições das áreas designadas para o ensaio, MB, ZF e ZTA, ainda neste gráfico são apresentados a média dos valores medidos.

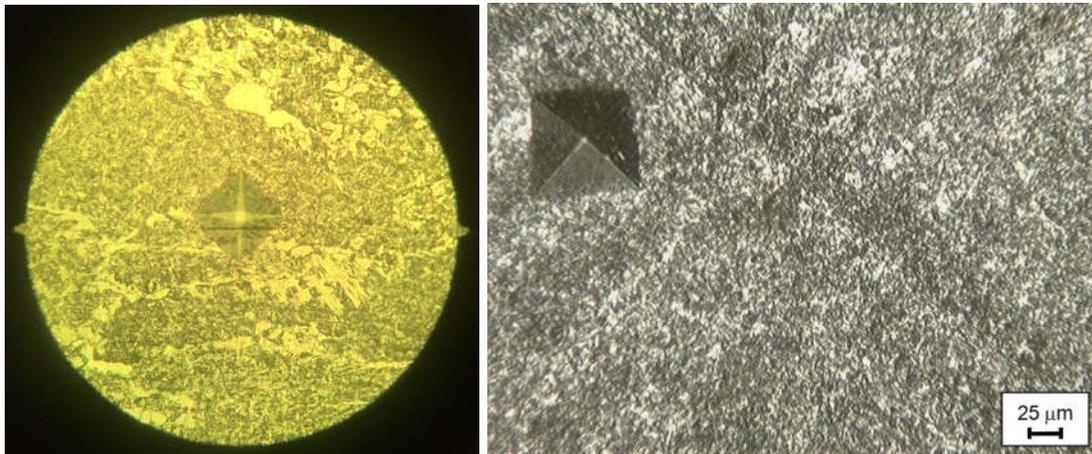
Figura 60 - Resultados das medições das áreas designadas para o ensaio de dureza.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

A figura 61 apresenta o detalhe do indentador deixada no na zona fundida da amostra A3 face 1, verificado no microdurômetro e no MO com aumento de 200X respectivamente.

Figura 61 - Imagem de uma impressão deixada na zona fundida.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Vale lembrar que os resultados encontrados nesta fase serão utilizados na última etapa deste estudo para fins comparativos. A soldagem preliminar referente a esta etapa foi realizada com parâmetros de soldagem de uma EPS qualificada pela norma AWS D1.1, a qual permite ao processo de soldagem uma abrangência na utilização destes parâmetros de soldagem. Não é conhecido, por exemplo, qual seria o melhor parâmetro a ser utilizado, para obter uma melhor penetração e ainda manter fatores como, uma microestrutura de boa resistência mecânica, como por exemplo, obter a ferrita acicular. Adquirir uma ZTA menor possível e com durezas nas faixas de aceitação.

5.2 – Soldagem em corpos de prova

5.2.1 Ensaio visual dos cordões de solda

O ensaio visual foi feito em 100% dos cordões de solda. Nesta inspeção não foram verificadas descontinuidades como mordeduras, porosidades, respingos excessivos, e trincas. A figura 62 apresenta os cordões de solda avaliados em duas etapas do processo. A primeira avaliação feita logo após o processo de soldagem e a segunda avaliação durante o processo de corte das amostras.

Figura 62 - Cordões de solda avaliados.



(a)

(b)

a) Ensaio visual após soldagem, b) ensaio visual durante o processo de corte.

Fonte: Próprio Autor, 2018.

5.2.2 Caracterização macroestrutural

Por meio da análise macrográfica foram feitas as medições das regiões dos cordões soldados sobre chapas. As tabelas 17, 18 e 19 apresentam os valores encontrados para reforço, largura, penetração e área de ZTA por passe de soldagem.

Tabela 15 - Dimensões das regiões dos cordões soldados sobre chapas, referente ao passe #1.

Passe #1							
ID Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área ZTA (mm ²)
1.1	670	38	76	2,46	27,41	10,74	159,36
2.1	670	38	82	3,04	25,74	7,41	74,37
3.1	670	38	88	2,87	26,70	10,55	90,93
4.1	710	38	76	2,58	30,08	10,70	144,15
5.1	710	38	82	2,24	22,32	9,83	101,08
6.1	710	38	88	2,32	23,77	10,31	94,50
7.1	750	38	76	2,95	26,66	10,59	76,85
8.1	750	38	82	2,58	27,91	11,71	162,41
9.1	750	38	88	3,34	26,23	11,58	119,39

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 16 - Dimensões das regiões dos cordões soldados sobre chapas, referente ao passe #2.

Passe #2							
ID Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área ZTA (mm ²)
1.2	665	38	88	2,59	21,18	9,59	77,74
2.2	665	38	92	2,06	26,07	8,93	74,44
3.2	665	38	96	2,37	26,51	7,02	95,97
4.2	700	38	88	2,92	25,32	8,73	83,35
5.2	700	38	92	2,28	24,88	7,90	69,54
6.2	700	38	96	2,65	23,23	7,55	91,51
7.2	740	38	88	2,64	25,28	9,26	107,92
8.2	740	38	92	2,98	28,21	9,88	141,46
9.2	740	38	96	2,14	25,14	5,89	91,84

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 17 - Dimensões das regiões dos cordões soldados sobre chapas, referente ao passe #3.

Passe #3							
ID Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área ZTA (mm ²)
1.3	595	38	95	2,67	28,37	7,67	119,5
2.3	595	38	96	1,99	23,37	5,21	81,48
3.3	595	38	97	1,89	23,17	5,22	87,44
4.3	628	38	95	2,03	24,18	6,45	88,83
5.3	628	38	96	2,30	23,47	6,64	62,11
6.3	628	38	97	2,27	23,23	7,68	77,21
7.3	660	38	95	2,34	24,54	7,23	86,93
8.3	660	38	96	2,22	24,14	7,79	78,78
9.3	660	38	97	2,54	24,55	7,98	85,07

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Após a medição, foi feito um processo avaliativo para escolher o melhor cordão de cada passe, onde foi utilizada a matriz de classificação mencionada no item 4.4.5 da metodologia. Conforme tabelas 20 (1º passe), 21 (2º passe) e 22 (3º passe) foram escolhidas as amostras que apresentaram maior pontuação para as regiões de solda avaliadas. Foram escolhidas as amostras 9.1 (1º passe), 2.2 (2º passe) e 8.3 (3º passe) com base na necessidade de cada passe e também considerando como

as características em questão destes cordões poderiam contribuir para a qualidade dos passes da soldagem final da viga, conforme exemplificado no item 4.4.5.

Tabela 18 - Matriz de classificação para os resultados do passe #1.

ID Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área ZTA (mm²)	Pontuação
1.1	3	5	5	1	75
2.1	10	3	1	10	300
3.1	5	3	5	10	750
4.1	3	10	5	3	450
5.1	1	1	5	5	25
6.1	1	1	5	10	50
7.1	3	3	5	10	450
8.1	1	5	10	1	50
9.1	10	3	10	3	900

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 19 - Matriz de classificação para os resultados do passe #2.

ID Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área ZTA (mm²)	Pontuação
1.2	5	1	10	10	500
2.2	10	10	10	10	10000
3.2	5	10	10	5	2500
4.2	1	5	5	10	250
5.2	10	1	3	10	300
6.2	3	1	3	5	45
7.2	3	5	10	3	450
8.2	1	10	10	1	100
9.2	10	5	1	5	250

Fonte: Próprio Autor, 2019.

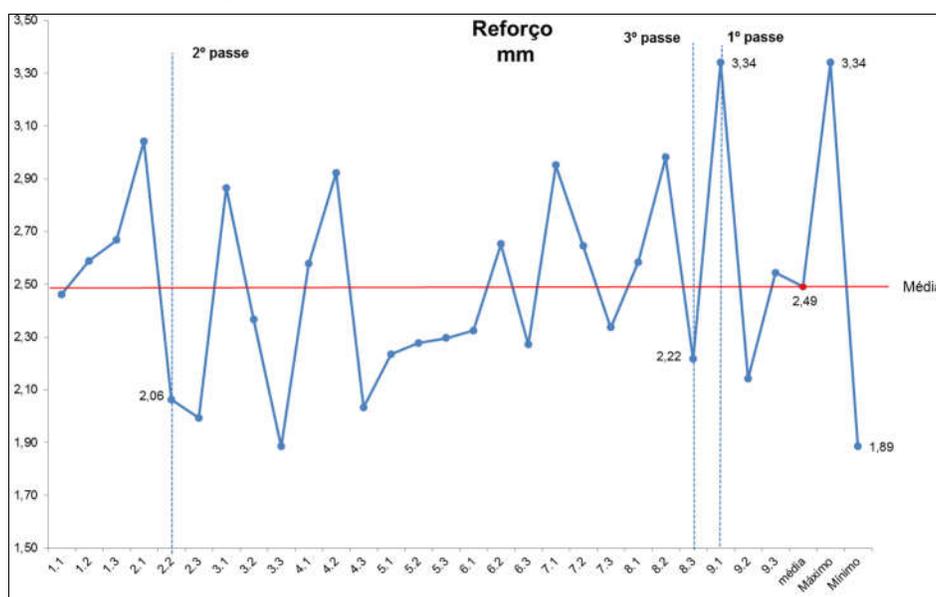
Tabela 20 - Matriz de classificação para os resultados do passe #3.

ID Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área ZTA (mm ²)	Pontuação
1.3	1	10	5	1	50
2.3	10	1	1	5	50
3.3	10	1	1	3	30
4.3	10	3	3	3	270
5.3	3	1	3	10	90
6.3	3	1	5	10	150
7.3	3	5	5	3	225
8.3	5	3	10	10	1500
9.3	1	5	10	10	500

Fonte: Próprio Autor, 2019.

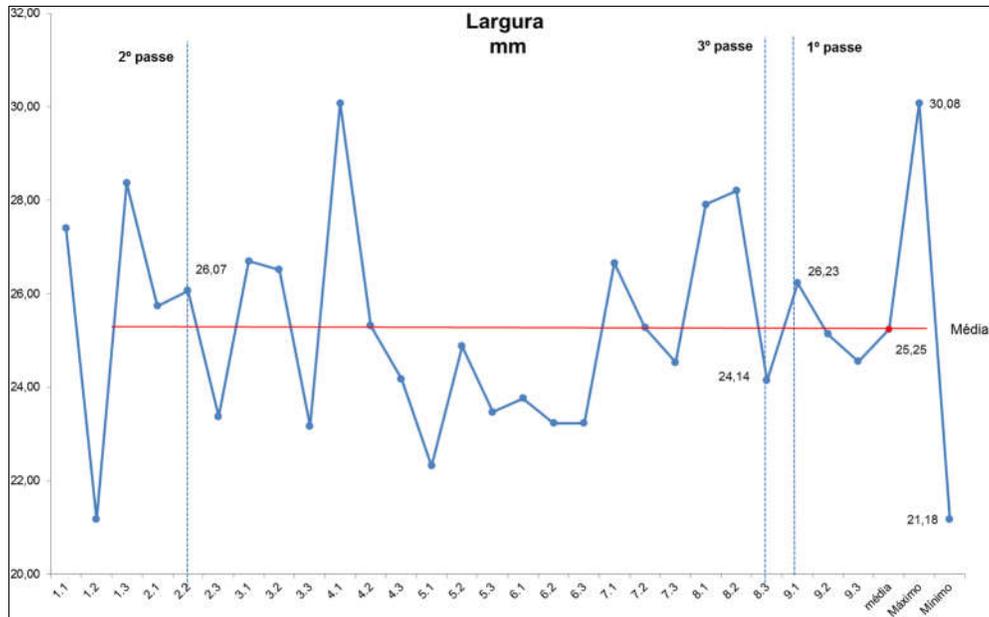
Os gráficos das figuras 63, 64, 65 e 66 apresentam de maneira mais clara os resultados das medições das áreas avaliadas e destacam os cordões de solda escolhidos para os três passes de soldagem. Além disso, mostra os valores, médios máximos e mínimos considerando as 27 amostras.

Figura 63 - Resultado das medições do reforço.



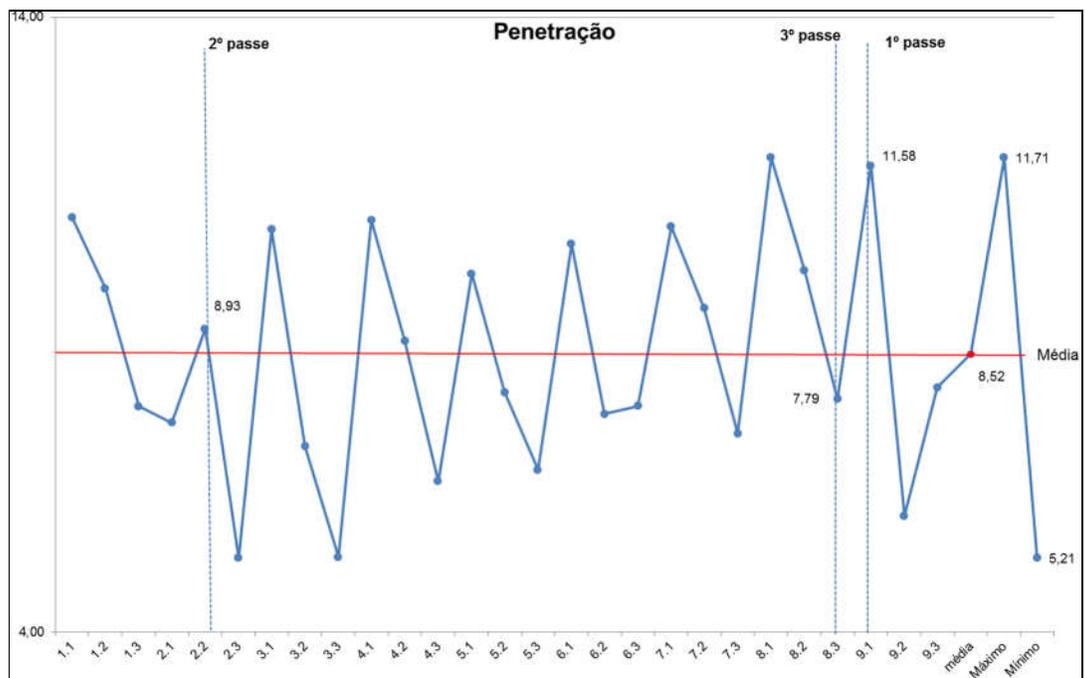
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 64 - Resultado das medições da largura.



