

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

Édson Antônio Zanivan

AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM TIG EMPREGADA NA
MONTAGEM DE CONECTORES EM DUTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Diplomação

Orientador: Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALÚRGIA

Édson Antônio Zanivan

AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM TIG EMPREGADA NA
MONTAGEM DE CONECTORES EM DUTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul como requisito parcial à obtenção do
grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Zanivan, Édson Antônio
AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM TIG EMPREGADA NA
MONTAGEM DE CONECTORES EM DUTOS FLEXÍVEIS / Édson
Antônio Zanivan. -- 2021.
73 f.

Orientador: Arnaldo Ruben Gonzalez.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Dutos flexíveis. 2. Conector de dutos flexíveis.
3. Soldagem TIG. I. Gonzalez, Arnaldo Ruben, orient.
II. Título.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer a minha família, minha mãe Ivone, meu pai Darci e meus irmãos que sempre me incentivaram a estudar. Este trabalho é a minha forma de expressar a gratidão e orgulho que sinto por eles.

A minha namorada, noiva e melhor amiga Jaqueline, por todo amor, carinho, por sempre ter me apoiado nas noites de estudo, nas minhas decisões profissionais e na realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez por ter aceitado ser meu orientador nesse momento de pandemia, por ter confiado em mim, por toda a orientação e conhecimento transmitidos.

Aos fundadores da Símeros Fabiano Bertoni e Facundo Sebastián López pela oportunidade, confiança e disponibilização da estrutura da empresa para realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Lucas Geusti pela grande ajuda na definição do tema deste estudo, incentivo, transmissão de conhecimento e inúmeras discussões técnicas feitas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao time operacional da Símeros, em especial ao Engenheiro Bruno Rosa, Auxiliar de Testes Paulo Schenatto e Técnico Vinícius Vargas pelo auxílio na soldagem dos corpos de prova e aquisição dos dados. Agradeço também ao time de engenharia pelos conhecimentos transmitidos, em especial ao Eduardo Bortoncello, Marco Polo, João da Conceição e Frederico Wallauer.

Gostaria de agradecer a todo o pessoal do laboratório de materiais da Símeros pelo auxílio na realização dos ensaios, em especial ao Engenheiro Felipe Goettems e ao Analista Gabriel Cardoso, pelos conhecimentos transmitidos na elucidação de dúvidas.

Aos Engenheiros Manuel Suarez e Tiago Coser por todo o apoio, incentivo, ensinamentos transmitidos na área de tecnologia submarina e pela confiança depositada em mim durante o período da graduação.

Ao LAMEF por disponibilizar estrutura para caracterização química dos materiais, em especial ao colega Anderson Pelufa que realizou os testes. Também agradeço aos meus ex-colegas do grupo de Tecnologia Submarina por todos os conhecimentos transmitidos e momentos vividos durante minha passagem pelo grupo.

RESUMO

Devido à exploração de petróleo em águas cada vez mais profundas, foi necessário desenvolver novas tecnologias, dentre elas estão inseridos os dutos flexíveis e conectores. Os dutos flexíveis são estruturas submarinas que fazem o transporte de óleo entre o poço de produção e a plataforma petrolífera, enquanto que os conectores são montados nas extremidades dos dutos flexíveis e tem a função de garantir o estanque e conexão entre dutos e plataforma ou poço. Dentro da montagem de conectores existe uma etapa de solda para ancoragem da Armadura de Pressão que é uma das camadas do duto flexível, está etapa é crítica, pois abaixo desta camada existe uma camada polimérica que pode ser danificada caso o calor gerado durante a soldagem seja excessivo. Corpos de prova foram soldados através do processo *Tungsten Inert Gás (TIG)* em uma Armadura de Pressão, o processo ocorreu com variações de corrente de soldagem (60, 70 e 80 A), para posteriormente avaliar a qualidade das soldas feitas nestes intervalos. Essa avaliação consistiu em realizar ensaios de temperatura de soldagem na face oposta da solda (face de contato com polímeros), inspeção visual das amostras, inspeção pelo método de Partícula Magnéticas, Macrografia e Metalografia da seção transversal dos cordões de solda e microdureza. Foi observado que apresentaram mais defeitos as amostras soldadas com corrente de soldagem de 60 A, enquanto que melhor corrente de soldagem foi a de 70 A, pois apresentou maior qualidade dos cordões de solda, cordões livres de defeitos e menor temperatura na face oposta da solda.

Palavras-chave: Dutos flexíveis, conector de dutos flexíveis, soldagem TIG.

ABSTRACT

Due to the exploration of oil in increasingly deeper waters, it was necessary to develop new technologies, including flexible pipes and End Fittings. Flexible Pipes are underwater structures that transport oil between the production well and the oil platform, while the End Fittings are assembly at the ends of the flexible pipes and have the function of guaranteeing the watertight connection between the pipes and the platform or well. Inside the assembly of connectors there is a welding step for anchoring the Pressure Armor, which is one of the layers of the flexible pipe, this step is critical, because below this layer there is a polymeric layer that can be damaged if the heat generated in the welding is excessive. Specimens were welded using the Tungsten Inert Gas (*TIG*) process in a Pressure Armor, the process occurred with variations in welding current (60, 70 and 80 A), to later assess the quality of the welds made in these intervals. This evaluation consisted of performing welding temperature tests on the opposite face of the weld (contact face with polymers), visual inspection of samples, inspection by the Magnetic Particle method, Macrography and Metallography of the cross section of the welds and microhardness. It was observed that the samples welded with a welding current of 60 A had more defects, while the best welding current was that of 70 A, as it presented higher quality of the weld beads, bead free of defects and lower temperature on the opposite side of the weld.

Keywords: Flexible pipes, End Fittings, Tungsten Inert Gas (*TIG*)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Lâminas d'água dos reservatórios perfurados no Brasil.	14
Figura 2 – Conector de dutos flexíveis.....	15
Figura 3 – Duto Flexível genérico.	17
Figura 4 – Perfil Z usualmente usado na armadura de pressão.	19
Figura 5 – Região interna End Fitting.....	21
Figura 6 – Processo de travamento da Armadura de Pressão.	22
Figura 7 – Mordedura de soldagem.....	24
Figura 8 – Equipamento de soldagem TIG.....	27
Figura 9 – Classificação eletrodos usado para TIG.	30
Figura 10 – Classificação varetas para soldagem a arco com gás de proteção.	31
Figura 11 – Diagrama geral dos ensaios realizados.....	32
Figura 12 – Máquina de solda utilizada.....	35
Figura 13 – Soldagem TIG manual dos CPs na Armadura de Pressão.	36
Figura 14 – Localização dos cordões de solda.....	36
Figura 15 – Fixação dos termopares na face oposta da solda.	37
Figura 16 – Corte transversal do cordão de solda.	38
Figura 17 – Temperatura máxima atingida durante a soldagem.	41
Figura 18 – Evidência de porosidades nas soldas realizadas com corrente de 60 A.	42
Figura 19 – Inspeção visual das soldas realizadas com corrente de 70 A.	42
Figura 20 – Inspeção visual das soldas realizadas com corrente de 80 A.	43
Figura 21 – Indicação da trinca induzida pelo hidrogênio encontrada na amostra Y12.	44
Figura 22 – Macrografia da amostra Y11. 6,7x, Nital 2%.....	45
Figura 23 – Metalografia da região 1, amostra Y11. 200x, Nital 2%.	46
Figura 24 – Metalografia da região 2, amostra Y11. 50x, Nital 2%.	47
Figura 25 – Mudança microestrutura metal base para ZTA. 200x, Nital 2%.	47
Figura 26 – Mudança microestrutural na ZTA para zona de fusão. 200x, Nital 2%. .	48
Figura 27 – Metalografia da região 3, amostra Y11. 50x, Nital 2%.	49
Figura 28 – Mudança microestrutural entre metal base e ZTA. 200x, Nital 2%.	49
Figura 29 – Mudança microestrutural entre ZTA. 200x, Nital 2%.	50

Figura 30 – Metalografia da região 4, amostra Y11. 200x, Nital 2%.....	51
Figura 31 – Início da trinca encontrada na inspeção por partículas magnéticas. 50x, Nital 2%.....	52
Figura 32 – Macrografia da amostra Y12. 6,7x, Nital 2%.....	52
Figura 33 – Transições microestruturais entre material base ZTA (Y12). (A) 50x; (B)50x: Nital 2%.....	53
Figura 34 – Macrografia da amostra Y12. 6,7x, Nital 2%.....	54
Figura 35 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y13). 50x, Nital 2%.....	54
Figura 36 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y13). 50x, Nital 2%.....	55
Figura 37 – Macrografia da amostra Y12. 6,7x, Nital 2%.....	56
Figura 38 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y21). 50x, Nital 2%.....	56
Figura 39 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y21). 50x, Nital 2%.....	57
Figura 40 – Macrografia da amostra Y22. 6,7x, Nital 2%.....	58
Figura 41 – Transições microestruturais entre material base ZTA (Y22). (A) 50x; (B)50x: Nital 2%.....	58
Figura 42 – Macrografia da amostra Y23. 6,7x, Nital 2%.....	59
Figura 43 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y23). 50x, Nital 2%.....	60
Figura 44 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y23). 50x, Nital 2%.....	60
Figura 45 – Macrografia da amostra Y31. 6,7x, Nital 2%.....	61
Figura 46 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y31). 50x, Nital 2%.....	62
Figura 47 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y31). 50x, Nital 2%.....	62
Figura 48 – Macrografia da amostra Y32. 6,7x, Nital 2%.....	63
Figura 49 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y32). 50x, Nital 2%.....	64

Figura 50 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y32). 50x, Nital 2%.	64
Figura 51 – Macrografia da amostra Y33. 6,7x, Nital 2%.....	65
Figura 52 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y33). 50x, Nital 2%.	66
Figura 53 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y33). 50x, Nital 2%.	66
Figura 54 – Caminho das indentações. 6,7x, Nital 2%.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Orientação sobre limites de temperatura para polímeros termoplásticos para operação em duto flexível com vida útil de 20 anos.....	19
Tabela 2 – Composição química da Armadura de Pressão (% em massa).	33
Tabela 3 – Composição química dos corpos de prova (% em massa).....	33
Tabela 4 – Nomenclatura adotada.....	34
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem TIG	35
Tabela 6 – Registro dimensional comprimento das soldas realizadas.....	43
Tabela 7 – Dados de microdureza.	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ZTA	Zona termicamente afetada
EF	End Fitting
CP	Corpo de prova
TIG	Tungsten Inert Gas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	Linhas flexíveis para produção de petróleo	17
3.1.1	Estruturas dos Dutos Flexíveis.....	17
3.1.2	Conector de Duto Flexível.....	21
3.2	Metalografia e defeitos da soldagem.....	23
3.2.1	Metalografia da soldagem.....	23
3.2.2	Defeitos de soldagem.....	23
3.3	Processo de Soldagem TIG (<i>Tungsten Inert Gas</i>)	26
3.3.1	Corrente de soldagem.....	27
3.3.2	Tensão do arco elétrico.....	28
3.3.3	Velocidade de soldagem.....	28
3.3.4	Energia de soldagem.....	28
3.3.5	Gás de proteção.....	29
3.3.6	Eletrodo	29
3.3.7	Metal de adição	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1	Descrição geral.....	32
4.2	Composição química.....	33
4.3	Descrição do processo de Soldagem TIG	34
4.4	Registro térmico	37
4.5	Inspeção visual.....	37
4.6	Inspeção por partículas magnéticas.....	38
4.7	Macrografia e metalografia.....	38
4.8	Microdureza	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1	Registro térmico	40
5.2	Inspeção visual.....	41
5.3	Inspeção por partículas magnéticas.....	43
5.4	Macrografia e metalografia.....	45

5.4.1	Amostra Y11 (Corrente de soldagem 60A).....	45
5.4.2	Amostra Y12 (Corrente de soldagem 60 A).....	51
5.4.3	Amostra Y13 (Corrente de soldagem 60 A).....	53
5.4.4	Amostra Y21 (Corrente de soldagem 70 A).....	55
5.4.5	Amostra Y22 (Corrente de soldagem 70 A).....	57
5.4.6	Amostra Y23 (Corrente de soldagem 70 A).....	59
5.4.7	Amostra Y31 (Corrente de soldagem 80 A).....	61
5.4.8	Amostra Y32 (Corrente de soldagem 80 A).....	62
5.4.9	Amostra Y33 (Corrente de soldagem 80 A).....	65
5.5	Microdureza	67
6	CONCLUSÕES	69
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
8	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A partir dos descobrimentos dos campos petrolíferos na região do pré-sal desde o ano de 2007, foi necessário o desenvolvimento de uma série de novas tecnologias para extração de petróleo em lâminas de água cada vez mais profunda como se mostra na Figura 1.