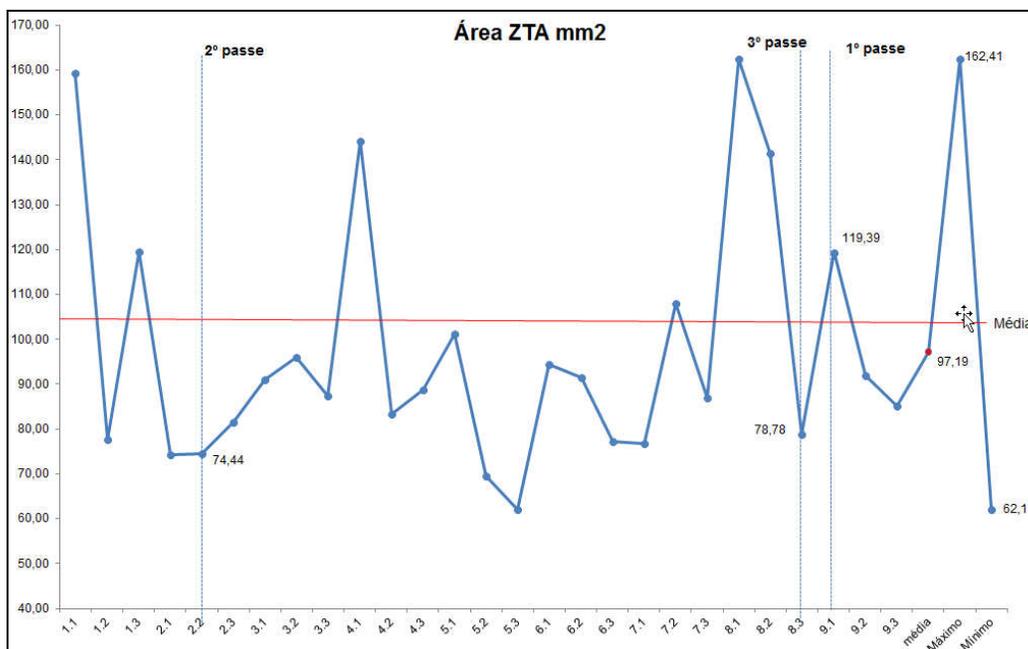
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 65 - Resultado das medições da penetração.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

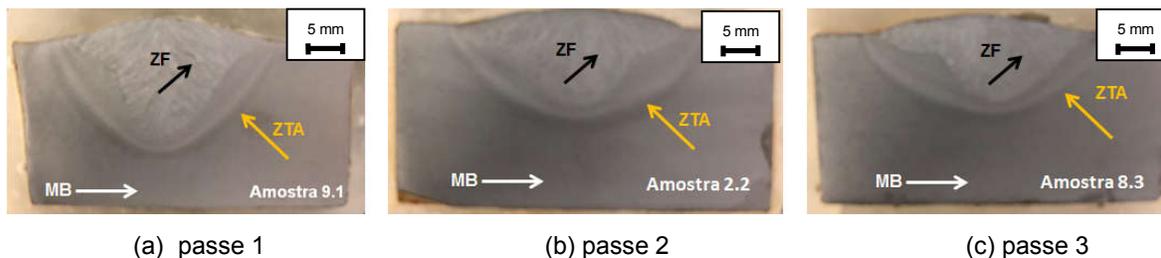
Figura 66 - Resultado das medições da área da ZTA.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

A figura 67 apresenta as fotos da macrografia dos cordões de solda selecionados pelo critério de avaliação da matriz de classificação. As características destaques para as amostras selecionadas foram as seguintes: Na amostra 9.1 foi atingida alta penetração e reforço. Na amostra 2.2 obteve-se uma largura e área de ZTA moderada. Por fim na amostra 8.3 foi encontrado moderado reforço e baixa área de ZTA.

Figura 67 - Macrografia da amostra 9.1, 2.2 e 8.3, respectivamente.

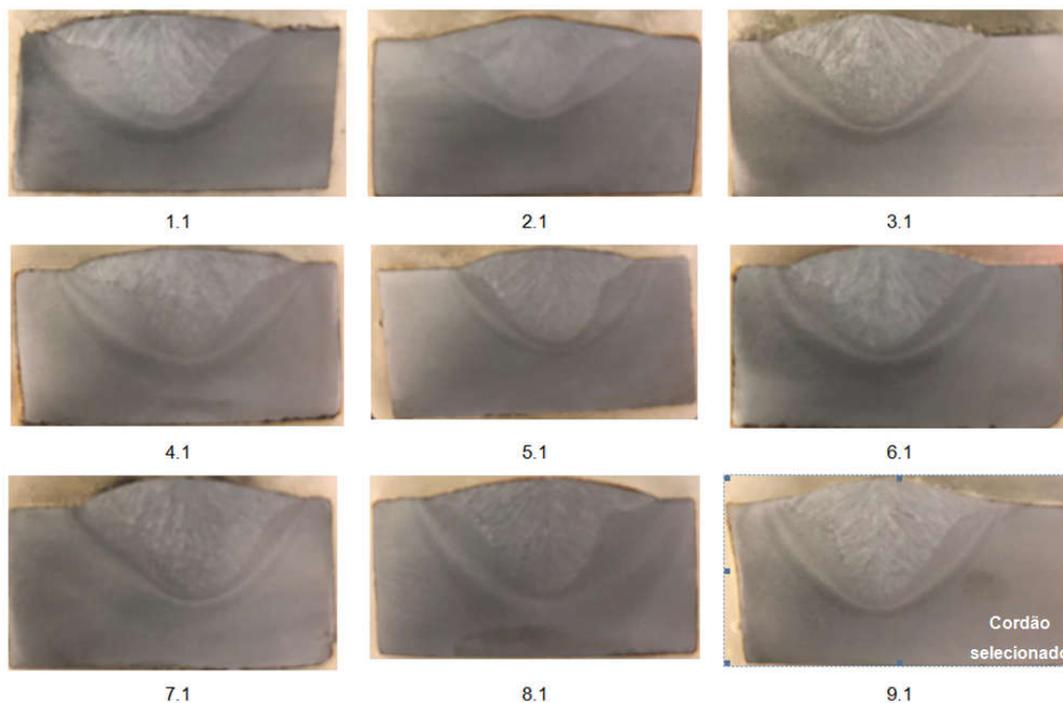


Fonte: Próprio Autor, 2019.

As figuras 68, 69 e 70 apresentam as fotos das macrografias dos cordões de solda dos passes 1, 2 e 3. É possível validar a variação dimensional das áreas de solda destes cordões, conforme já apresentado nas tabelas 17, 18 e 19. A variação da corrente de soldagem teve grande influência nas dimensões dos cordões. Observa-

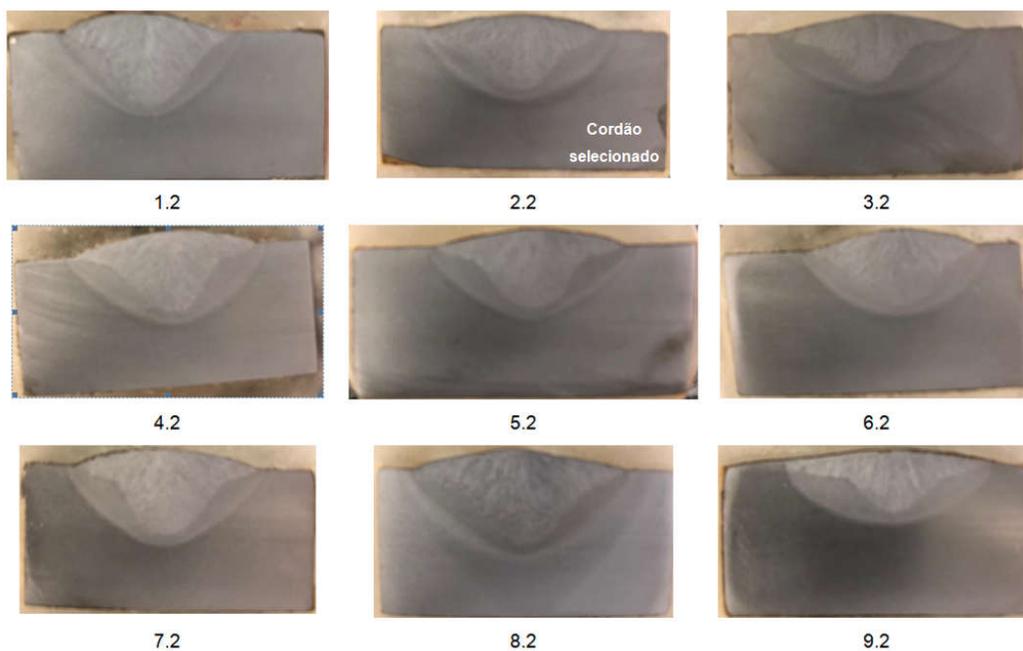
se que os cordões do passe #1 apresentaram maior reforço, largura e penetração visto que para estes cordões foram utilizados maiores valores de corrente (A).

Figura 68 - Macrografia dos cordões de solda do passe #1.

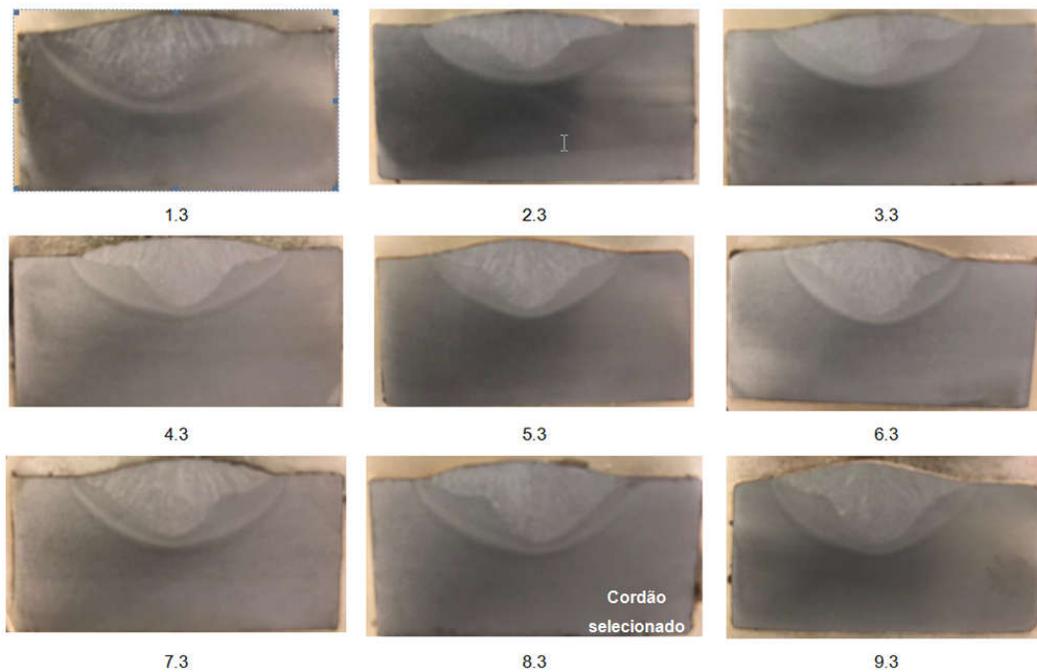


Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 69 - Macrografia dos cordões de solda do passe #2.



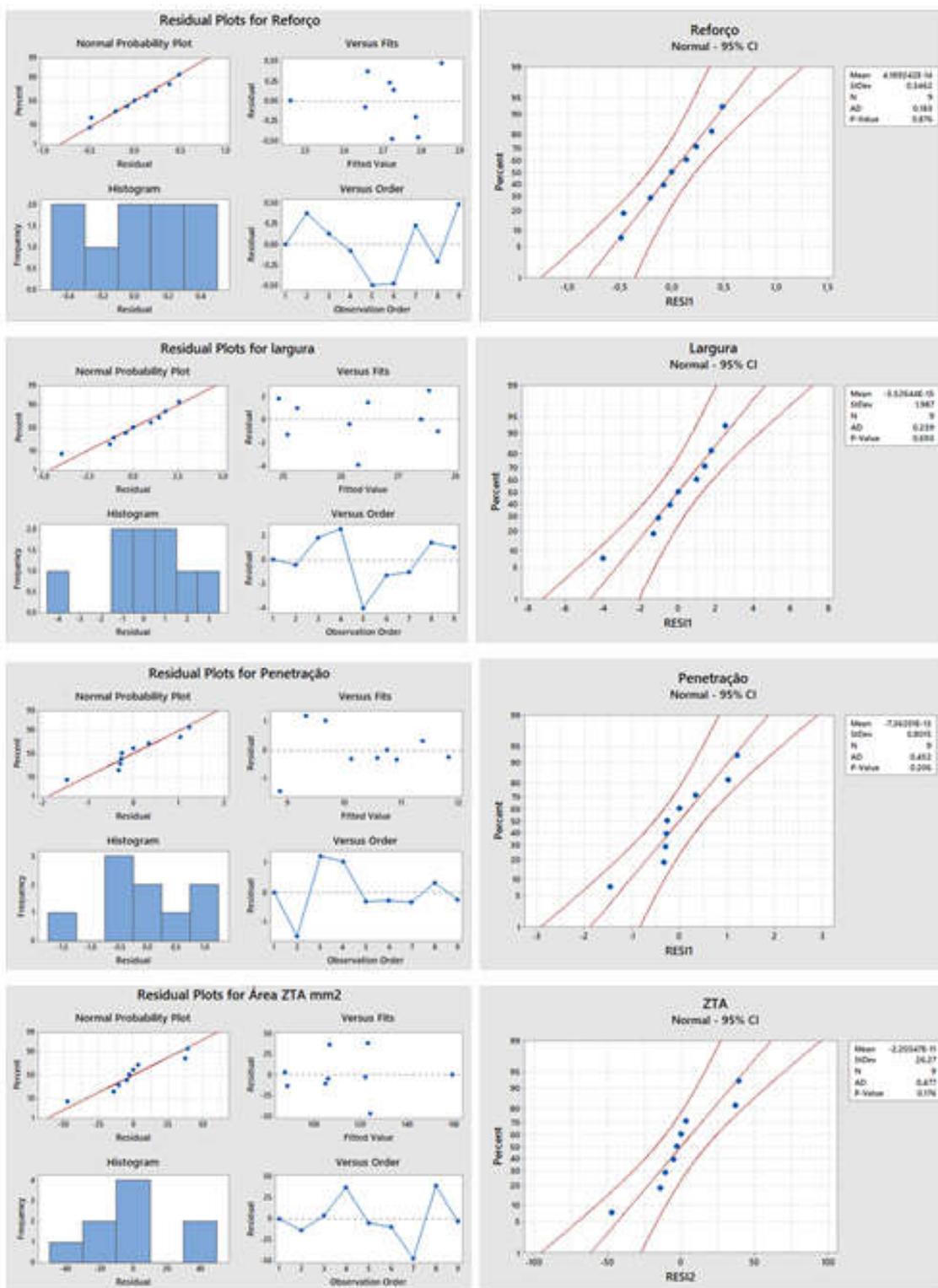
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 70 - Macrografia dos cordões de solda do passe #3.

Fonte: Próprio Autor, 2019.

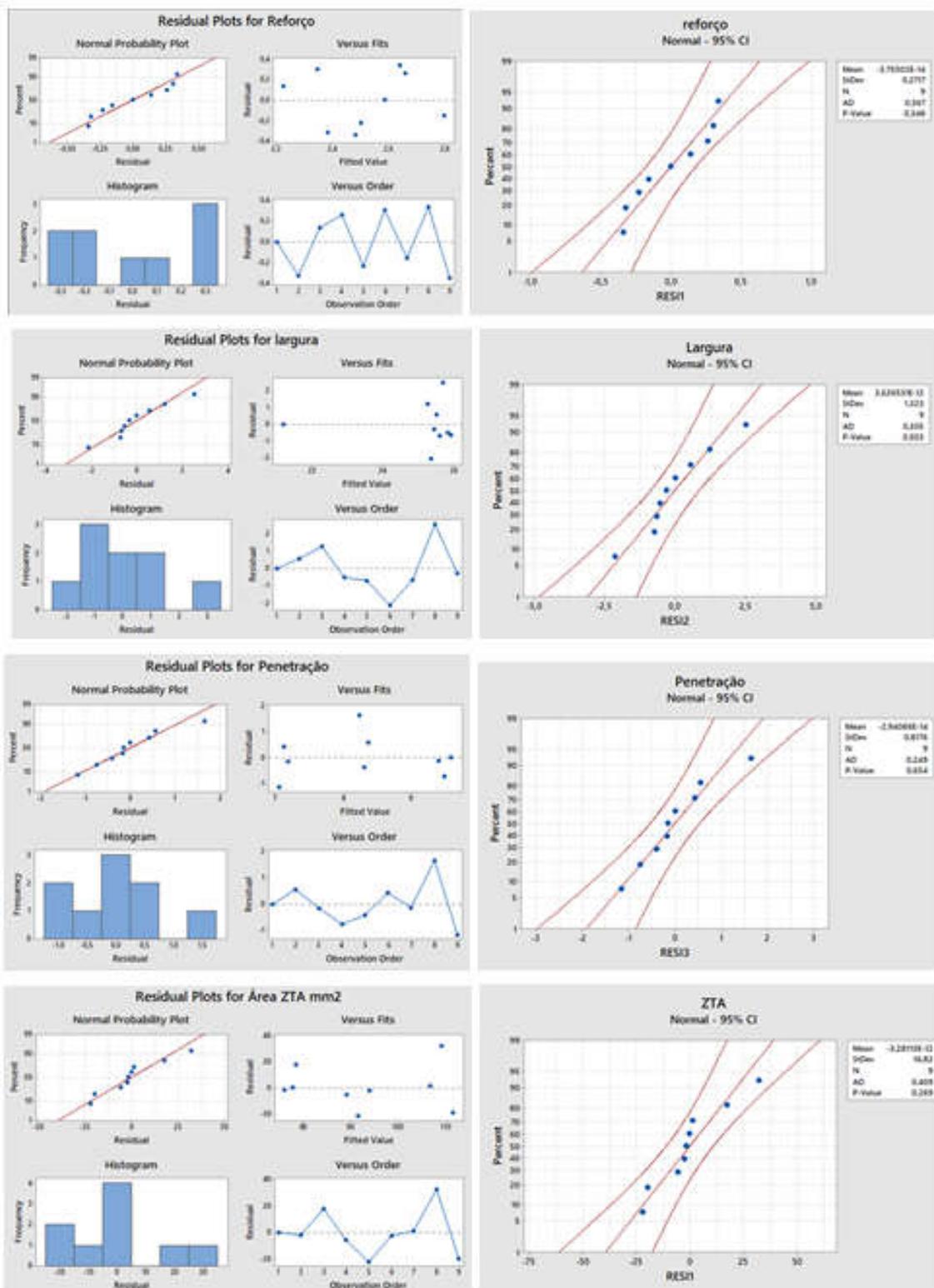
À medida que diminuía o valor de corrente, as dimensões dos cordões também diminuía de forma proporcional, é claro que a velocidade em conjunto gerou estes resultados. Foi verificado também por meio de análises estatísticas que todos os dados encontrados para medições realizadas seguem uma distribuição normal. As figuras 71 a 73 apresentam estes gráficos para as amostras do passe 1, 2 e 3.

Figura 71 - Gráficos das análises estatísticas dos cordões do passe 1.



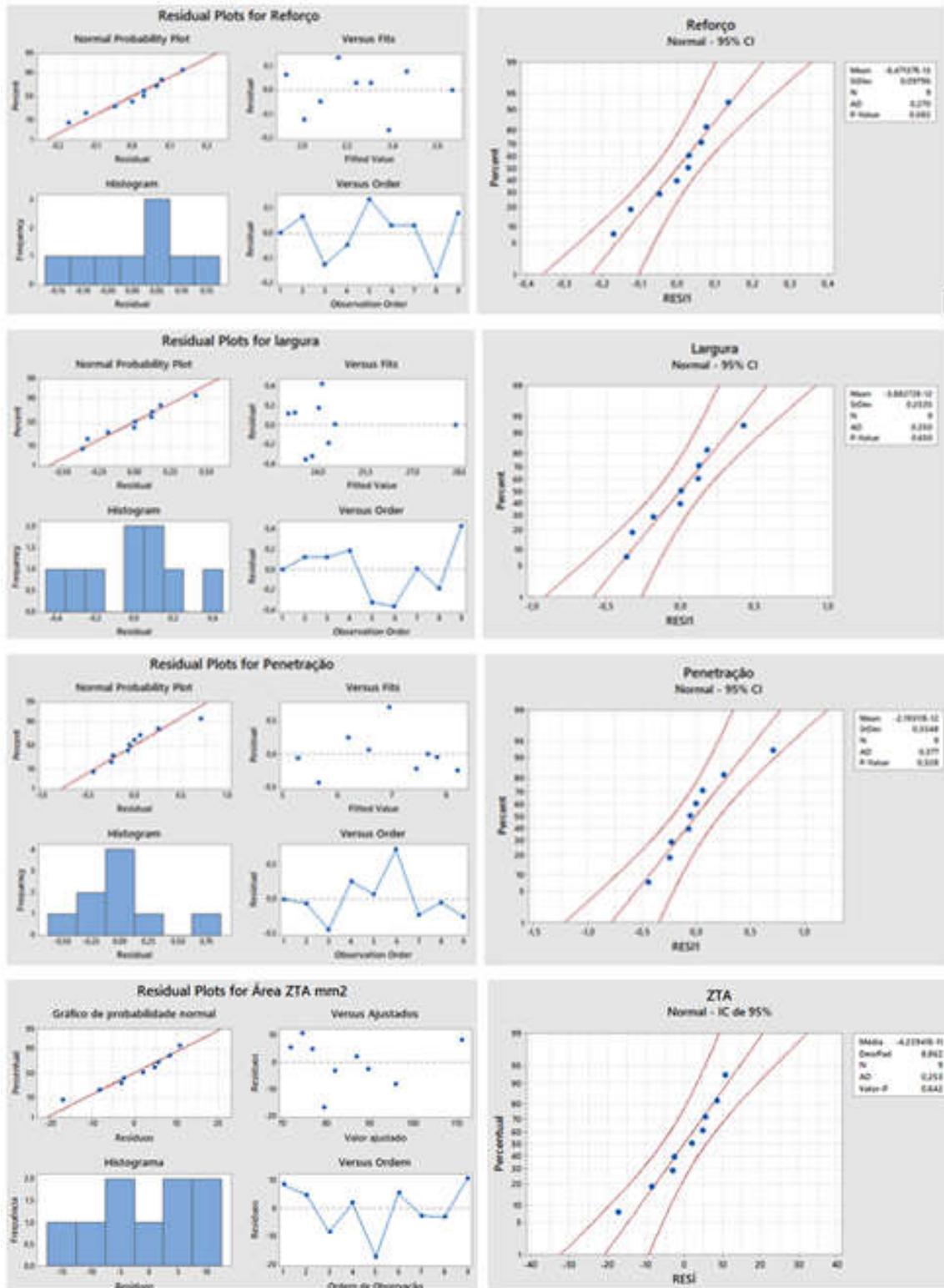
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 72 - Gráficos das análises estatísticas dos cordões do passe 2.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 73 - Gráficos das análises estatísticas dos cordões do passe 3.

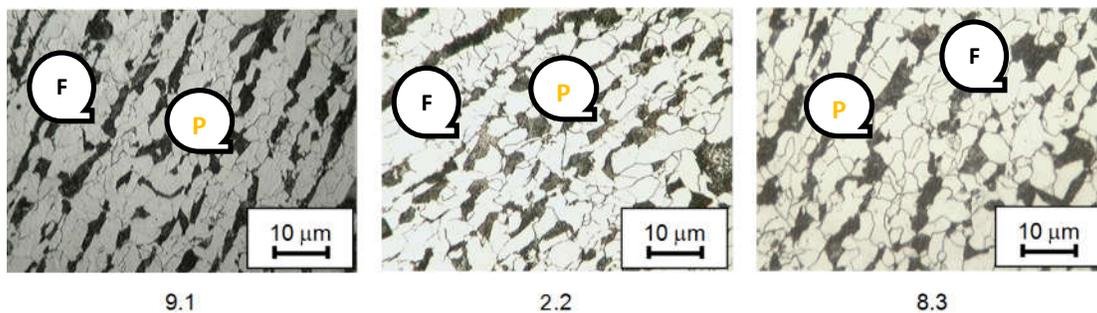


Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.2.3 Caracterização microestrutural

A figura 74 apresenta as imagens do MB das amostras 9.1 (passe 1), 2.2 (passe 2) e 8.3 (passe 3) que foram selecionadas no ensaio de macrografia. A microestrutura do MB destas amostras não apresentou variações, como já era esperado, O MB possui uma estrutura bandeada característica do processo de laminação a quente, tamanho de grão 8-9, presença de grãos de ferrita (F) e perlita (P), tais atributos estão de acordo com o material ASTM A572 grau 50 utilizado neste estudo.

Figura 74 - Imagens do metal de base realizadas no MO com aumento de 400X.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

De forma a resumir os resultados das micrografias dos vinte e sete corpos de prova, pode-se dizer que a zona fundida destas amostras apresentou alguns microconstituintes predominantes, onde tais características estão relacionadas a um resfriamento moderado e ao percentual ferrítico próeutetoide destas.

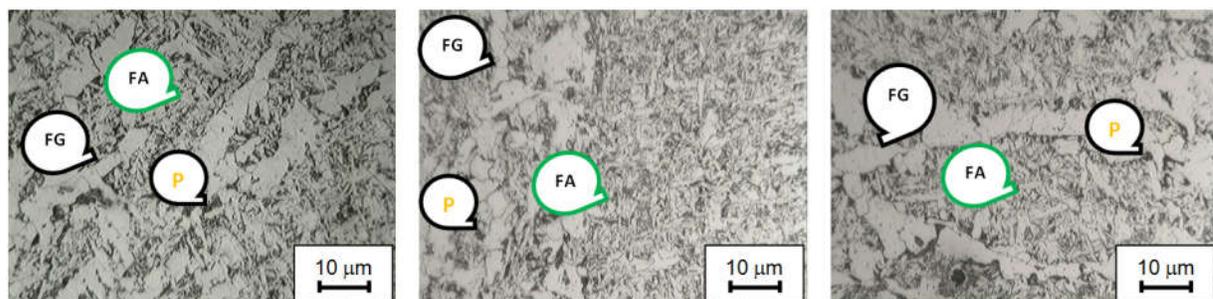
Na análise metalográfica qualitativa foi observado que todas as amostras apresentaram uma microestrutura predominante de ferrita de contorno de grão (FG), perlita (P) e 67% apresentou ferrita acicular (FA), que conforme BORBA et. al (2017) esta possui uma morfologia de agulhas nucleadas a partir de inclusões em relação aos demais constituintes. A figura 75 apresenta as imagens da ZF de três corpos de prova, referentes aos 3 passes de soldagem que foram escolhidos aleatoriamente para comprovar esta análise geral sob os corpos de prova soldados.

Também de forma geral a zona termicamente afetada destas mesmas três amostras apresentou um refinamento da microestrutura, o que torna a transição mais suave desta zona para o material base e predominantemente foi observado a perlita fina (P) e uma ferrita equiaxial (F'), que também de acordo com BORBA et. al (2017) tal

arranjo normalmente melhora a tenacidade dessa região. Foram observados também a ferrita com segunda fase alinhada (FSA) e não alinhada (FSN) no interior dos grãos. A figura 76 exemplifica estes microconstituintes na zona termicamente afetada.

Fazendo uma relação com a dureza encontrada para estas áreas das amostras em questão, nota-se que amostra 3.1 apresentou menores valores de dureza da ZF e ZTA tanto na vertical quanto na horizontal, o que explica a microestrutura refinada encontrada na ZTA. Já amostra 1.3 apresentou maior valor de dureza para a ZF, onde esta apresentou ferrita acicular e por fim a ZTA de maior dureza foi verificada na amostra 1.2 na posição vertical, onde foi verificado ferrita equaxial, ferrita com segunda fase alinhada (FSA) e não alinhada (FSN) no interior dos grãos.

Figura 75 - Imagens da zona fundida realizadas no MO com aumento de 400X.