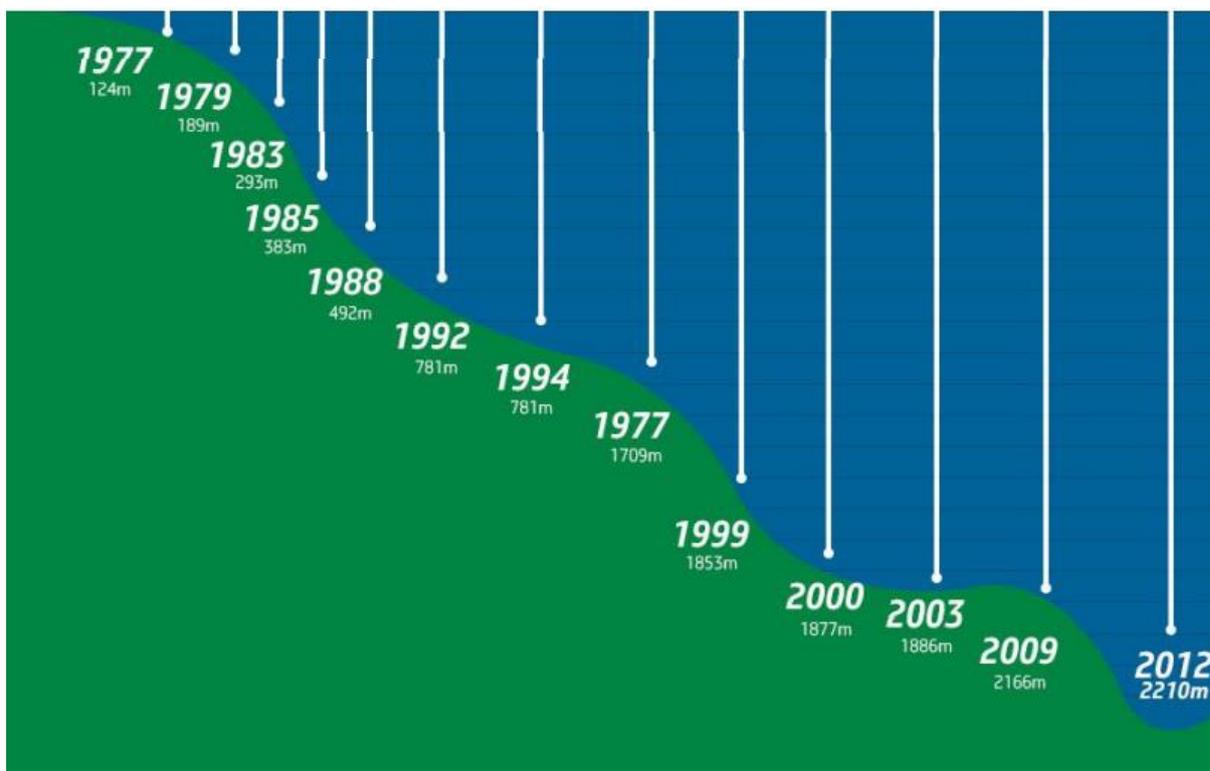


Figura 1 – Lâminas d'água dos reservatórios perfurados no Brasil.

Fonte: Adaptado Petrobras 2012.

Inserido dentro das tecnologias usadas para extração de petróleo em águas profundas, os dutos flexíveis são os principais equipamentos para transporte de fluídos entre plataforma e poço. Estes equipamentos são compostos de diversas camadas, sendo algumas metálicas e outras poliméricas com funções distintas. A conexão entre o corpo tubular de um duto flexível a outro duto ou plataforma de produção é feita através de um dispositivo conhecido com Conector ou *End Fitting* que pode ser visualizado na Figura 2.

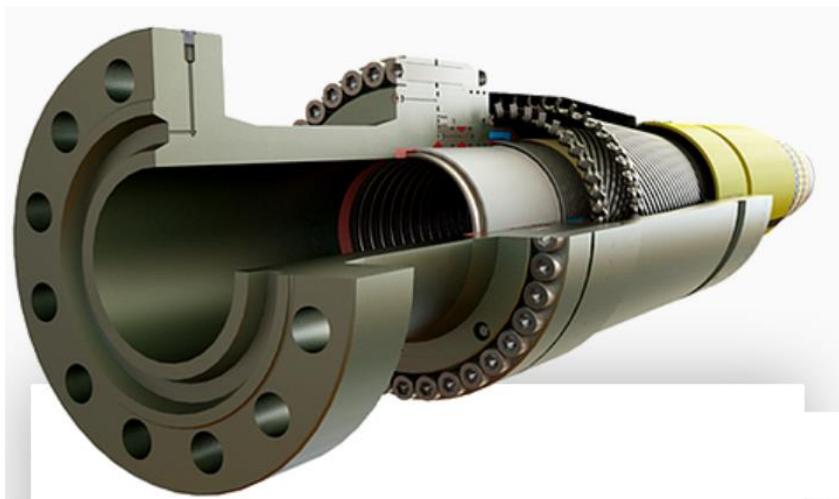


Figura 2 – Conector de dutos flexíveis.

Fonte: Símeros 2021.

Esses dispositivos por sua vez necessitam ser montados no duto flexível. Durante a montagem é empregado o processo de soldagem TIG para realizar o travamento da Armadura de Pressão. Essa soldagem é crítica no processo de montagem, pois além do desempenho mecânico esta solda não pode danificar a camada polimérica que se encontra abaixo, exigindo o emprego de baixas energias de soldagem.

2 OBJETIVOS

Avaliar a qualidade da solda em armaduras de pressão soldadas com o processo TIG convencional manual em diferentes correntes de soldagem, mantendo os demais parâmetros fixos.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a temperatura atingida na face externa durante a soldagem.
- Analisar a qualidade visual das soldas produzidas.
- Avaliar pelo método de partículas magnéticas os cordões de solda produzidos.
- Avaliar a macroestrutura e microestrutura e sua influência na microdureza das soldas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Linhas flexíveis para produção de petróleo

Dutos flexíveis são estruturas cilíndricas multicamadas, responsáveis por fazer o transporte de fluidos entre plataforma de produção de petróleo e poço de produção. Alguns dutos transportam petróleo do poço para a plataforma e outros realizam a injeção de água ou gás da plataforma para o poço.

As linhas flexíveis possuem vantagens em relação a dutos rígidos, pode-se destacar a facilidade de transporte e instalação, pois estes dutos podem ser enrolados em bobinas de grande diâmetro que são mais fáceis de transportar e manusear (COSER, 2016).

3.1.1 Estruturas dos Dutos Flexíveis

Podem apresentar diferentes configurações de camadas dependendo do tipo de serviço para o qual serão utilizados. Em geral apresentam as seguintes camadas:

- 1 – Carcaça intertravada
- 2 – Barreira de pressão ou camada de estanqueidade
- 3 – Armadura de pressão
- 4 – Camada antiatrito
- 5 – Armaduras de tração
- 6 – Fita de alta resistência
- 7 – Capa plástica
- 8 – Isolamento térmico

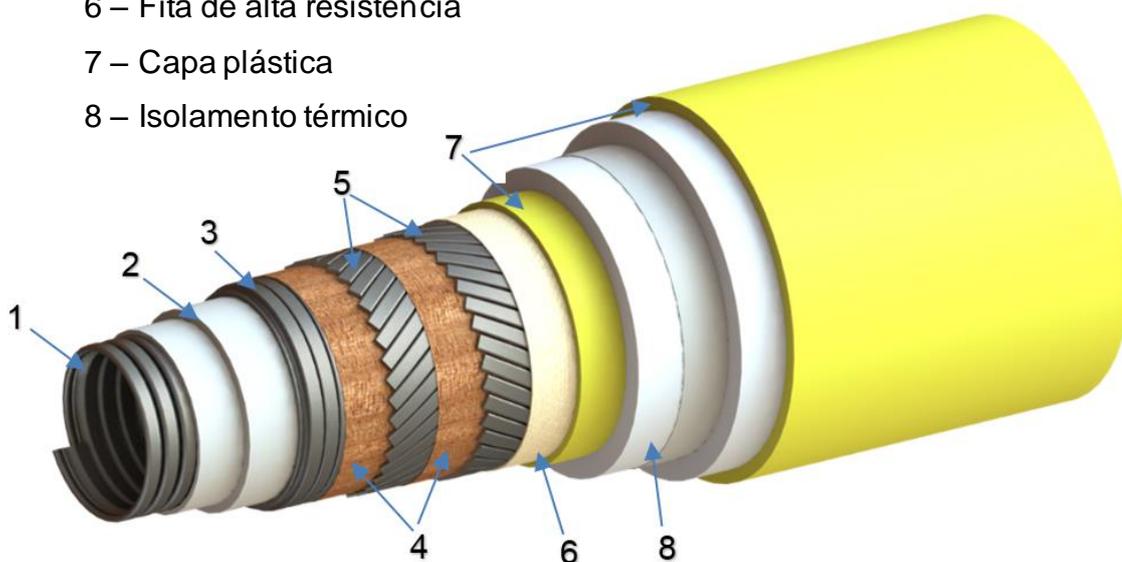


Figura 3 – Duto Flexível genérico.

Fonte: O Autor 2021.

Carcaça Intertravada

Sua função principal é suportar as pressões externas, bem como prevenir o colapso caso aconteça uma queda repentina de pressão. Esta camada entra em contato direto com o óleo transportado, então necessita ser resistente à corrosão, sendo fabricada geralmente em aço inoxidável austenítico (AISI 304, AISI 304L, AISI 316 E AISI 316 L) ou Duplex (DUPLEX 2205, DUPLEX 2504 e SUPERDUPLEX 2507) (CAMPELLO, 2014; COSER, 2016; CARVALHAL, 2014).

Camada de estanqueidade

Também conhecida como “*Barreira de Pressão*”, sua função é garantir o estanque do duto, prevenindo que o fluido interno entre em contato com as camadas mais externas e, eventualmente, com ambiente externo (NEGREIROS, 2016). É fabricada de polímero extrudado sobre a carcaça intertravada. Três classes de polímero são geralmente utilizadas, sendo elas: polietileno de alta densidade (em inglês, high density polyethylene, HDPE), polifluoreto de vinilideno (em inglês, poly vinylidene fluoride, PVDF) e poliamida, comumente conhecida como Nylon (PA-11) (COSER, 2016).