ZF – Amostra 3.1 – Passe 1

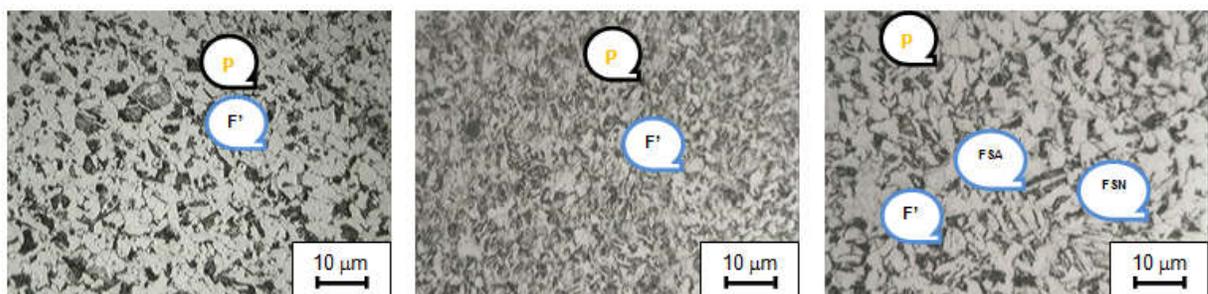
ZF – Amostra 1.2 – Passe 2

ZF – Amostra 1.3– Passe 3

Microestruturas na ZF, onde: FG (ferrita de contorno de grão), P (perlita) e FA (ferrita acicular).

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 76 - Imagens da zona termicamente afetada realizadas no MO com aumento de 400X.



ZTA – Amostra 3.1 – Passe 1

ZTA – Amostra 1.2 – Passe 2

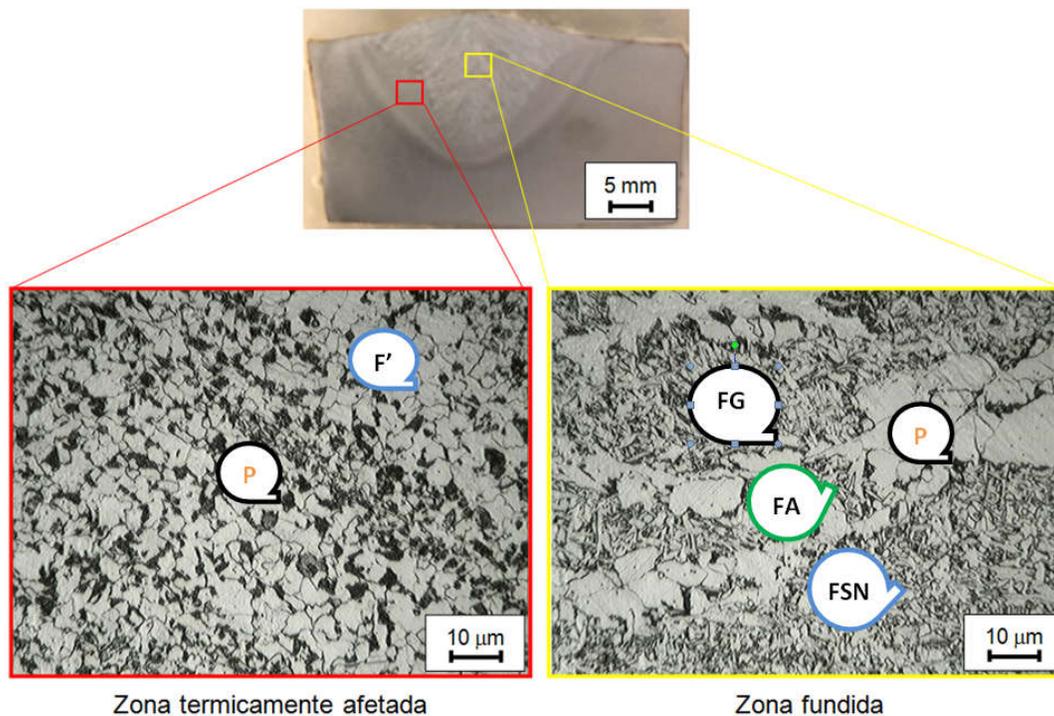
ZTA – Amostra 1.3– Passe 3

Microestruturas na ZTA, onde: Perlita (P), ferrita equaxial (F'), ferrita com segunda fase alinhada (FSA) e não alinhada (FSN).

Fonte: Próprio Autor, 2019.

As figuras 77, 79 e 80 trazem a micrografia da ZTA e ZF apresentada nas amostras 9.1, 2.2 e 8.3. Relembrando que estas amostras foram selecionadas no ensaio de macrografia por apresentarem dimensões favoráveis a viga soldada. Os microconstituintes verificados nestas amostras são adequados para metais de solda C-Mn, material utilizado neste trabalho.

Figura 77 - Micrografia da ZTA e ZF da amostra 9.1 realizadas no MO com aumento de 400X.

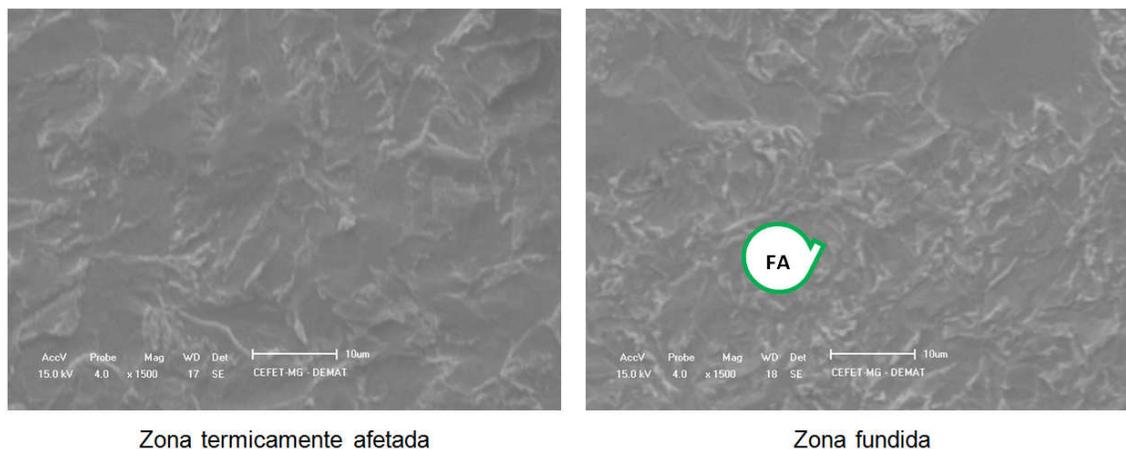


Microestruturas na ZTA: Perlita (P), ferrita equaxial (F'). **Microestruturas na ZF:** ferrita de contorno de grão (FG), perlita (P), ferrita acicular (FA), ferrita com segunda fase não alinhada (FSN).

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A figura 78 apresenta as imagens da ZTA e ZF realizadas no MEV, para fins de comparação é possível observar na ZF a presença da ferrita acicular (FA).

Figura 78 – Micrografia da ZTA e ZF da amostra 9.1 realizada no MEV com aumento de 1200X.

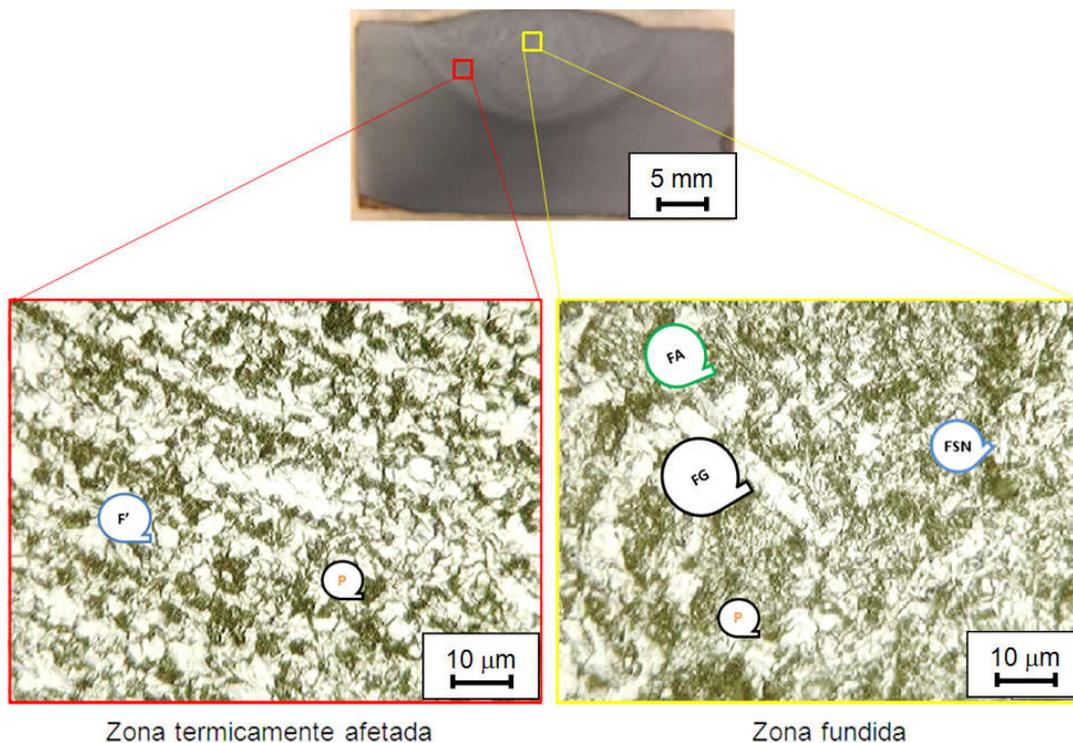


Zona termicamente afetada

Zona fundida

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 79 - Micrografia da ZF e ZTA da amostra 2.2 realizadas no MO com aumento de 400X.



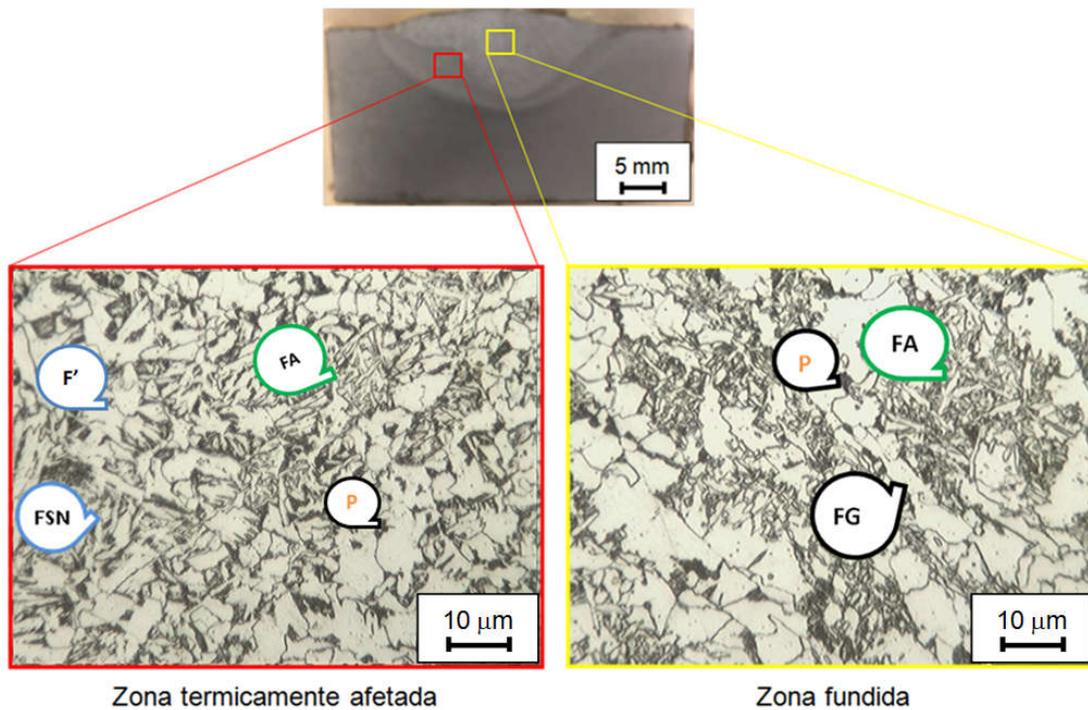
Zona termicamente afetada

Zona fundida

Microestruturas na ZTA: Perlita (P), ferrita equiaxial (F'). **Microestruturas na ZF:** ferrita acicular (FA), ferrita de contorno de grão (FG), ferrita com segunda fase não alinhada (FSN), perlita (P). Fonte: Próprio Autor, 2019.

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 80 - Micrografia da ZF e ZTA da amostra 8.3 realizadas no MO com aumento de 400X.

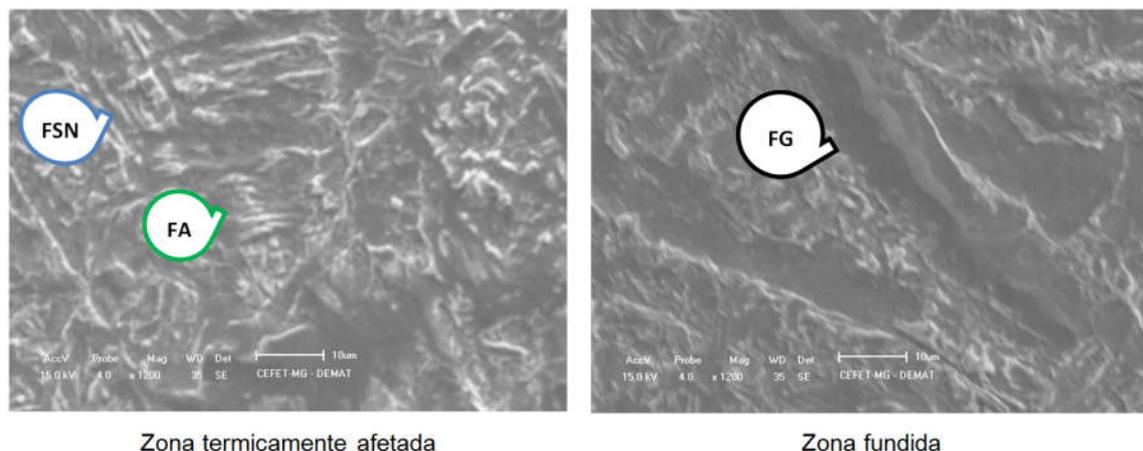


Microestruturas na ZTA: Perlita (P), ferrita equiaxial (F'), ferrita acicular (FA), ferrita com segunda fase não alinhada (FSN). **Microestruturas na ZF:** ferrita acicular (FA), ferrita de contorno de grão (FG), perlita (P).

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A figura 81 apresenta as imagens da ZTA e ZF realizadas no MEV, para fins de comparação é possível observar na ZF a presença da ferrita acicular (FA).