A norma API RP 17 B fornece as recomendações para seleção do material da barreira de pressão em função da temperatura de operação e compatibilidade com os fluidos produzidos (CARVALHAL, 2014). Na montagem de conectores, uma boa prática que pode ser adotada é ajustar os processos de soldagem usados na montagem de EF para que as temperaturas atingidas na Camada de Estanqueidade, devido a esses processos, não sejam superiores as temperaturas máximas de operação, essa prática ajuda a garantir que a Camada de Estanqueidade não seja danificada no processo de montagem do EF. A Tabela 1 mostra as temperaturas máximas de operação dos materiais que são utilizados na fabricação da Camada de Estanqueidade.

Segundo COUTINHO (2003) o HDPE possui temperatura de fusão cristalina em torno de 132 °C, o PVDF apresenta ponto de fusão na faixa de 160 a 172 °C (ABREU, 2012), já o PA-11 tem ponto de fusão em 188 C° (BALARIM, 2015). Em hipótese nenhuma, a temperatura da Camada de Estanqueidade pode atingir os valores de ponto de fusão dos materiais que compõem a camada, pois possivelmente se estaria mudando a geometria, além de poder degradar o material em certo grau.

Tabela 1 – Orientação sobre limites de temperatura para polímeros termoplásticos para operação em duto flexível com vida útil de 20 anos.

Material	Mínima temperatura de exposição °C	Máxima temperatura de operação °C
HDPE	-50	+60
PA-11	-50	-
PVDF	-20	+130

Fonte: Adaptado de API RP 17B (2014).

Armadura de pressão

Atua resistindo à pressão interna de operação, além da pressão externa devido às cargas radiais impostas pelas sapatas ao manuseio do duto. Em sua fabricação os arames de aço são comprimidos em forma helicoidal, sendo sua seção usualmente em forma de “Z” (Figura 4), com ângulo de assentamento próximo a 90° (CAMPELLO, 2014). A resistência mecânica do material vai depender dos requisitos de projeto, sendo para serviço doce (*sweet*) o uso de aços com alta resistência é priorizado, com intuito de minimizar o peso da estrutura, enquanto que para serviço ácido (*sour*) aços de média e baixa resistência são usados, pois em ambientes ácidos (ricos em CO₂ e H₂S) os materiais de alta resistência são suscetíveis ao trincamento induzido pelo hidrogênio (HIC) e a corrosão sob tensão (SCC) (CARVALHAL, 2014). Durante a montagem de conectores uma etapa importante é exposição e corte dessa camada, pois necessita de um processo de soldagem para impedir que a energia de fabricação seja liberada.

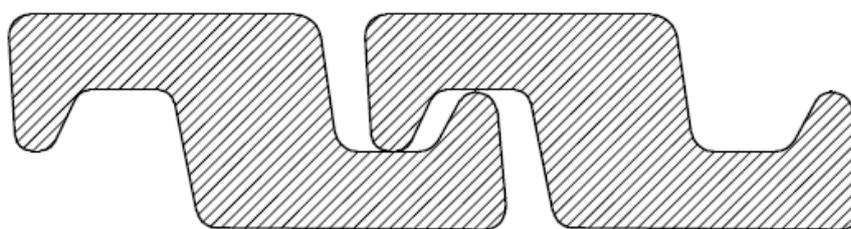


Figura 4 – Perfil Z usualmente usado na armadura de pressão.

Fonte: Adaptado de API RP 17B (2014).

Camadas antiatrito

Consistem em materiais poliméricos aplicados entre duas camadas metálicas tendo como função diminuir o atrito entre essas camadas e conseqüentemente o desgaste causado pelo movimento relativo imposto durante a operação (CAMPELLO, 2014).

Armaduras de tração

As armaduras de tração são compostas de camadas de arames (seção quase retangular) que tem função de resistir à tração causada pela pressão interna, peso da linha, movimento da unidade de produção e outros. Essas camadas são assentadas de forma contra helicoidal (ângulos entre 20 e 55°), de forma a balancear o duto, mesmo quando submetido a torção quando aplicada carga axial (COSER, 2016; CARVALHAL, 2014).

Os arames usados são obtidos pelo processo de trefilação com posterior tratamento térmico de patenteamento, conseguindo resistências de até 1500 MPa (COSER, 2016). O aço carbono é o material geralmente usado, com altos teores de carbono quando necessita de alta resistência e baixo ou médio teor deste elemento quando o ambiente é agressivo com presença de água do mar, difusão de gás como CO₂, H₂S e metano (WALLAUER, 2015). Uma vez que essa camada é constituída de vários arames, a eventual ruptura de um arame não implica, necessariamente, na falha da estrutura com um todo, pois o carregamento é redistribuído entre os arames remanescentes (CARVALHAL, 2014).

Fita de alta resistência

Usualmente constituída de fibra de aramida tendo como função fornecer rigidez radial suficiente para evitar a flambagem das armaduras de tração (LORIO, 2016).

Capa plástica

A capa plástica é constituída de poliamida ou polietileno de alta densidade e tem como função proteger o duto flexível da exposição permanente ao ambiente marinho, ou seja, prevenir a estrutura da corrosão e abrasão (CAMPELLO, 2014; COSER, 2016).

Isolamento térmico

Constituída de poliuretano (PU), polipropileno (PP) ou policloreto de vinila (PVC), tem a função de isolar termicamente o duto flexível (CAMPELLO, 2014).

3.1.2 Conector de Duto Flexível

O Conector de Dutos Flexíveis é usualmente conhecido no meio técnico como *End Fitting (EF)*. Este componente é o responsável por realizar a ligação entre as linhas de dutos e plataforma de petróleo, resistir aos esforços axiais e garantir a estanqueidade do fluído transportado (CAMPELLO, 2014).

O EF é constituído de um corpo metálico forjado e em seu interior as camadas do duto flexível são expostas de maneira a garantir vedação e ancoramento (vide Figura 5).



Figura 5 – Região interna End Fitting.

Fonte: NOV 2013.

O processo de montagem do EF é dividido em diversas etapas, sendo que a etapa que motivou a realização deste trabalho é apresentada a seguir.

Travamento da Armadura de Pressão

O processo de travamento da Armadura de Pressão garante que durante a operação do EF a camada não desenrole e libere sua energia contida. Esta etapa é feita durante a montagem do Conector e processos de soldagem usualmente são empregados (vide Figura 6).

A soldagem dessa etapa é crítica no processo de montagem, porque se mal feita a Armadura de Pressão pode liberar sua energia contida abruptamente, podendo

ocasionar acidentes, ou perdas econômicas. Além disso, abaixo da Armadura de Pressão há uma camada polimérica conhecida como Camada de Estanqueidade (vide Figura 3 e Figura 6) que tem a função de garantir a estanqueidade interna do Duto Flexível, então caso o calor gerado durante o processo de soldagem seja excessivo, danos nessa camada podem ocorrer ocasionando a perda da estanqueidade interna do Duto Flexível. Portanto, o processo de soldagem envolvido nesta etapa tem fundamental importância, pois precisa garantir o travamento da Armadura de Pressão e ser feito de maneira a minimizar o calor gerado para não danificar a camada polimérica inferior.



Figura 6 – Processo de travamento da Armadura de Pressão.

Fonte: Adaptado de CAMPELLO 2014.

3.2 Metalografia e defeitos da soldagem

3.2.1 Metalografia da soldagem

A região que envolve o cordão de solda apresenta normalmente uma microestrutura complexa e com diversas fases dispersas. Essa região é dividida em 3 partes apresentadas a seguir (ARAÚJO, 2006):

Metal base: Trata-se da região no entorno da solda que não é termicamente afetada durante a soldagem. Para aços, os constituintes ferrita e perlita são geralmente encontrados (ARAÚJO, 2006).

Zona Termicamente Afetada (ZTA): Trata-se da região do metal base afetada pelo calor gerado na soldagem. Essa região sofre austenitização, crescimento de grão, refinamento de grão e posteriormente no resfriamento as microestruturas formadas são ferrita, bainita ou martensita (ARAÚJO, 2006).

Zona de Fusão: A microestrutura do cordão de solda é controlada pela composição química e taxa de resfriamento. Se a taxa de resfriamento for elevada a transformação não acontece de forma difusional, mas sim por cisalhamento de planos cristalinos formando martensita com alguma porcentagem de austenita retida. Também pode ser formado ferrita (de diversas geometrias), cementita e diferentes precipitados durante a solidificação da poça de fusão (ARAÚJO, 2006).

3.2.2 Defeitos de soldagem

Defeitos de soldagem podem ser considerados tudo aquilo que é prejudicial para o uso futuro da junta. Os principais são os seguintes:

Porosidade

Se origina das bolhas de gás que são aprisionadas durante a solidificação. Pode ser causada por contaminação da junta com ferrugem ou óleo, fluxo de gás úmido, corrente ou tensão excessiva. Também pode ocorrer quando a taxa de solidificação é muito elevada (não permite que os gases escapem normalmente), como ocorre em uso de baixas correntes ou altas velocidades de soldagem (MARQUES, 2019; ESAB, 2021).

Inclusão de tungstênio

Ocorre na soldagem TIG quando a ponta do eletrodo de tungstênio toca o metal base ou poça de fusão, ocorrendo a transferência de partículas de tungstênio para solda (MARQUES, 2019; ESAB, 2021).

Falta de fusão

Trata-se da não continuidade metalúrgica entre metal base e metal depositado. Geralmente é causado pela manipulação incorreta do eletrodo ou energia de soldagem insuficiente (MARQUES, 2019; ESAB, 2021).

Falta de penetração

Ocorre quando a raiz não é completamente fundida e enchida com solda. O principal causador desse defeito é o emprego de baixas correntes de soldagem, velocidade de soldagem muito alta e manipulação incorreta do eletrodo (MARQUES, 2019; ESAB, 2021).

Mordedura

Refere-se à quando ocorre fusão do metal de base da margem da solda sem que ocorra o enchimento desta área. Ocorre devido a manipulação incorreta do eletrodo, velocidade de soldagem muito elevada, comprimento de arco excessivo ou corrente de soldagem muito elevada (MARQUES, 2019; ESAB, 2021).



Figura 7 – Mordedura de soldagem.

Fonte: ESAB 2021.

Trincas

São as discontinuidades mais graves da soldagem, pois são altamente concentradoras de tensão o que pode levar a fratura frágil da solda. As trincas podem surgir das concentrações de tensão impostas pelos gradientes térmicos durante a soldagem, pela fragilização da microestrutura na solda, ou por elementos formadores de trinca como é o caso do hidrogênio (MARQUES, 2019).

A microestrutura formada depende muito da composição química dos elementos base. Uma maneira simples de determinar se a estrutura é suscetível a

formação de trincas é através do Carbono Equivalente (CE) que pode ser calculado pela Equação (1). Juntas com $CE < 0,4$ são consideradas pouco suscetíveis à fissuração, enquanto que as com $CE > 0,6$ são altamente suscetíveis à fissuração (MARQUES, 2019).

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad \text{Equação (1)}$$

3.3 Processo de Soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*)

O processo de soldagem conhecido comumente por TIG consiste na união de peças metálicas através do seu aquecimento por meio de um arco elétrico gerado por um eletrodo não consumível de tungstênio puro ou composto com outros metais ou óxidos. Esse processo pode ser sem (autógeno) ou com o uso de metal de adição (TEIXEIRA, 2011). O arco elétrico gerado forma uma poça de fusão que é protegida com gás inerte (geralmente argônio) (MACHADO, 2007).