Figura 81 - Micrografia da ZTA e ZF da amostra 8.3 realizada no MEV com aumento de 1200X.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

De acordo com as imagens apresentadas nas figuras 77 à 81 pode-se inferir que a microestrutura observada para a ZF e ZTA são típicas para material C-Mn e que microconstituintes como ferrita acicular (FA) foram verificados na ZF e ZTA, e da transição da ZF para ZTA apresentou um refinamento da estrutura grosseira da ZF, formando ferrita equiaxial (F) e perlita (P) o que, normalmente, melhora a tenacidade dessa região.

5.2.4 Caracterização mecânica

O ensaio de dureza possui relação direta com a resistência mecânica e também com a vulnerabilidade à ocorrência de trincas induzidas localmente por hidrogênio. A média de dureza para o metal de base encontrada no mapeamento vertical e horizontal para amostras do passe 1 foi de 189 HV. Para o passe 2 a média encontrada no mapeamento vertical foi de 181 HV e horizontal foi de 184 HV. Para o passe 3 foi de a média encontrada no mapeamento vertical foi de 189 HV e horizontal foi de 188 HV. Não houve diferenças significativas nos valores de dureza encontrados na posição vertical e horizontal e também entre as soldas dos passes 1, 2 e 3.

Já para a zona fundida a média de dureza encontrada no mapeamento vertical do passe 1 foi de 208 HV e horizontal foi de 214 HV. Para o passe 2 a média encontrada no mapeamento vertical foi de 213 HV e horizontal foi de 214 HV. Para o passe 3 foi de a média encontrada no mapeamento vertical foi de 221 HV e horizontal foi de 216 HV. Não foram encontradas diferenças significativas nos valores de dureza encontrados na posição vertical e horizontal e entre as soldas dos passes 1, 2 e 3.

Considerando que o MB das amostras possui média de dureza de (181-189 HV), as zonas fundidas das mesmas amostras apresentam em média (213-221 HV), sendo esta com resistência superior ao MB.

Para a zona termicamente afetada a média de dureza encontrada no mapeamento vertical do passe 1 foi de 203 HV e horizontal foi de 209 HV. Para o passe 2 a média encontrada no mapeamento vertical foi de 202 HV e horizontal foi de 203 HV. Para o passe 3 foi de a média encontrada no mapeamento vertical foi de 207 HV e

horizontal foi de 210 HV. Também não foram encontradas diferenças significativas nos valores de dureza encontrados na posição vertical e horizontal e entre as soldas dos passes 1, 2 e 3.

Os maiores valores médios de dureza encontrados foram nas zonas fundidas, tanto para o mapeamento vertical, quanto para o horizontal. A composição química do material C-Mn contribui para formação do tipo de microestrutura da ZF, conforme figura 65. Conforme Wainer, Brandi e Mello (2011) pode-se relacionar a geometria da poça de fusão com a transferência de calor no MB. Os cordões soldados deste estudo apresentaram-se com formato de gota ao longo da interface sólido e líquido, e devido a este formato, possui no centro do cordão um gradiente menor que nas bordas, o que faz com que o centro do cordão tenha um super-resfriamento. A figura 82 representa este gradiente térmico no cordão de solda.

Figura 82 - Formato em gota dos cordões de solda.



Fonte: Adaptado Wainer; Brandi e Mello (2011, p.134).

A figura 84 apresenta a média da dureza encontrada para as amostras do passe 1 na posição vertical e horizontal respectivamente.

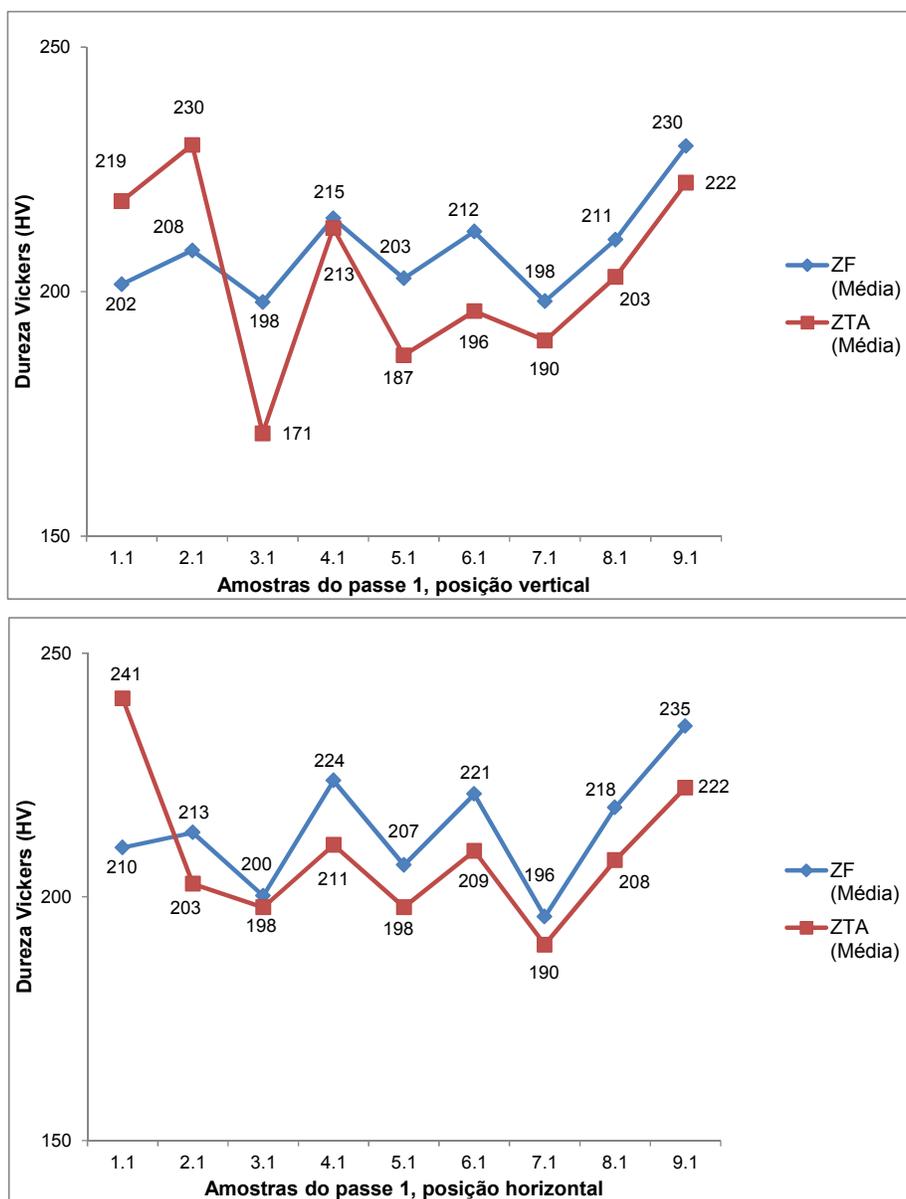
Por fim foram encontrados alguns pontos de maior dureza em algumas amostras, os quais foram medidos na transição da ZF para a ZTA, na amostra 6.1, por exemplo, foi verificada uma dureza no valor de 253 HV nesta área de transição, conforme mostrado na figura 83.

Figura 83 - Ponto de medição de dureza da amostra 6.1 na área de transição de ZF para ZTA.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 84 – Média do perfil de dureza vertical e horizontal para as amostras do passe 1.



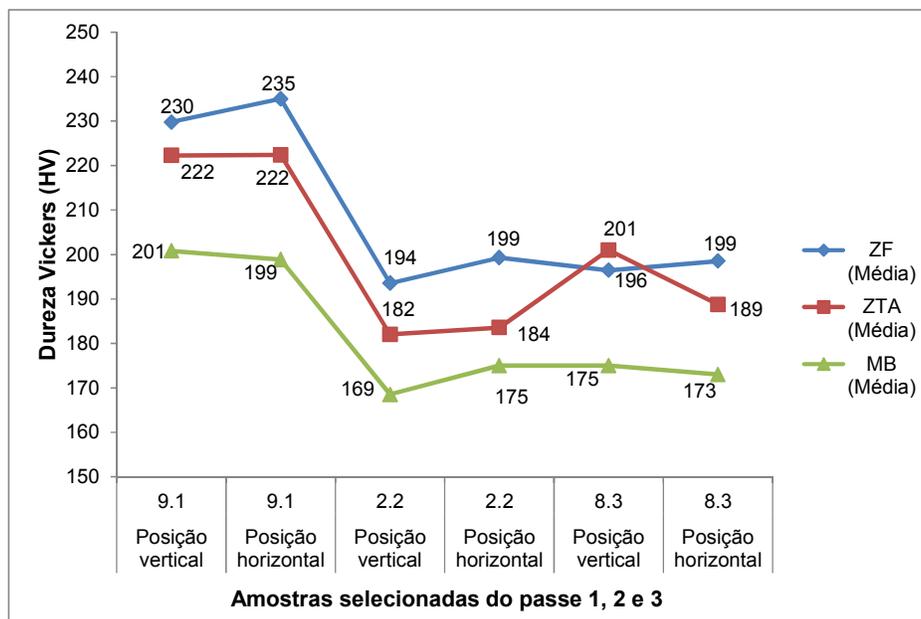
Fonte: Próprio Autor, 2019.

O maior valor de dureza encontrada nas amostras foi 241 HV, verificado na amostra 1.1 na posição horizontal e na amostra 7.2 na posição vertical. A norma AWS D1.1-2004, p.299 assume que trincas a frio induzidas por hidrogênio na ZTA não irão ocorrer se a dureza da ZTA for mantida abaixo do valor crítico, menor que 350 HV, sendo assim, todas as amostras em questão estão bem abaixo deste valor crítico.

Os valores médios verificados para ZTA estão abaixo da ZF, este fato pode ser explicado também pelos microconstituintes verificadas para ZTA, onde maiores valores de dureza foram verificados para grãos mais grosseiros e amostras com presença de ferrita acicular, já para menores valores associa-se a grão mais refinados próximos a microestrutura do MB e também devido a presença da ferrita poligonal.

Ainda para o ensaio de dureza foi verificado o resultado das amostras 9.1 do passe 1, 2.2 do passe 2 e 8.3 do passe 3 selecionadas no ensaio de macrografia. A figura 83 apresenta o resultado de dureza destas amostras que também apresentaram os resultados já expostos acima para os demais corpos de prova. Destas amostras a 9.1 apresentou maiores valores de dureza, 230 HV na posição vertical e 235 HV na posição horizontal, onde ambas as durezas foram verificadas na ZF. Conforme figura 77 a ZF desta amostra apresentou a ferrita acicular (FA) e ferrita com segunda fase não alinhada (FSN) em vários pontos da amostra.

Figura 85 - Média do perfil de dureza vertical e horizontal para as amostras selecionadas.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.3 Soldagem final em amostra de viga perfil I

Com os parâmetros propostos na tabela 10, após preparação e montagem das chapas, conforme previsto no item 4.5.1, foi realizada a soldagem final da amostra da viga perfil I. A viga foi soldada nos quatros lados conforme demonstrado na figura 86 que apresenta imagem da amostra da viga perfil I soldada.

Figura 86 - Amostra da viga perfil I após soldagem final.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

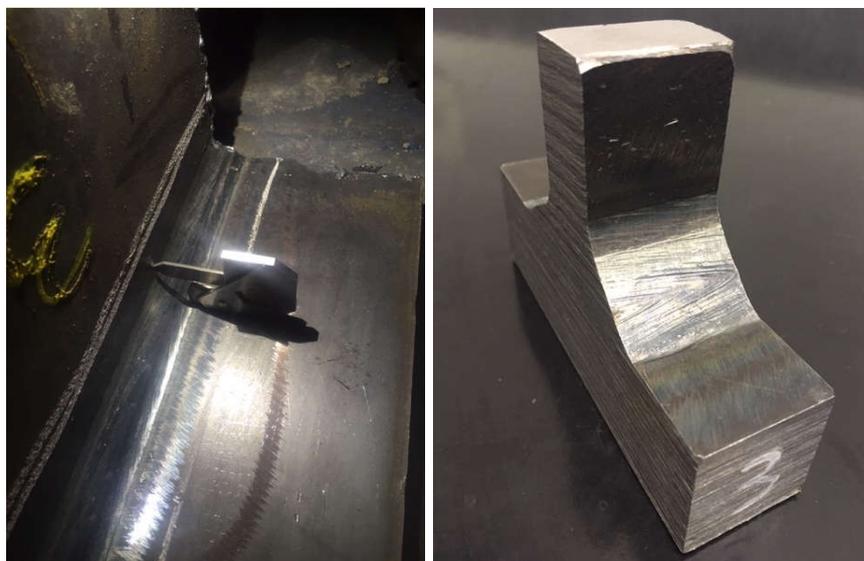
5.3.1 Ensaio visual do cordão de solda da soldagem final em amostra de viga perfil I

As juntas soldadas foram 100% avaliadas. O aspecto da solda foi avaliado quanto a possíveis descontinuidades superficiais. Durante a inspeção visual dos cordões de solda, não foi verificado defeitos como: mordeduras, porosidades, respingos excessivos, falta de fusão e trincas. A figura 87 apresenta a foto da amostra soldada.

Figura 87 - Filete final de solda.

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A média obtida na medição da perna das soldas foi de aproximadamente 18 mm, e a garganta em média 11.31 mm, dentro da faixa estabelecida pelo projeto, conforme mencionado na metodologia experimental no item 4.3.2. A figura 88 (a) apresenta a medição do filete, nesta inspeção foi avaliado também e o perfil do filete da solda, e conforme figura 88 (b) apresentou um perfil ligeiramente convexo, com máxima convexidade próxima de zero, mais próximo de um perfil “desejável” conforme determinado na norma AWS D1.1 - 2004 item 5.24.

Figura 88 - Medição realizada no filete final de solda e perfil do filete de solda.

(a) medições do cordão

(b) perfil do filete de solda

Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.3.2 Caracterização macroestrutural

A figura 89 apresenta as macrografias das amostras da soldagem. A solda se apresenta de forma homogênea e sem a presença de descontinuidades como: mordeduras, porosidades, respingos excessivos, falta de fusão, trincas. Ainda nesta figura são mostradas as regiões do cordão de solda MB, ZF e ZTA.