O modo de operação geralmente é manual, mas também é possível ser feito de modo automático ou semiautomático tanto para soldas autógenas quanto para os casos onde é adicionado vareta consumível (MACHADO, 2007).

Algumas das vantagens do processo TIG são alta precisão, qualidade superior da solda, e geralmente baixos custos com equipamento (TOMAZ, 2021). Segundo KUTELU (2018) a soldagem TIG geralmente está associada à alta qualidade da solda que é obtida devido ao alto grau de controle de temperatura e material adicionado, vantagens que foram levadas em conta na escolha do processo de soldagem TIG para o trabalho, levando em conta o controle rigoroso de temperatura requerido devido à presença da camada polimérica (Barreira de Pressão) abaixo da região soldada.

O processo de soldagem TIG está presente em vários ramos como na aviação, indústrias químicas e nucleares, indústrias alimentícias, e de reparo e manutenção em áreas de manufatura (KUTELU, 2018).

Segundo MARQUES (2009) o processo de soldagem TIG é aplicado na maioria dos metais e suas ligas numa ampla faixa de espessuras, porém em virtude do seu custo relativamente elevado e baixa produtividade, é usado principalmente na solda de metais não ferrosos, aços inoxidáveis e peças com pequena espessura (1 a 2 mm).

O processo TIG é constituído de uma fonte de potência (transformador-retificador), de um cilindro de gás de proteção, de uma tocha resfriada a água ou ar, cabos e mangueiras. A Figura 8 mostra de forma esquemática um equipamento genérico do processo de soldagem TIG (MARQUES, 2009).

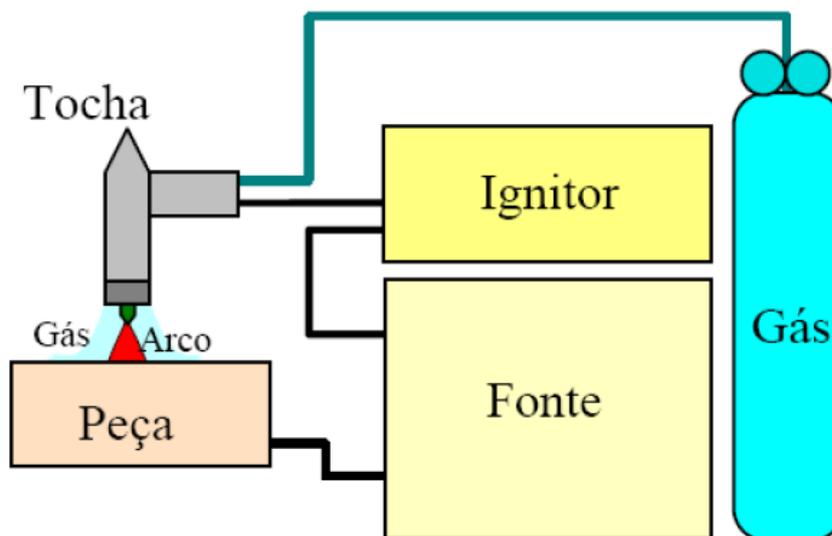


Figura 8 – Equipamento de soldagem TIG.

Fonte: Marques 2009.

Na soldagem TIG diversos são os parâmetros envolvidos que no final garantem a qualidade ou não da solda realizada. Nós tópicos a seguir serão discutidos os principais parâmetros envolvidos no processo TIG.

3.3.1 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem é o parâmetro que tem maior influência no arco elétrico de soldagem, na penetração e geometria do cordão de solda (KUTELU, 2018).

A corrente contínua eletrodo negativo (CCEN) é mais utilizada em aços carbono, pois o calor gerado se concentra 30 % no eletrodo e 70 % na peça a ser soldada, resultando em maior penetração com uma poça de fusão estreita e profunda. Já quando usado corrente contínua eletrodo positivo (CCEP) o calor gerado se concentra mais no eletrodo (70%) do que na peça (30%), isso resulta numa poça de fusão mais larga e rasa, com menor penetração e eficiente na ação de limpeza, i.e., remoção de óxidos. A corrente alternada quando usada apresenta distribuição de calor intermediária e boa remoção dos óxidos superficiais, sendo indicada para soldagem de alumínio, magnésio e cobre (TEIXEIRA, 2011).

Algumas vezes, grandes áreas são afetadas pelo calor que é gerado empregando baixas correntes de soldagem, devido as altas temperaturas que precisam ser aplicadas por longos períodos para depositar mesmas quantidades de material, se comparado quando empregado correntes mais altas. Quando fixado a

corrente de soldagem no processo TIG, vai ocorrer variação da tensão do arco elétrico para manter a corrente (KUTELU, 2018).

3.3.2 Tensão do arco elétrico

Trata-se da diferença de potencial entre o eletrodo e a superfície da poça de fusão. No processo TIG este parâmetro determina a forma da zona de fusão e da solda de reforço, pois alta tensão inicial permite fácil iniciação do arco elétrico e maiores distâncias da ponta do eletrodo em relação à poça de fusão, porém produz soldas mais largas, planas e menos profundas se comparado a solda com as obtidas com baixas tensões (KUTELU, 2018).

3.3.3 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é definida pela Equação (2). Esta variável é um parâmetro de extrema importância nos processos de soldagem ao arco elétrico, e em particular no processo de soldagem TIG, pois ao mudar a velocidade mantendo fixa uma corrente de soldagem, se estará mudando o aporte térmico. Aumentos da velocidade de soldagem produzem uma diminuição na área da seção transversal do cordão de solda (menor penetração e largura do cordão). Porém resultados mostram que a velocidade pouco influencia nos mecanismos de formação da poça de fusão, influenciando apenas o volume de material fundido. Geralmente, maiores velocidades de soldagem requerem maiores correntes de soldagem, enquanto que baixas correntes exigem menores velocidades de soldagem. (KUTELU, 2018; TEIXEIRA, 2011).

$$v = \frac{c}{t} \quad \text{Equação (2)}$$

v = velocidade de soldagem (mm / s).

c = comprimento do cordão (mm).

t = tempo de arco elétrico (s).

3.3.4 Energia de soldagem

A energia de soldagem é a energia transferida por unidade de comprimento ao cordão de solda. A energia de soldagem e taxa de resfriamento afetam diretamente as propriedades e microestrutura do metal de solda e da ZTA. A energia de soldagem

é tipicamente calculada através da tensão do arco elétrico, corrente e velocidade de soldagem, seguindo a Equação (3). (KUTELU, 2018).

$$H = \frac{n \cdot I \cdot V}{v} \quad \text{Equação (3)}$$

H = energia de soldagem em KJ/mm .

n = eficiência térmica do processo = 0,6 para TIG

V = tensão do arco elétrico (V).

I = corrente de soldagem (A).

v = velocidade de soldagem (mm / s).

3.3.5 Gás de proteção

Os gases de proteção usados no processo de soldagem TIG têm a função de prevenir que o eletrodo e o metal de solda sejam contaminados pela atmosfera, caso ocorra contaminação no metal de solda, porosidades podem surgir, trincas na solda e até mesmo mudanças na composição química do cordão gerado (KUTELU, 2018).

A vazão correta do gás de proteção é importante e não pode ser deficiente nem excessiva, pois acarretaria descontinuidades e aumento nos custos de soldagem. A vazão depende de diversos fatores, como o tipo do gás de proteção, distância do bocal até a peça, tipo de junta, intensidade da corrente, inclinação da tocha, velocidade e posição de soldagem (MACHADO, 1996).

O Argônio é o gás de proteção mais usado, visto que ele tem baixo potencial de ionização o que garante facilidade na abertura do arco elétrico, além disso, ele é mais pesado do que o ar garantindo excelente proteção da poça de fusão, principalmente na posição plana. Este gás é usado em soldagem de aços carbono e inoxidáveis. Se comparado ao gás Hélio que é outro gás bastante usado na soldagem TIG, o Argônio promove menor penetração no cordão de solda por esta razão é preferido na maioria das aplicações, exceto onde alto calor e penetração são requeridos como é o caso da soldagem de metais com alta condutividade térmica (ligas de cobre) e largas espessuras (KUTELU, 2018).

3.3.6 Eletrodo

Segundo TEIXEIRA (2011) o diâmetro do eletrodo não consumível depende da intensidade de corrente usada na soldagem, sendo que quanto maior a corrente maior

será a bitola do eletrodo. Este mesmo autor afirma que para corrente contínua são usados eletrodos de tungstênio com óxido de tório, lantânio ou cério que garantem a formação de uma ponta em ângulo no eletrodo, enquanto que para correntes alternada eletrodos de tungstênio puro ou com óxido de zircônio são utilizados.

O ângulo de afiação do eletrodo influencia na geometria da poça de fusão. Em geral, quanto mais agudo o ângulo de afiação do eletrodo, menor será a penetração e maior a largura do cordão de solda (MACHADO, 2007).

Os eletrodos para TIG são classificados pela AWS A5.12-92 de acordo com a Figura 9, os principais são apresentados na sequência.

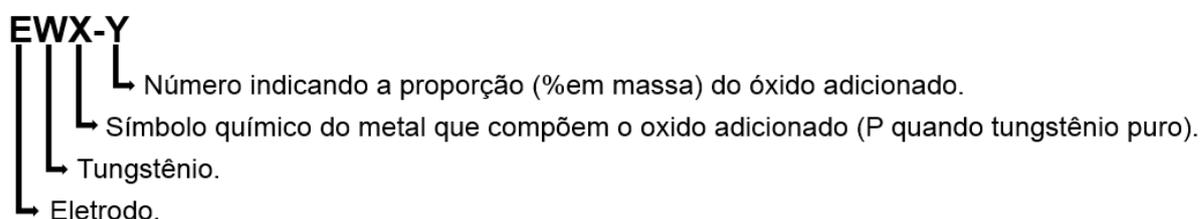


Figura 9 – Classificação eletrodos usado para TIG.

Fonte: Adaptado Machado 2007.

Eletrodo de Tungstênio puro (EWP)

São eletrodos considerados de baixo custo e aplicados geralmente para soldagem de alumínio, magnésio e suas ligas. Se comparado aos outros eletrodos usados nesse processo de soldagem, estes eletrodos suportam menos corrente e contaminam o metal de adição mais facilmente. Apresentam-se na cor de identificação verde (MACHADO, 2007).

Tungstênio com Óxido de Tório (EWTh-1; EWTh-2)

Quando comparado ao eletrodo de EWP possui as seguintes vantagens: mais alta emissividade eletrônica, melhor estabilidade e facilidade de iniciar o arco, suporta mais intensidade de corrente e tem maior vida útil. Porém apresenta um nível muito baixo de radioatividade, sendo necessário cuidados para garantir que não ocorra inalação ou ingestão de seus pós ou soldagem por longos períodos em ambiente confinado. Possui teor de ThO_2 que varia entre 0,8-2,2% e apresentasse na cor amarela para o EWTh-1 e na cor vermelha para o EWTh-2 (MACHADO, 2007).

Tungstênio com Óxido de Lantânio (EWLa-1)

Possui de 0,9-1,2% de La_2O_3 , se comparado ao eletrodo de Tungstênio puro apresenta as seguintes vantagens: mais fácil ignição, maior estabilidade do arco e

menor possibilidade de contaminar a poça de fusão. Não é radioativo e sua cor de identificação é preto (MACHADO, 2007).

3.3.7 Metal de adição

Os metais de adição são usados no processo TIG para soldar componentes com espessuras acima de 2 mm. A composição química e resistência mecânica após fundido do metal de adição devem ser similares ao do metal base. Os metais de adição para TIG são encontrados na forma de varetas com comprimento de 1 m para soldagem manual, enquanto que para soldagem mecanizada são fornecidas bobinas de diferentes capacidades (KUTELU, 2018; MARQUES, 2009).

Os metais de adição para soldagem ao arco com gás de proteção em aços carbono são classificados de acordo com a norma AWS A5.18. A nomenclatura empregada pode ser vista na Figura 10.

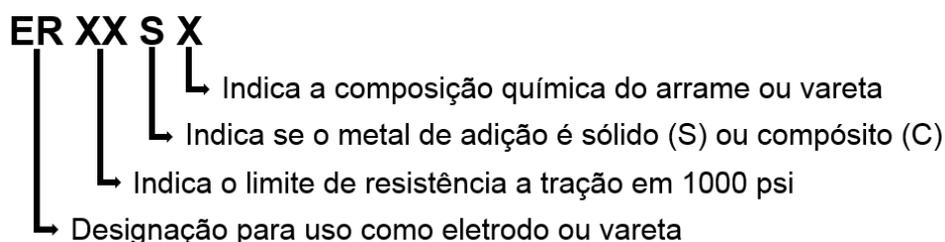


Figura 10 – Classificação varetas para soldagem a arco com gás de proteção.

Fonte: Adaptado AWS A 5.18: 2005.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição geral

A amostra de Armadura de Pressão foi retirada de um duto flexível novo e os corpos de prova foram comprados de chapas comerciais com composição química conhecida. Com o objetivo de avaliar o efeito da corrente no processo de soldagem TIG aplicado durante a montagem de conectores de dutos flexíveis, os CPs foram soldados com diferentes níveis de correntes de soldagem na Armadura de Pressão e posteriormente ensaios de inspeção e caracterização foram realizados conforme mostra a Figura 11.

O registro de térmico feito durante a realização dos cordões de solda visou verificar se as temperaturas atingidas podem ou não danificar a Barreira de Pressão (camada polimérica abaixo) que é sensível à altas temperaturas. Já os registros de inspeção por ensaios não destrutivos, macrografia/metalografia e microdureza tem por objetivo avaliar a qualidade obtida nas soldas com diferentes correntes de soldagem. Nas seções seguintes será apresentado a etapa de soldagem realizada e descrição detalhada de cada teste realizado.

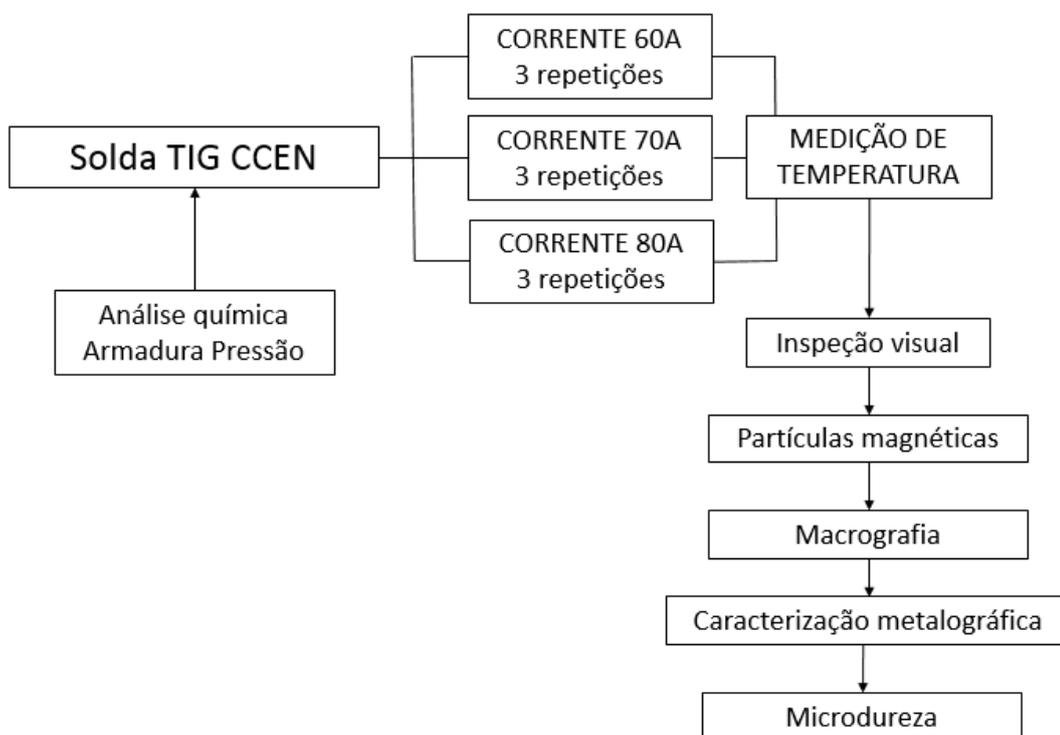


Figura 11 – Diagrama geral dos ensaios realizados.

Fonte: O Autor 2021.

4.2 Composição química

Previamente a soldagem foi preparada (corte, limpeza e lixamento para remoção de contaminantes) uma amostra da Armadura de Pressão para análise através do método de Espectrometria de Emissão Ótica por Centelha utilizando o espectrômetro da marca *Spectro* modelo *SPECTROLAB LAVFA18B* situado no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS).

A Tabela 2 apresenta os dados de composição química da amostra de Armadura de Pressão utilizada. Comparando os resultados obtidos com aços listados na norma ASTM A29 (2005), é possível dizer que o aço analisado corresponde ao 1035.

Tabela 2 – Composição química da Armadura de Pressão (% em massa).

%Fe	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
98,40	0,351	0,215	0,821	0,005	0,007	0,056	<0,005	0,026
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Pb	%Sn
0,033	<0,010	0,067	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	0,004

Fonte: O Autor 2021.

Já a Tabela 3 mostra a composição química dos corpos de prova utilizados. Essa composição química foi retirada do certificado de qualidade apresentado pelo fornecedor das chapas. De acordo com a norma ASTM A36 (2005) é possível dizer que o aço corresponde ao ASTM A36.

Tabela 3 – Composição química dos corpos de prova (% em massa).

Fe	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
98,20	0,251	0,350	0,920	0,005	0,007	0,030	<0,005	<0,005
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W		
<0,010	<0,010	0,083	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		

Fonte: O Autor 2021.

4.3 Descrição do processo de Soldagem TIG

A espessura e material dos CPs foi definida tentando simular peças que são soldadas nas Armaduras de Pressão durante o processo de montagem de conectores, desta forma, a medida final foi 20 mm x 40 mm x 10 mm (L x C x E) e a composição ASTM A36. A Armadura de Pressão utilizada possuía perfil em formato de Z com diâmetro externo de 215 mm e espessura de 12 mm.

Previamente ao início da soldagem foi realizada limpeza das peças com solvente. Posteriormente foi feita a marcação dos CPs adotando a nomenclatura de acordo com a Tabela 4.

As soldagens de todos os corpos de prova foram feitas na área de montagem de conectores da empresa Símeros, por um único soldador qualificado. Todos os parâmetros se mantiveram fixos, com exceção da corrente de soldagem. Devido a soldagem ter acontecido de maneira manual (vide Figura 13), alguns dos parâmetros como velocidade de soldagem e comprimento do arco podem ter pequenas variações. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 5.

As correntes de soldagem foram definidas em função da experiência de soldagem, sendo usado os valores de 60, 70 e 80 A. A ordem de soldagem dos CPs foi aleatória por meio de sorteio antes de cada solda. A máquina de soldagem utilizada foi a Vulcano Flex MIG 200 i DV da marca BALMER (vide Figura 12).

Em cada CP foram realizadas 3 soldas simultâneas, sendo 1 para fixação e outras 2 para posterior análises (vide Figura 14).

Tabela 4 – Nomenclatura adotada

Nível de Tratamento	Corrente de Soldagem (A)	Observações		
		1	2	3
1	60	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃
2	70	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂₃
3	80	Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₃₃

Fonte: O Autor 2021.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem TIG

Corrente (CCEN)	60 – 70 – 80 (A)
Diâmetro do eletrodo	2,4 (mm)
Tipo do Eletrodo	EWTh-2
Ângulo de afiação	20°
Material do bocal	Cerâmico
Diâmetro do bocal	12 (mm)
Gás de proteção	Argônio
Vazão do gás de proteção	10 l/min
Vareta consumível	ER70-3
Diâmetro da vareta	2,5 mm
Velocidade de soldagem aproximada	1 mm/s

Fonte: O Autor 2021.



Figura 12 – Máquina de solda utilizada.

Fonte: O Autor 2021.



Figura 13 – Soldagem TIG manual dos CPs na Armadura de Pressão.
Fonte: O Autor 2021.

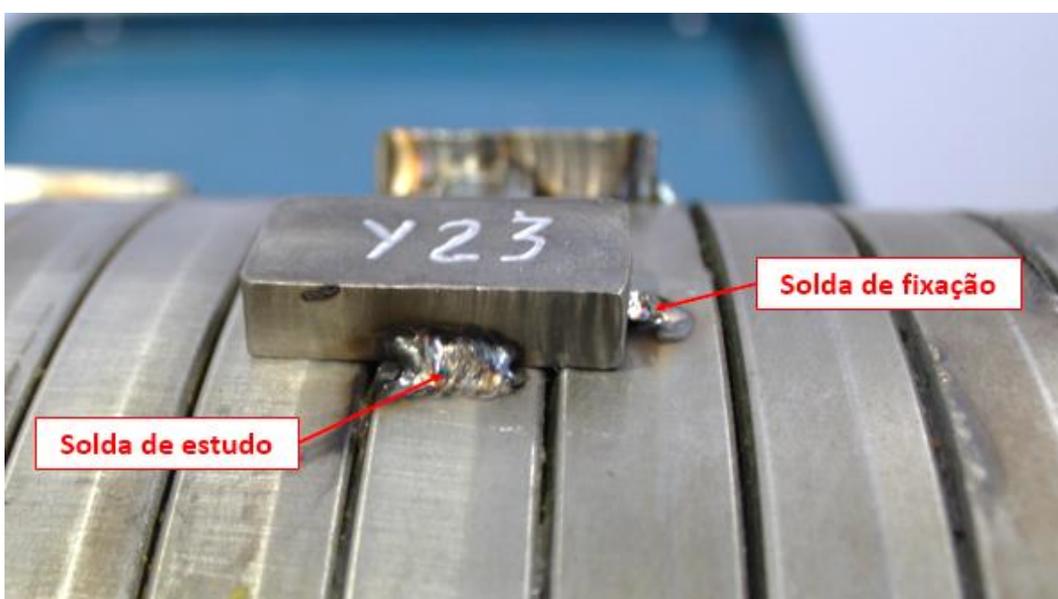


Figura 14 – Localização dos cordões de solda.
Fonte: O Autor 2021.

4.4 Registro térmico

Para obter a temperatura atingida durante a soldagem dos CPs foi introduzido 2 termopares na face oposta de cada solda. Os sensores utilizados foram do tipo *PT 100* e o aparelho usado para aquisição dos dados foi o modelo *MX1615B* da marca HBM.

Os sensores foram fixados com fita filamentosa e um calço de madeira como mostrado na Figura 15.