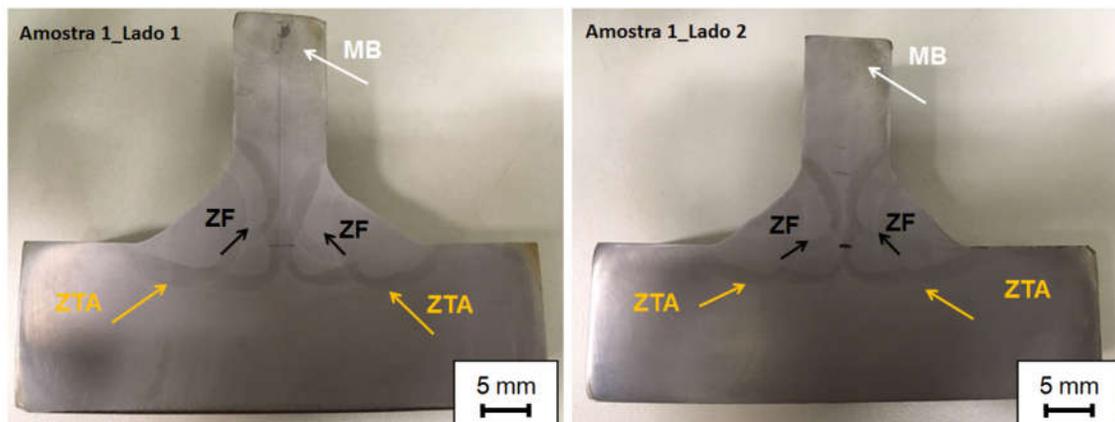


Figura 89 - Macrografia da amostra final.

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Foi feita a medição da penetração do cordão de solda em ambos os lados da junta, lado esquerdo e direito. A figura 90 apresentam as cotas realizadas nas macrografias das amostras 1. A figura 91 apresenta os dados de penetração medidos nestas juntas, onde maiores valores de penetração foram verificados no lado direito da aba superior para altura da penetração e do lado esquerdo da aba inferior para a largura da penetração.

Figura 90 – Macrografia da amostra 1 aba superior e inferior, respectivamente.

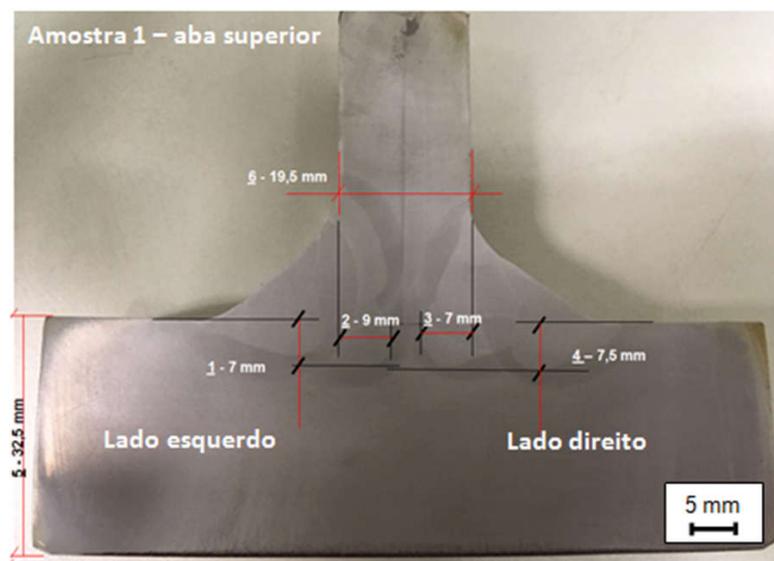
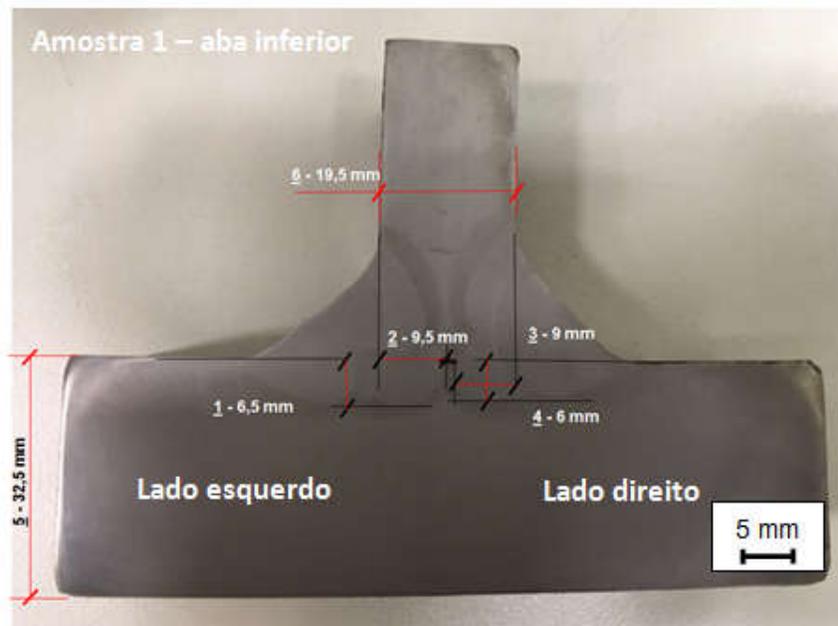
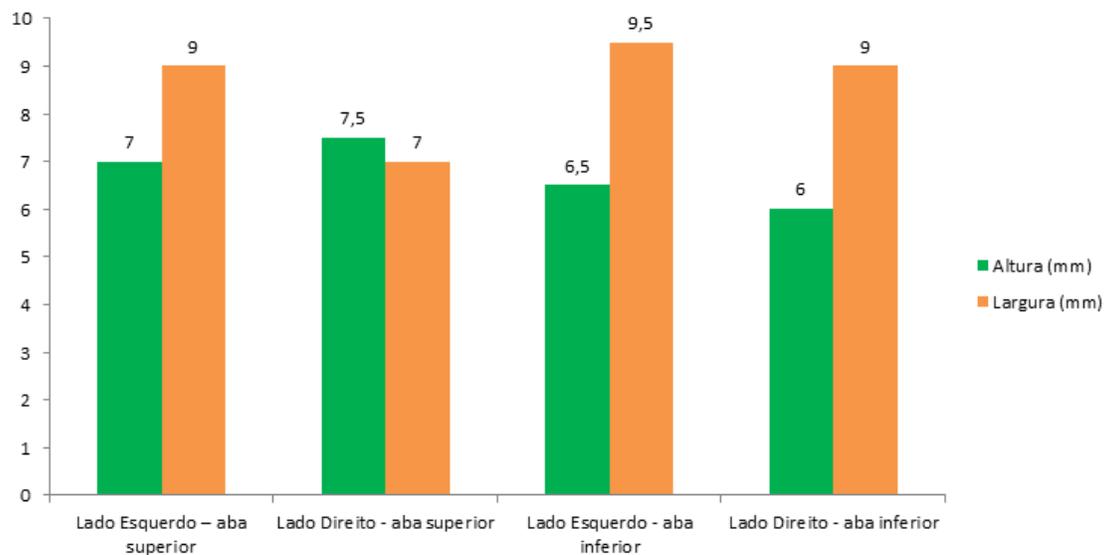


Figura 90 - Macrografia da amostra 1 aba superior e inferior – Continuação.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 91 - Dados de penetração da amostra 1.



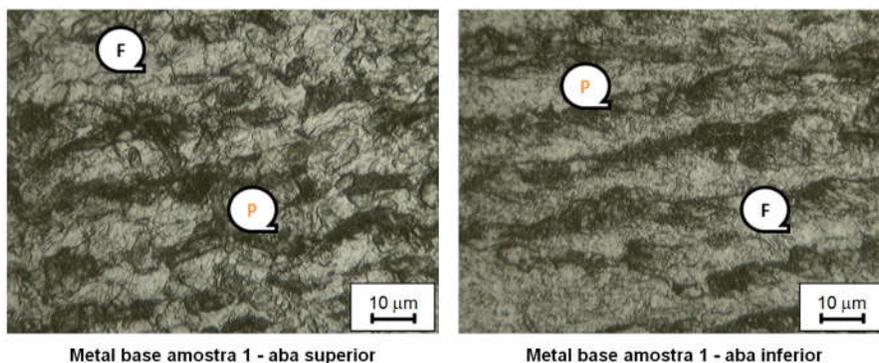
Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.3.3 Caracterização microestrutural

Neste ensaio foi verificada a microestrutura da amostra 1, aba superior e inferior com auxílio de um microscópio ótico (MO) com aumento de 400X. A figura 92

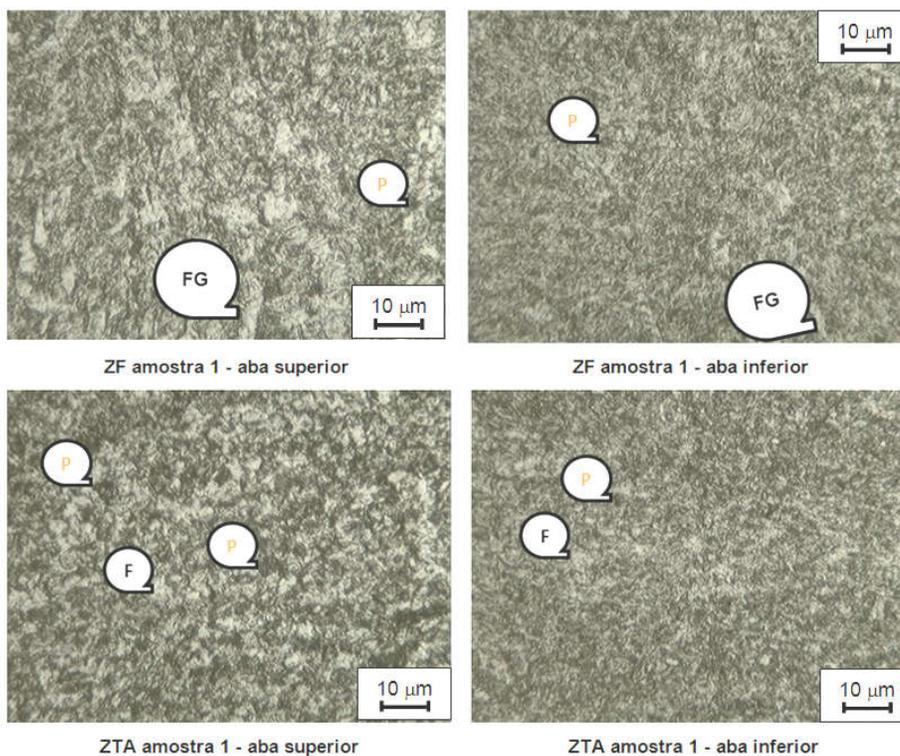
apresenta o metal de base destas duas amostras. Pode ser verificado que o MB possui basicamente grãos de ferrita (claros) e perlita (escuros). O material possui estrutura bandeada característica do processo de laminação a quente. A zona fundida (ZF) foi observada com ferrita de contorno de grão (FG) com alguns pontos de perlita. Na região da ZTA foi verificada uma microestrutura mais refinada com ferrita e alguns pontos com perlita. A figura 93 apresenta as micrografias das áreas avaliadas da amostra 1, aba superior e inferior.

Figura 92 - Micrografia do metal de base da amostra 1 observadas no MO.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 93 - Micrografia da ZF e ZTA da amostra 1 observadas no MO.

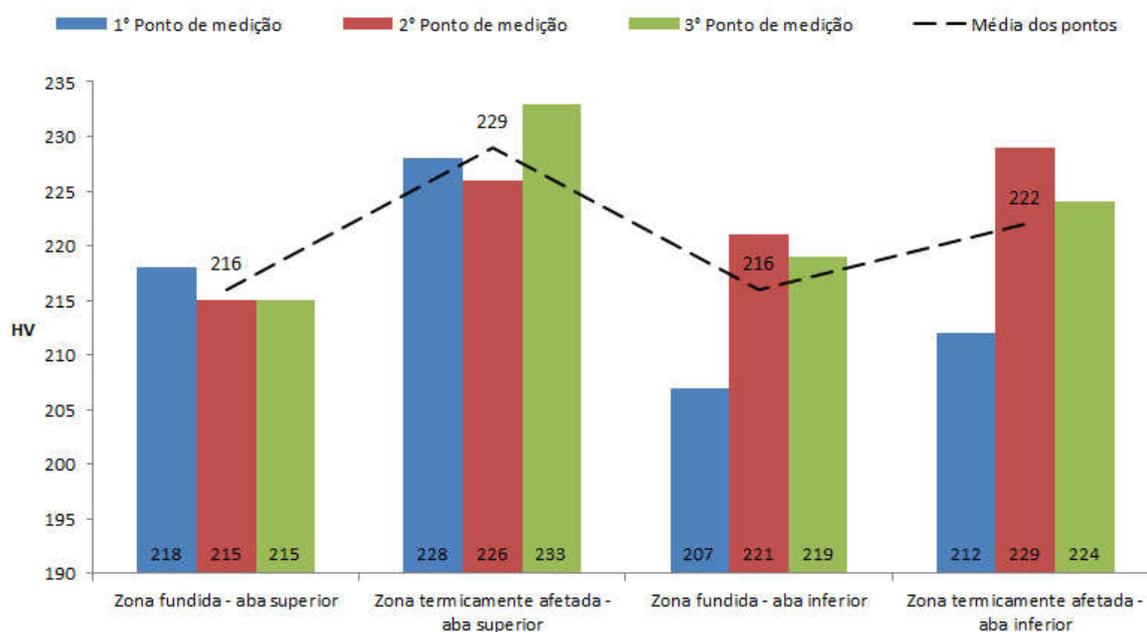


Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.3.4 Caracterização mecânica

Neste ensaio foi verificado a dureza das áreas de solda para amostra 1 na aba superior e inferior. A figura 33 ilustra como os pontos de medição foram realizados. No metal base foi encontrada a média das medições no valor de 161 HV. A figura 94 apresenta os resultados das medições de dureza das áreas de ZF e ZTA e seus respectivos valores médios. Nota-se que os maiores valores de dureza foram verificados na ZTA de ambas as abas da viga.

Figura 94 - Resultados do ensaio de microdureza da amostra 1 aba superior e inferior.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.4 Análise Comparativa

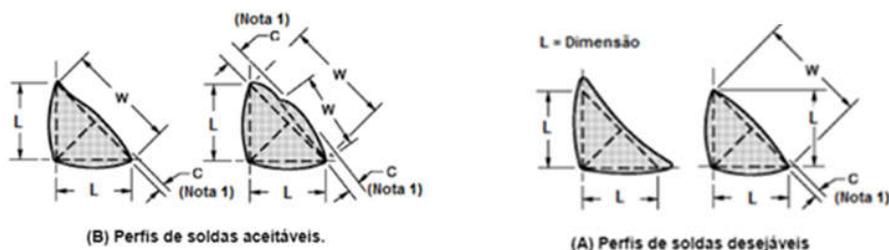
Neste item serão comparados os resultados da soldagem preliminar em viga perfil I da 1ª etapa com a soldagem final em amostra de viga perfil I referente à 3ª e última etapa deste trabalho.

5.4.1 - Ensaio visual do cordão de solda

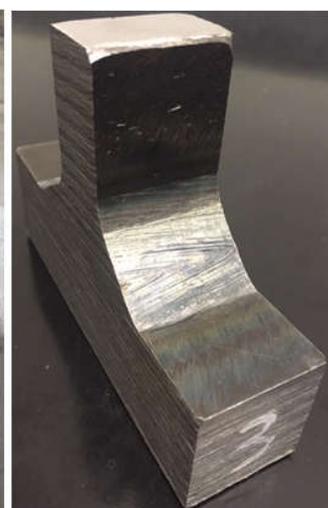
De maneira geral os resultados de ambas as soldas atingiram as especificações de

projeto e norma, seja para os valores de perna, garganta e convexidade. Um ponto positivo para a soldagem final foi com relação ao perfil do filete proposto pela a norma AWS D1.1 que no caso da soldagem final apresentou um perfil mais próximo do perfil desejável (menor convexidade) que o filete da solda preliminar. A figura 95 apresenta esta comparação, onde o filete de solda da primeira etapa é mais próximo do perfil de solda aceitáveis e o filete de solda da última etapa é mais próximo do perfil de solda desejáveis.

Figura 95 - Comparação do perfil do filete de solda.



(a) Filete de solda da primeira etapa



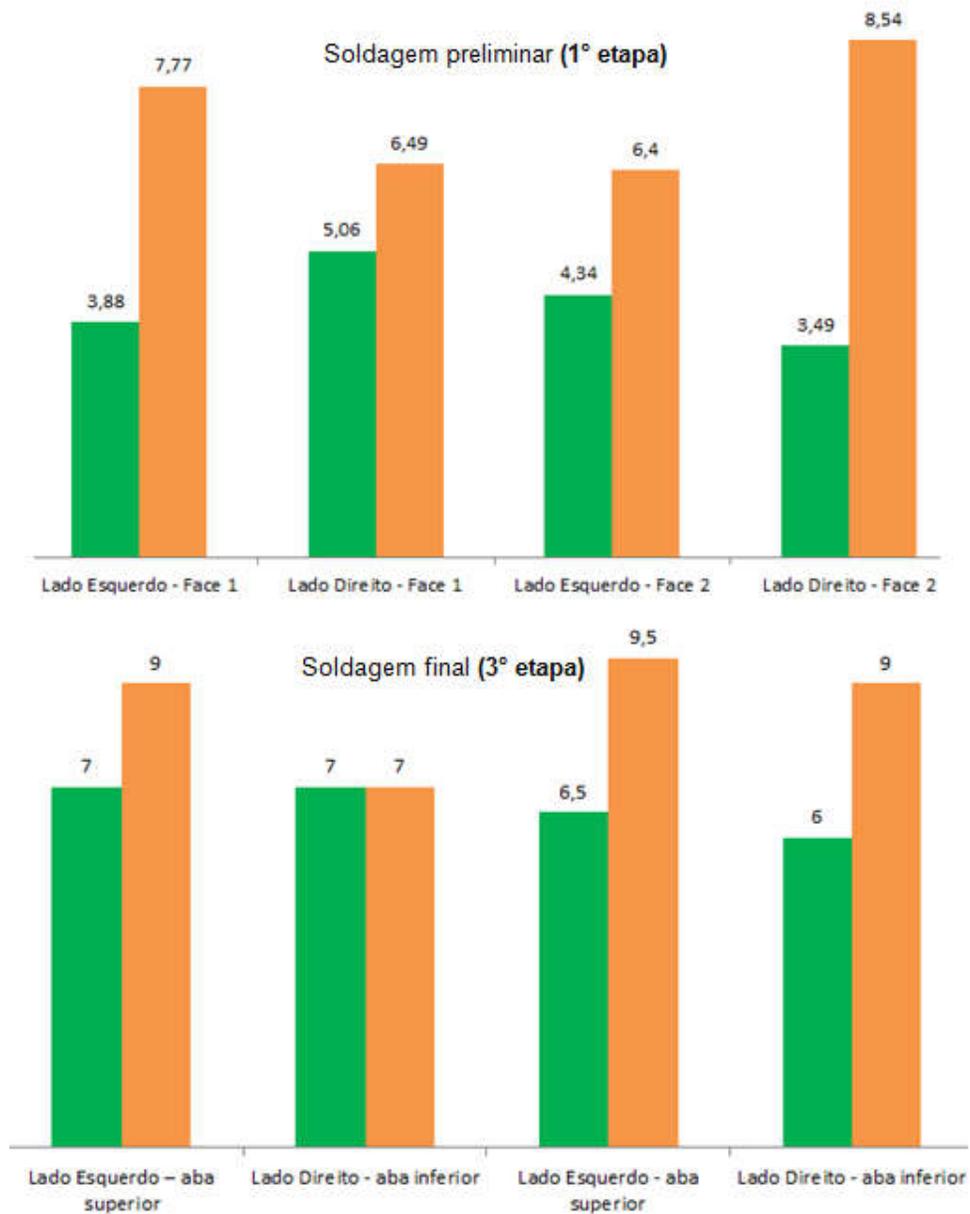
(b) - terceira etapa

Fonte: Adaptado norma AWS D1.1/D1.1M: 2004, (figura 5.4 do item 5.24, p. 198) e próprio Autor, 2019.

5.4.2 - Caracterização macroestrutural

Quando comparado os valores de penetração medidos na soldagem preliminar (1ª etapa) e na soldagem final (3ª etapa), conclui-se que na soldagem final obteve-se maior penetração. A figura 96 compara os valores encontrados em (mm) para as amostras analisadas.

Figura 96 - Penetração da soldagem preliminar (1º etapa) X soldagem final (3º etapa).

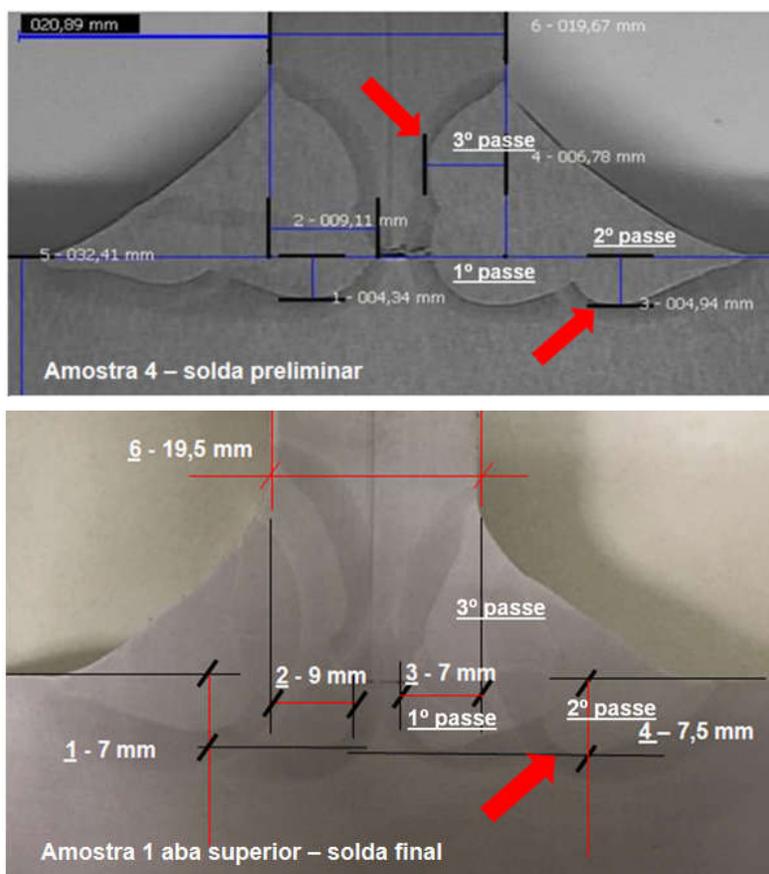


Fonte: Próprio Autor, 2019.

Além desta comparação entre duas amostras de cada soldagem, foi possível comparar a macrografia de mais seis juntas da soldagem preliminar com estas duas amostras da soldagem final e em todas elas a amostra final apresentou vantagem sob a característica de penetração, inclusive sendo a soldagem final mais eficaz, considerando que a maior penetração foi observada no 1º passe (raiz) em ambas as amostras da soldagem final o que é extremamente positivo, pois com este passe garante-se que a união obteve maior penetração, garantido a união entre alma e

abas da viga de forma homogênea, o que nem sempre ocorreu para soldagem preliminar, onde a figura 97 mostra que a maior penetração do lado direito da viga ocorreu no 2º passe (enchimento) e no 3º passe (acabamento) e a penetração do 1º passe (raiz) foi inferior. A mesma figura mostra também a amostra 1 aba superior da solda final onde este mesmo fato ocorreu porém o passe de raiz ainda penetrou bem próximo (diferença menor que 0,5mm) do 2º passe (enchimento). Ainda o pior caso é quando esta maior penetração ocorre no 3º passe (acabamento), o que não ocorreu na soldagem final, mas se repetiu em algumas juntas da soldagem preliminar.

Figura 97 – Penetração da solda preliminar X solda final fora do passe de raiz.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Através da tabela 23, verifica-se que na soldagem preliminar que pelo menos um lado de cada junta apresentou maior penetração fora do 1º passe (raiz). A maioria das juntas apresentou maior penetração no 3º passe (acabamento), onde já não é benéfica para união das partes, pois neste local não há junção de abas e alma.

Tabela 21 - Valores de penetração de demais amostras da soldagem preliminar.

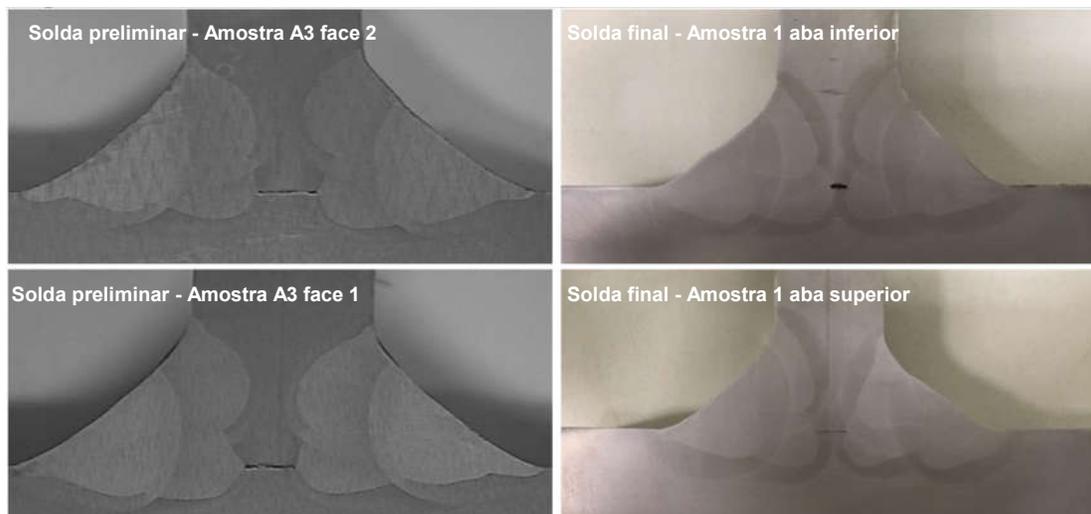
Amostras da solda preliminar	Altura (mm)	Largura (mm)
Amostra 1 - Lado Esquerdo Face 1	4,00 (1º passe)	8,64 (1º passe)
Amostra 1 - Lado Direito Face 1	5,38 (1º passe)	6,93 (3º passe)
Amostra 1 - Lado Esquerdo Face 2	4,81 (1º passe)	7,03 (3º passe)
Amostra 1 - Lado Direito Face 2	4,07 (1º passe)	8,35 (1º passe)
Amostra 2 - Lado Esquerdo Face 1	5,66 (2º passe)	7,10 (1º passe)
Amostra 2 - Lado Direito Face 1	4,34 (1º passe)	8,32 (1º passe)
Amostra 2 - Lado Esquerdo Face 2	4,77 (1º passe)	8,33 (1º passe)
Amostra 2 - Lado Direito Face 2	5,81 (2º passe)	6,25 (1º passe)
Amostra 3 - Lado Esquerdo Face 1	3,88 (1º passe)	7,77 (1º passe)
Amostra 3 - Lado Direito Face 1	5,06 (1º passe)	6,49 (3º passe)
Amostra 3 - Lado Esquerdo Face 2	4,34 (1º passe)	6,40 (3º passe)
Amostra 3 - Lado Direito Face 2	3,49 (1º passe)	8,54 (1º passe)
Amostra 4 - Lado Esquerdo Face 1	4,34 (1º passe)	9,11 (1º passe)
Amostra 4 - Lado Direito Face 1	4,94 (2º passe)	6,78 (3º passe)
Amostra 4 - Lado Esquerdo Face 2	6,00 (2º passe)	7,39 (1º passe)
Amostra 4 - Lado Direito Face 2	4,75 (1º passe)	8,98 (1º passe)

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Ainda pelas macrografias realizadas é possível verificar a diferença de penetração entre as amostras. A figura 98 apresenta a macrografia da soldagem preliminar (1º

etapa) ao lado macrografia da soldagem final (3º etapa) e visualmente é possível notar a diferença de penetração entre as amostras.

Figura 98 - Macrografia da solda preliminar (1º etapa) X solda final (3º etapa).