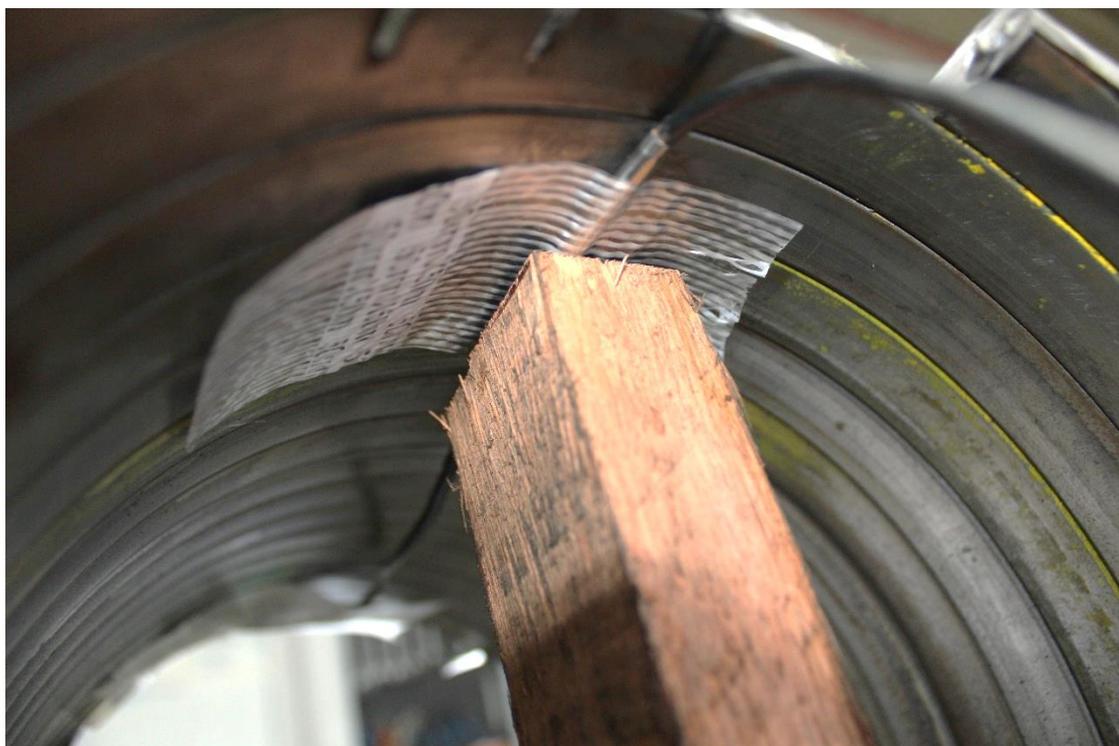


Figura 15 – Fixação dos termopares na face oposta da solda.

Fonte: O Autor 2021.

4.5 Inspeção visual

A inspeção visual das soldas foi feita com objetivo de verificar possíveis porosidades na solda, mordeduras, falta de preenchimento e verificar a precisão dimensional. A análise dimensional foi feita com auxílio de 1 régua medindo o comprimento de cada cordão de solda.

4.6 Inspeção por partículas magnéticas

A inspeção por partículas magnéticas ocorreu no setor de ensaios não destrutivos da empresa Símeros. Foi utilizado luz fluorescente, *Bobina L-10 da marca Magnafulx* e pó de ferro. Esse teste teve por objetivo verificar possíveis trincas ou outros defeitos oriundos do processo de soldagem.

4.7 Macrografia e metalografia

As amostras soldadas foram preparadas, no laboratório de materiais da Símeros, mediante o corte da seção transversal do cordão de solda (vide Figura 16), embutimento, lixamento e posterior polimento. Em seguida, as amostras foram atacadas com Nital 2% para revelar a microestrutura e então analisadas em um estereoscópio do modelo *OPZTS STANDARD Opticam* para obtenção da macrografia geral da solda.

A análise metalográfica ocorreu na sequência por microscopia óptica em um microscópio do modelo *O500M* da marca *Opticam*.



Figura 16 – Corte transversal do cordão de solda.

Fonte: O Autor 2021.

4.8 Microdureza

Um microdurômetro da marca *Vision* modelo *MIC VISION VH-1*, situado no laboratório de materiais da Símeros, foi usado para definição do perfil de microdureza da seção transversal das amostras soldadas. Foram feitas 15 indentações por amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Registro térmico

A Figura 17 mostra a temperatura máxima atingida e lida pelos termopares fixados na face oposta dos cordões de solda durante a soldagem.

Pode-se perceber que as amostras Y12, Y21 e Y32 foram as que apresentaram maiores variações se comparado aos outros cordões de solda com a mesma corrente, fato que pode ser explicado pelos seguintes fatores:

- Aquecimento remanescente da peça entre uma soldagem e outra.
- Variação no tempo de soldagem entre um CP e outro, devido ao processo de soldagem ter sido manual.
- Erro de leitura do termopar.

Analisando de forma geral, verifica-se que o uso de maiores correntes de soldagem nesse caso não influenciou de forma significativa a temperatura atingida na face oposta da soldagem. Os menores valores encontrados de temperatura foram em soldagem com 70 A e os maiores valores ocorreram em soldagem com 60 A. Analisando a Equação (3) que mostra a energia de soldagem, verifica-se que possivelmente a soldagem em corrente de 60 A ocorreu com menores velocidades de soldagem, por consequência maior tempo de arco e maior energia.

Pelos resultados obtidos nos testes de temperatura, pode-se dizer que a corrente de soldagem 70 A melhor se adaptaria ao uso diário, visto que no geral os valores de temperatura medidos na face oposta da solda foram menores do que os valores de temperatura máxima de operação dos materiais usados na fabricação da Camada de Estanqueidade (ver Tabela 1). Desta forma, a corrente de 70 A apresenta menor risco de danificar a camada polimérica abaixo da Armadura de Pressão.

Uma possível medida para diminuir a energia de soldagem, seria diminuir a espessura das peças soldadas na Armadura de Pressão, desta maneira, possivelmente se conseguiria soldar com menores correntes ou maiores velocidades de soldagem, mantendo a qualidade do cordão de solda.

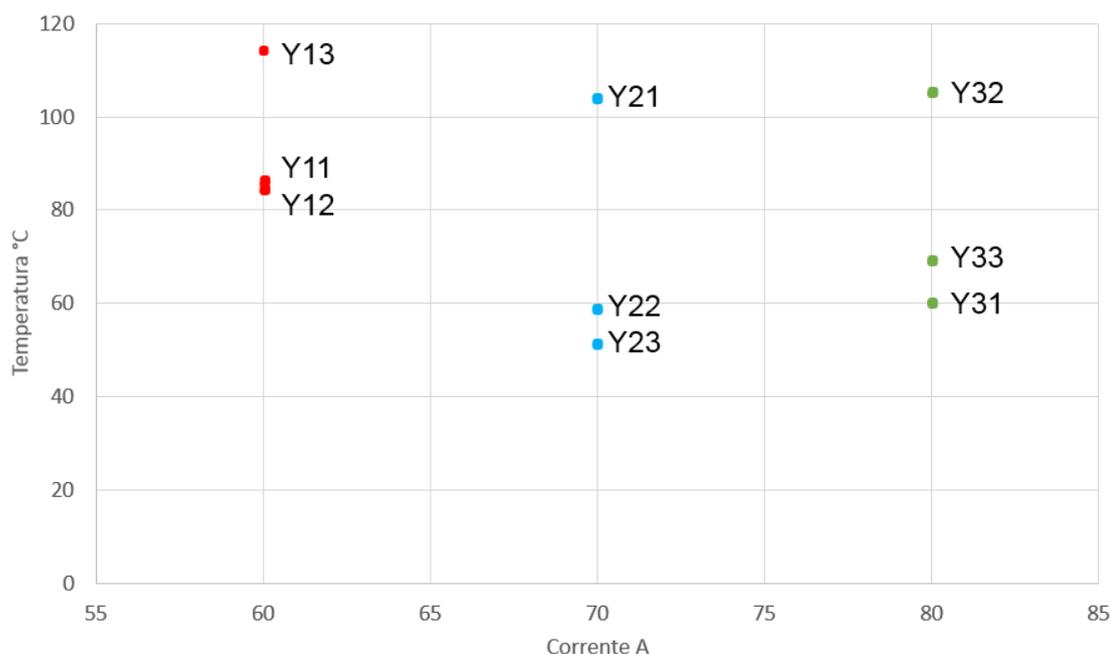


Figura 17 – Temperatura máxima atingida durante a soldagem.

Fonte: O Autor 2021.

5.2 Inspeção visual

Na inspeção visual dos cordões de solda foi encontrado porosidades nas soldas realizadas com TIG em corrente de 60 A (vide Figura 18). Este defeito pode ter ocorrido devido à inclinação excessiva da tocha que permitiu o ingresso de ar e contaminação da poça de fusão ou por deficiência na limpeza. Outro fator que pode ter levado ao surgimento dessas porosidades é a velocidade de soldagem ser muito alta para a corrente em questão, não havendo tempo suficiente para fundir o metal uniformemente e deixando crateras de porosidade na solda. Lembrando que tentou-se manter a mesma velocidade de soldagem manual para todos os cordões de solda e os demais parâmetros foram mantidos fixos.

Nas soldas realizadas com as correntes de 70 e 80 A não foi verificado a presença de defeitos na inspeção visual. Nestas soldas se observou maior homogeneidade e melhor aparência se comparado às soldas feitas com corrente de 60 A.

O registro dimensional com o comprimento dos cordões de solda pode ser visto na Tabela 6.

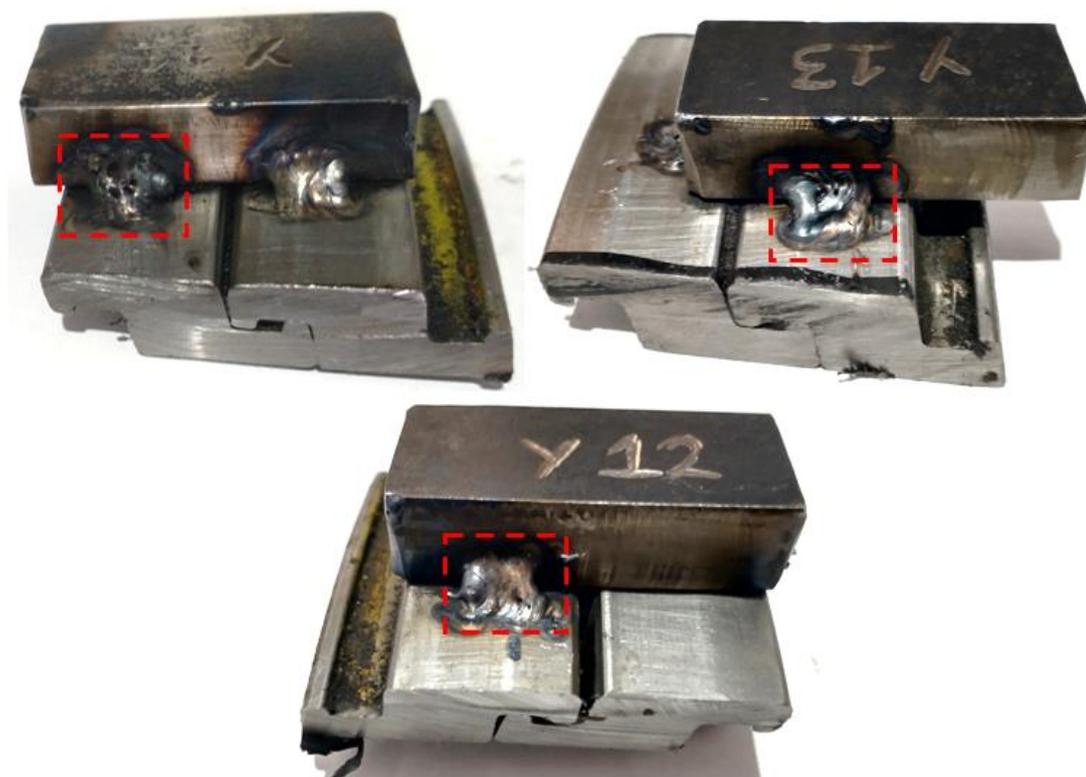


Figura 18 – Evidência de porosidades nas soldas realizadas com corrente de 60 A.
Fonte: O Autor 2021.



Figura 19 – Inspeção visual das soldas realizadas com corrente de 70 A.
Fonte: O Autor 2021.

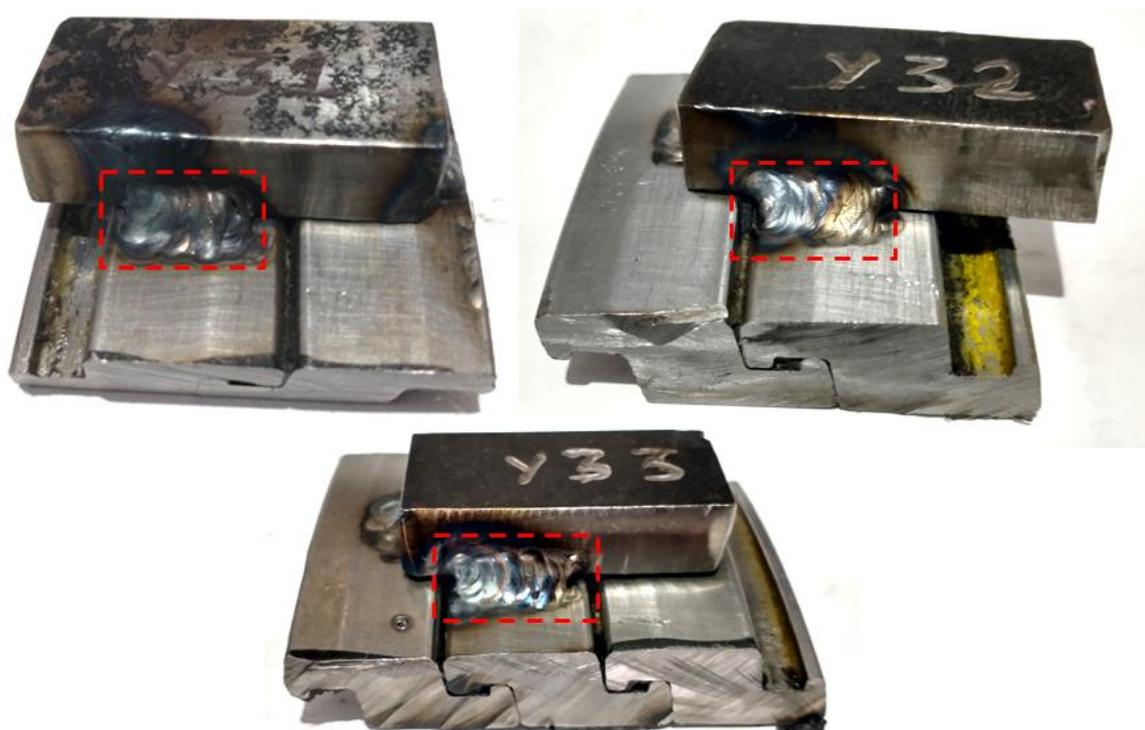


Figura 20 – Inspeção visual das soldas realizadas com corrente de 80 A.

Fonte: O Autor 2021.

Tabela 6 – Registro dimensional comprimento das soldas realizadas.

CP	Y11	Y12	Y13	Y21	Y22	Y23	Y31	Y32	Y33
Medida (mm)	8,0	9,0	9,0	12,0	11,0	13,0	12,0	15,0	14,0

Fonte: O Autor 2021.

5.3 Inspeção por partículas magnéticas

Na inspeção por partículas magnéticas das soldas realizadas, foi encontrado a presença de uma descontinuidade na solda da amostra Y12 (ver Figura 21). Pelas características, forma e localização da descontinuidade encontrada é possível dizer que se trata de trinca na margem do cordão de solda e ZTA.

A descontinuidade detectada na inspeção, possivelmente é do tipo fissuração a frio ou também conhecida como fissuração induzida pelo hidrogênio. Este defeito possivelmente ocorreu devido à excessiva inclinação da tocha que permitiu o ingresso de H₂ na poça de fusão, fato que somado a microestrutura com baixa tenacidade

(Martensita) e a elevada restrição da junta levaram ao aparecimento da trinca por hidrogênio detectada. O carbono equivalente (CE) do material base calculado (usando a Equação (1) e os dados de composição química obtidos na Tabela 2) foi de $CE = 0,50$, que classifica o material como sendo de média sensibilidade à fissuração.

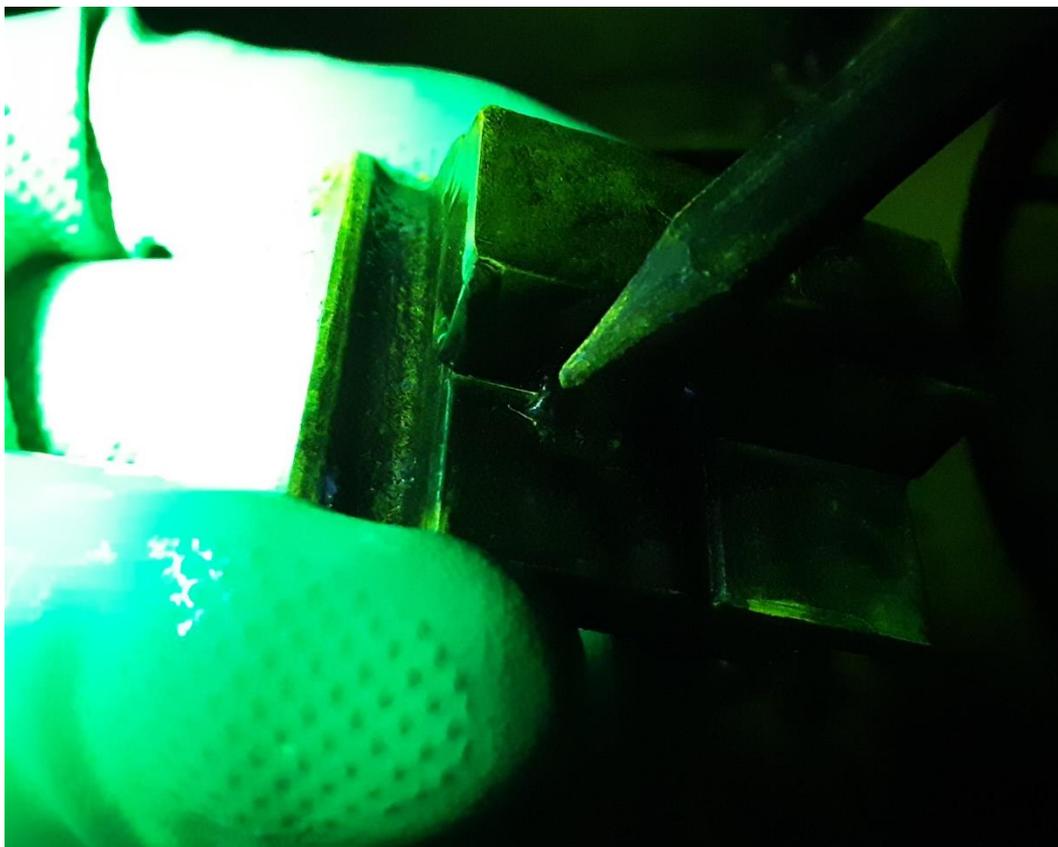


Figura 21 – Indicação da trinca induzida pelo hidrogênio encontrada na amostra Y12.

Fonte: O Autor 2021.

5.4 Macrografia e metalografia

As macrografias e metalografias das amostras soldadas são apresentadas a seguir. Pode-se verificar em todas as macrografias que a espessura dos CPs soldados na Armadura de Pressão é muito maior do que a seção resistente das soldas produzidas, este fato corrobora com a ideia levantada na discussão da seção 5.1 de soldar CPs com menor espessura para diminuir o aporte térmico.

5.4.1 Amostra Y11 (Corrente de soldagem 60A)

A Figura 22 mostra a macrografia da seção transversal do cordão de solda na amostra Y11, nela podem ser observadas: a zona termicamente afetada (ZTA), a zona de fusão e a região do metal base.

Foi delimitado 4 regiões (ver Figura 22) que serão utilizadas na sequência para avaliar as microestruturas e defeitos encontrados.

Foi optado por discutir detalhadamente apenas as microestruturas vistas na amostra Y11, isso devido às microestruturas se manterem as mesmas para as 9 amostras analisadas.

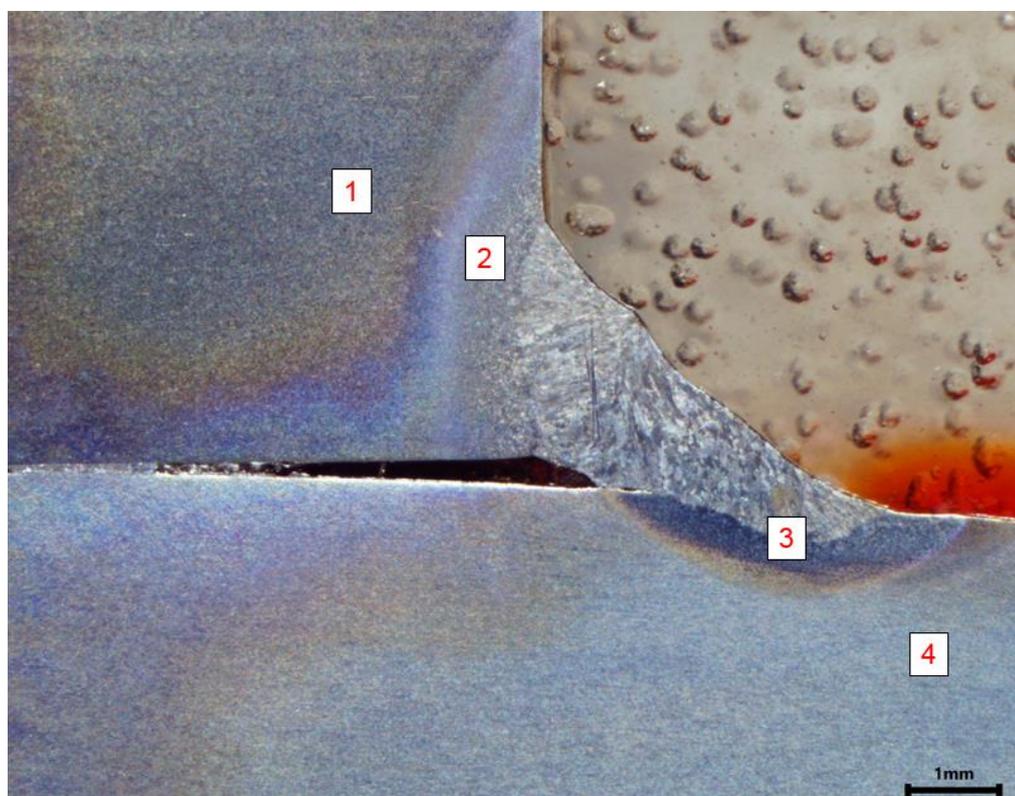


Figura 22 – Macrografia da amostra Y11. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

Região 1

Esta região representa a porção microestrutural do material base composto pela chapa retangular de material ASTM A36. Essa porção não sofreu mudança microestrutural durante a soldagem.

Na Figura 23 pode observar-se a Região 1 que é composta basicamente por perlita (regiões escuras) juntamente com ferrita acicular (regiões claras).