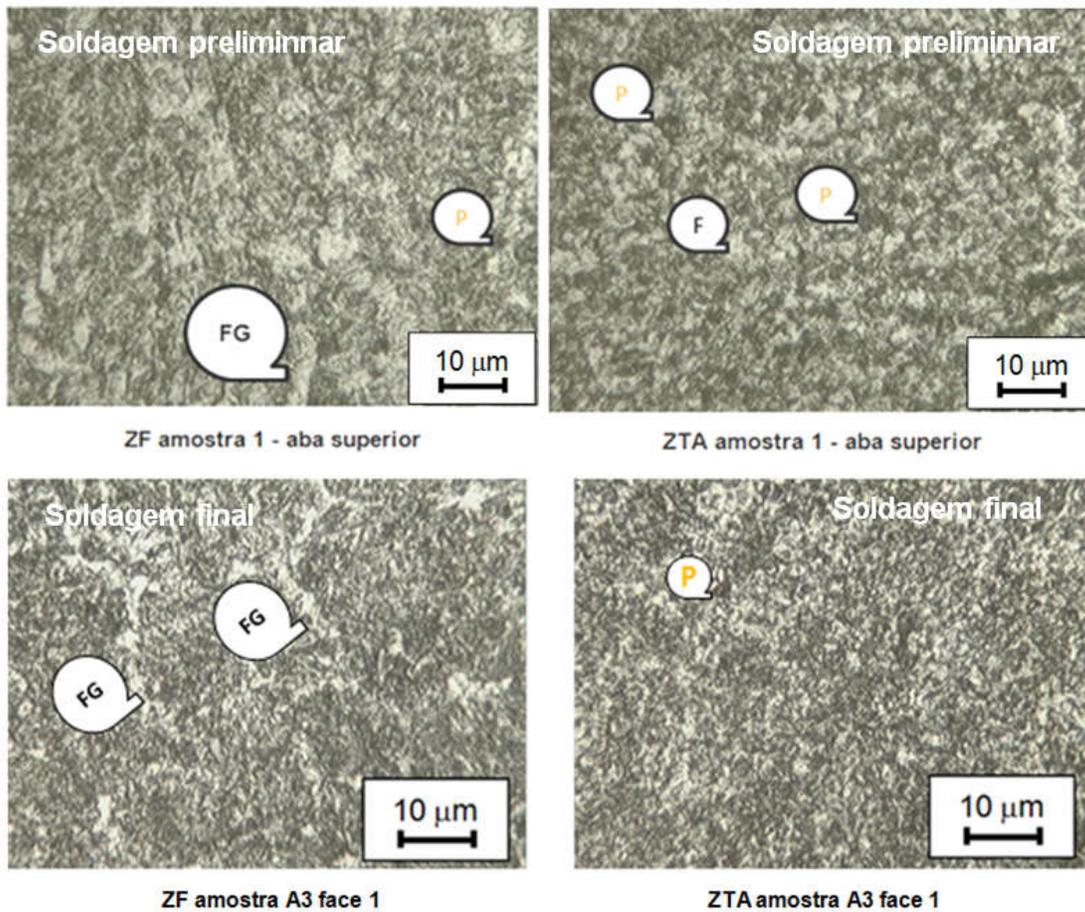


Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.4.3 - Caracterização microestrutural

Não foram observadas diferenças marcantes nas microestruturas das amostras da soldagem preliminar e da soldagem final, pelo contrário são muito similares os microconstituintes encontrados. A zona fundida (ZF) apresentou a ferrita de contorno de grão (FG) com alguns pontos de perlita. Na região da ZTA foi verificada uma microestrutura mais refinada em ambos os casos, com alguns pontos com perlita. A figura 99 apresenta as micrografias das áreas de ZF e ZTA avaliadas para amostra A3 face um (solda preliminar) e amostra 1 aba superior (solda final), sem diferenças significativas.

Figura 99 – Micrografias da solda preliminar (1º etapa) X soldagem final (3º etapa).



Fonte: Próprio Autor, 2019.

5.4.4 Caracterização mecânica

Assim como na micrografia os valores de durezas médias ficaram muito próximas de uma amostra para a outra, exceto para área de ZTA da amostra - aba superior e inferior que apresentaram o valor de dureza média no valor de 227 HV, já amostra preliminar com a média de dureza no valor de 243 HV, mas ainda mantida abaixo do valor crítico, menor que 350 HV. Fazendo uma comparação, por mais que este valor esteja dentro do esperado é desejável para a ZTA uma menor dureza possível, considerando que uma dureza excessiva na ZTA poderá fragilizar a viga soldada. A tabela 23 mostra os valores médios de dureza medidos para amostra da soldagem preliminar (A3. F1) versus a amostra da soldagem final (Amostra 1 aba superior e inferior), respectivamente. A ZF da amostra final obteve dureza pouco maior que a amostra de solda preliminar, o que ainda é positivo por se tratar do metal de solda.

Vale lembrar que na amostra final, a soldagem foi de apenas um cordão sobre uma chapa, já no caso da soldagem preliminar houve a soldagem de 3 passes, sendo depositado um cordão sob o outro, o que possibilita um tratamento térmico entre os cordões de solda, sendo benéfico metalurgicamente (resfriamento mais lento).

Tabela 22 – Microdureza da amostra preliminar X amostra final, respectivamente.

Amostra A3.F1	Área de solda	
	Zona fundida	Zona termicamente afetada
MÉDIA	214 HV	243 HV

Amostra 1 aba superior	Área de solda	
	Zona fundida	Zona termicamente afetada
MÉDIA	216 HV	229 HV
Amostra 1 aba inferior	Área de solda	
	Zona fundida	Zona termicamente afetada
MÉDIA	216 HV	222 HV

Fonte: Próprio Autor, 2019.

6 - CONCLUSÕES

De acordo com as variações de alguns parâmetros do processo de soldagem realizados em etapas distintas e conforme resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Um procedimento de soldagem pode ser aperfeiçoado quando se conhece os resultados da soldagem, resultante da variação de parâmetros de corrente e velocidade nos passes de solda.
- A variação dos parâmetros de soldagem possui influência direta na geometria do cordão. Soldas do 1º passe apresentaram maior reforço, largura e penetração, visto que para estes cordões foram utilizados maiores valores de corrente (A).
- Conclui-se que a maior penetração foi visualizada na soldagem final, sendo que esta foi observada no 1º passe de soldagem (raiz). Já a soldagem preliminar, além de possuir menor penetração, apresentou em aproximadamente 28% dos casos a maior penetração no 3º passe (acabamento) e 2º passe (enchimento) de soldagem, ou seja, uma penetração desnecessária, (visto que ocorreu em uma área sem união de partes).
- Com relação à dureza, conclui-se que os parâmetros de soldagem escolhidos para soldagem final da viga, proporcionou uma maior média de dureza para ZF e uma menor média de dureza para a ZTA. Quando comparada as durezas da viga da soldagem preliminar, conclui-se que a ZF da soldagem apresentou dureza pouco menor e dureza da ZTA pouco maior.
- Com relação às durezas encontradas nas amostras dos cordões sobre chapas, conclui-se que os parâmetros utilizados também resultaram em maiores médias de durezas na ZF e menores médias de dureza na ZTA, e que os pontos de maior dureza foram verificados na transição da ZF para a ZTA.

- As análises das microestruturas da soldagem preliminar e da soldagem final apresentaram os mesmos microconstituintes o que leva a concluir que os diferentes parâmetros de soldagem aplicados não geraram modificações significativas na microestrutura da ZF e da ZTA.
- Ainda para os cordões sobre chapas, conclui-se que as variações dos parâmetros utilizados resultaram em diferentes microestruturas. Observou-se em sua maioria, ferrita de contorno de grão, ferrita acicular, ferrita com segunda fase alinhada, e não alinhada e pequenos pontos de perlita nas ZF as quais apresentaram maior média de dureza. Já na ZTA que apresentou menor média de dureza (soldagem final) observou-se em sua maioria ferrita poligonal, ferrita com segunda fase não alinhada e também pequenos pontos de perlita.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A 572/A 572M: **Standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel**. Pennsylvania, 2015.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.17/A5.17M **Specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding**. Flórida. 1997.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A3.0:2001 **Standard welding terms and definitions**. Flórida. 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1/D1.1M:2004 **Structural welding code steel**. Flórida. 2003.

ANTF, Associação Nacional dos Transportes Ferroviários. **Banco de Imagens**. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/banco-de-imagens/>> Acesso em: 02 Fev.2019.

ARAÚJO, Luiz Antônio de. **Manual de siderurgia**. Transformação volume 2. 2. ed. São Paulo: Editora & arte ciência, 2005. 512p.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594p.

BARBEDO, N. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

BORBA, Tadeu Messias Donizete. et. al. Avaliação da soldabilidade do aço Sincron EN 10025-4 S355M, aplicado na fabricação de torres eólicas com processo de soldagem de alta deposição. **Soldagem & inspeção**, Joinville, v. 22, n. 4, p.413-428, jan. 2017.

BRUNA, Roberto Gerardo. Efeitos dos laminados a quente e a morno na microestrutura, textura e propriedades de aços baixo carbono. **Metalurgia e materiais**. Ouro Preto, v.64, n. 1, p.57-62, mar.2011.

CARY, Howard B. HELZER, Scott C. **Modern welding technology**. 6. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2013. 715p.

CASTRO, Rodrigo Martins De. **“Efeito do Aporte Térmico na Soldagem de Reparos Embutidos em Minerodutos”**. Dissertação de Mestrado. REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS, UFOP-CETEC-UEMG. Ouro Preto, 2011.

CENTRO DE CONHECIMENTO ESAB. **Como maximizar a produtividade na soldagem**. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/produtividade_de_soldagem_cfm>. Acesso em: 20 mar. 2019.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**. Processos de fabricação e tratamento, volume 2. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 315p.

COLPAERT H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008, 652p.

CORBAGE, Claudio de Oliveira. **Logística brasileira: um estudo teórico do modal ferroviário**. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/1775/1/COC11082017.pdf>>. Acesso em: 25 Jan.2019.

CUNHA, Lelis José G.da. **Solda como, quando e por quê**. 2. ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores LTDA, 1989. 260p.

CUNHA, Tiago Viera da; RIBEIRO, Hélio Ormeu. Avaliação do Uso do tecimento do Arco Submerso. **Soldagem & inspeção**, Joinville, v. 23, n. 1, p.73-82, abr. 2018.

CURSO de inspetor de soldagem da fundação brasileira de tecnologia da soldagem. Disponível em <<http://www.fbts.org.br/quantum/saladeaula/saladeaula.asp?codItem=54&codCurso=1&codTurma=176>>. Acesso em: 27 mar. 2017.

DA SILVA, A.F. et al (2003). **Análise microestrutural do metal de solda de perfis soldados de um lado só utilizados na construção civil.** Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/cobef20030558.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

DIETER, George Ellwood. **Mechanical metallurgy SI metric edition adapted by David Bacon.** Singapore: McGraw-Hill, 1988. 751p.

FERRARI, Marcello. et al. **Análise das propriedades mecânicas de juntas de aço carbono estrutural soldadas pelo processo arco submerso com os arcos simples e duplo (Tandem-arc).** 2018. XLIV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem. Associação brasileira de soldagem, Uberlândia, 2018.

FORTES, Cleber. APOSTILA ESAB. **Arco submerso.** Contagem, 2004. 84p.
Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1_apostilaarcosubmerso.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2019.

GONÇALVES, Alexandre Dias. **Estudo comparativo das soldas realizadas com os processos de soldagem SMAW e TW aplicados na união de trilhos a 100 da norma DIN 536.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET, 2016. 115p.

HORII, Yukihiro. et al. **Chemical Composition and Crystal Structure of Oxide Inclusions Promoting Acicular Ferrite Transformation in Low Alloy Submerged Arc Weld Metal.** Quarterly Journal of Japan Welding Society, v. 13, n. 4, p. 500-507. 1995.

Infosolda o portal brasileiro de soldagem. artigos. processos de soldagem. **Solda por Fricção linear (FSW) na indústria aeronáutica.** Disponível em:

<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/631-fsw-na-industria-aeronautica>. Acesso em: 17 mar. 2019.

JORGE, Carlos Ferreira Jorge. et al. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico. **Soldagem & inspeção**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p.347-358, set. 2015.

KUDZYS Antanas. et.al. Structural safety of rolled and welded beams subjected to lateral-torsional buckling. **Journal of civil engineering and management**, Lituânia, v. 16, n. 2, p.172-178, jun. 2011. . Disponível em: <<https://journals.vgtu.lt/index.php/JCEM/article/view/5934>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

LI, Ke. et. al. **Metal transfer in submerged arc welding**. Journal of materials processing technology. 244, p.314-319, feb. 2017. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/locate/jmatprotec>>. Acesso em: 22 jul. 2018.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e técnicas conexas**: processos. Porto Alegre: editado pelo autor. UFRGS, 1996, 477p. Disponível em: <<http://scholar.google.com.br> >. Acesso em: 30 ago. 2017.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363p.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 209p. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?q=Introdu%C3%A7%C3%A3o+%C3%A0+metalurgia+da+soldagem&hl=pt-BR&as_sdt=0,5>. Acesso em: 16 mar. 2019.

MODENESI, Paulo José. **Introdução à Física do Arco Elétrico**, Soldagem I. Belo horizonte: UFMG, 2012. 41p. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2019.

MONTEIRO, Guilherme Arthur Brunet. **“Estratégia de manutenção em uma oficina de cilindros de laminação de aços longos”**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de soldagem e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos editora S.A; Tóquio: The association for international technical promotion, 1982. 461p.

OLIVEIRA, Fabiano Farias de. **“Estudo das transformações macro e microestruturais das juntas soldadas do aço SAE - 4340 pelo processo FCAW”**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET, 2015. 96p.

OSORIO, Alice Gonçalves. et al. Estudo da Transferência de elementos químicos do fluxo para o metal fundido na soldagem a Arco Submerso. **Revista Matéria**, v. 21, n. 02, p.510-524, Rio Grande do Sul, 2016.

POLIDO, Rafael Saito. et al. Caracterização da zona termicamente afetada em aço estrutural submetido à soldagem por arco submerso: **XII Congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica**. São Paulo, 2005.

SZEREMETA, Igor Cordeiro. **O atual estado da malha ferroviária brasileira**. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/artigos/o-atual-estado-da-malha-ferroviaria-brasileira/50069/>>. Acesso em: 12 Jun. 2016.

VOIGT, Anna Louise. et. al. Metodologia de Baixo Custo para Registro de Imagens do Arco Voltaico de Soldagem. **Soldagem & inspeção**, Joinville, v. 22, n. 4, p.346-356, nov. 2017.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem processos e metalurgia**. 8 Reimpressão São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2011, 494 p.