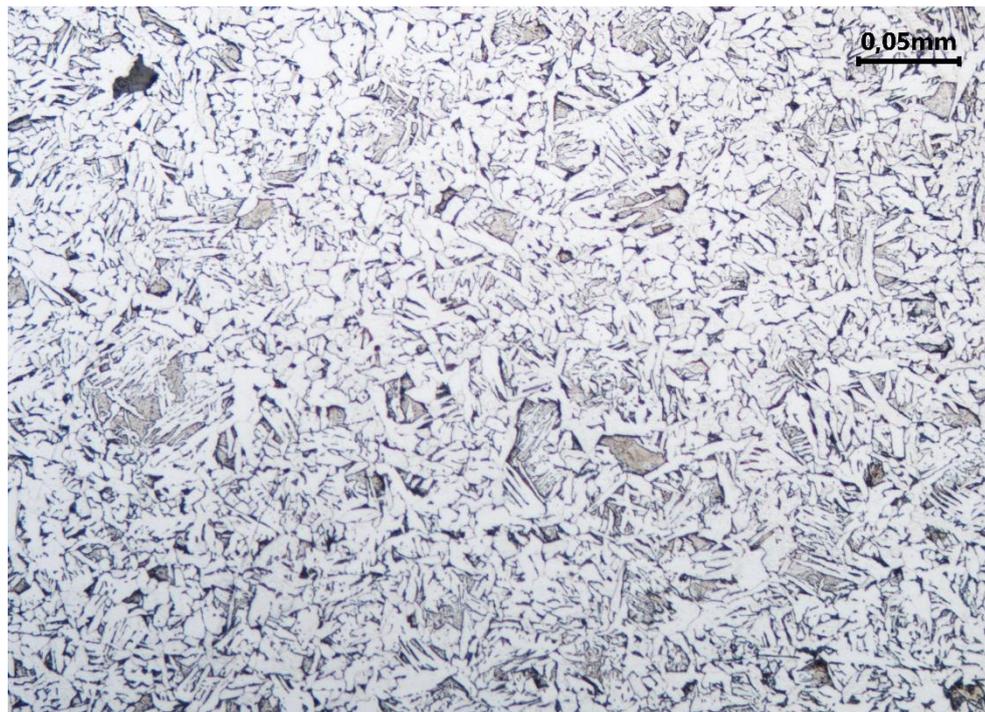


Figura 23 – Metalografia da região 1, amostra Y11. 200x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

Região 2

A região 2 é composta pela zona termicamente afetada e zona de fusão da solda.

A Figura 24 mostra a transição microestrutural entre metal base e ZTA em X e em Y mostra a transição microestrutural entre ZTA e zona de fusão.

A Figura 25 mostra em detalhe a região X da Figura 24. É possível observar a transição microestrutural entre metal base (perlita +ferrita acicular) em A para ZTA (Martensita não revenida) em B.

Na Figura 26 é representado em detalhe a região Y da Figura 24. Pode-se verificar a presença de martensita em ambas as regiões, sendo na zona de fusão (D) uma martensita mais grosseira e na ZTA (C) com granulação mais refinada.

A microestrutura martensita não é desejada nas soldas, pois apresenta baixa tenacidade e alta facilidade de formar trincas durante a soldagem ou posteriormente durante operação.

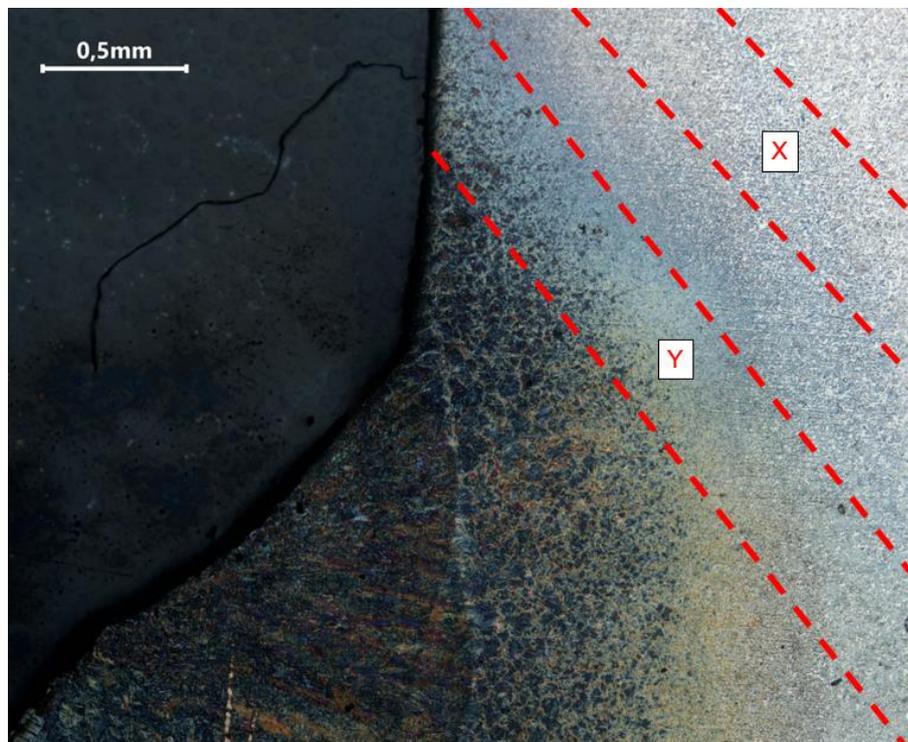


Figura 24 – Metalografia da região 2, amostra Y11. 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

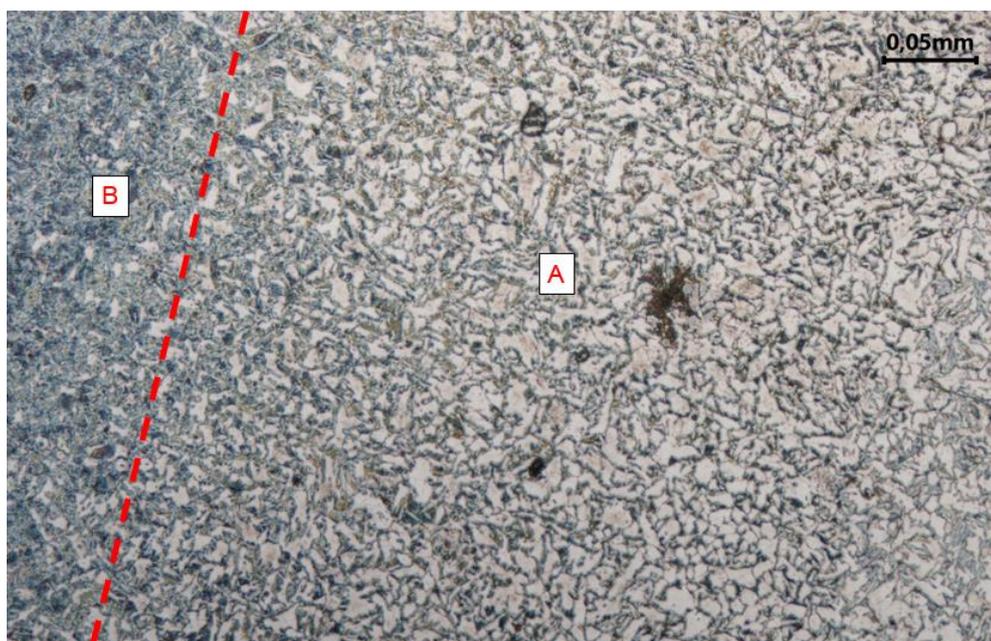


Figura 25 – Mudança microestrutura metal base para ZTA. 200x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

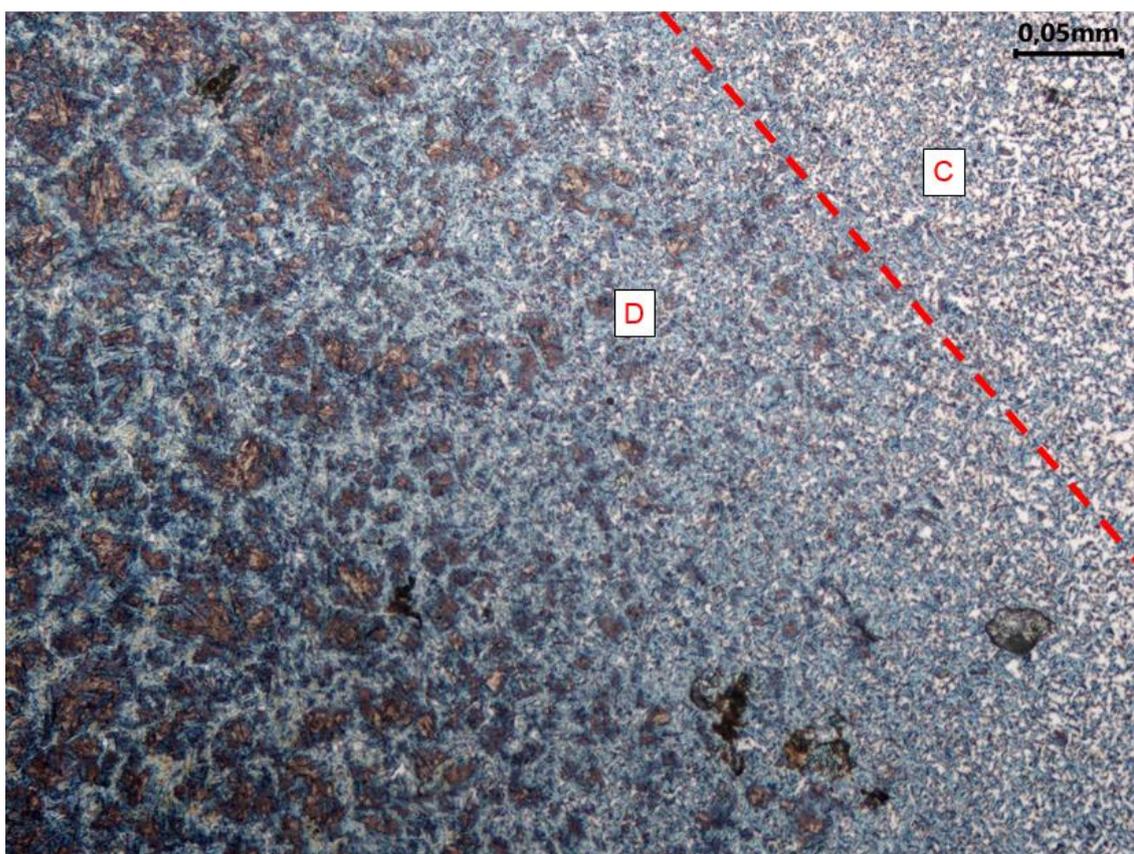


Figura 26 – Mudança microestrutural na ZTA para zona de fusão. 200x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

Região 3

A região 3 representa a região entre a solda e a Armadura de Pressão, na Figura 27 está destacado a falta de fusão entre o cordão de solda e camada, o que configura diminuição da resistência da solda.

Na Figura 28 é possível ver a mudança entre a microestrutura presente no metal base em A (ferrita + perlita) para a ZTA em B (ilhas de ferrita + martensita).

Na Figura 29 é mostrado a mudanças da microestruturais presentes na ZTA. Observa-se em C uma estrutura martensítica com ilhas de ferrita, em D verifica-se um refinamento de grão com estrutura martensítica e em E presença de martensita mais grosseira.



Figura 27 – Metalografia da região 3, amostra Y11. 50x, Nital 2%.
Fonte: O Autor 2021.

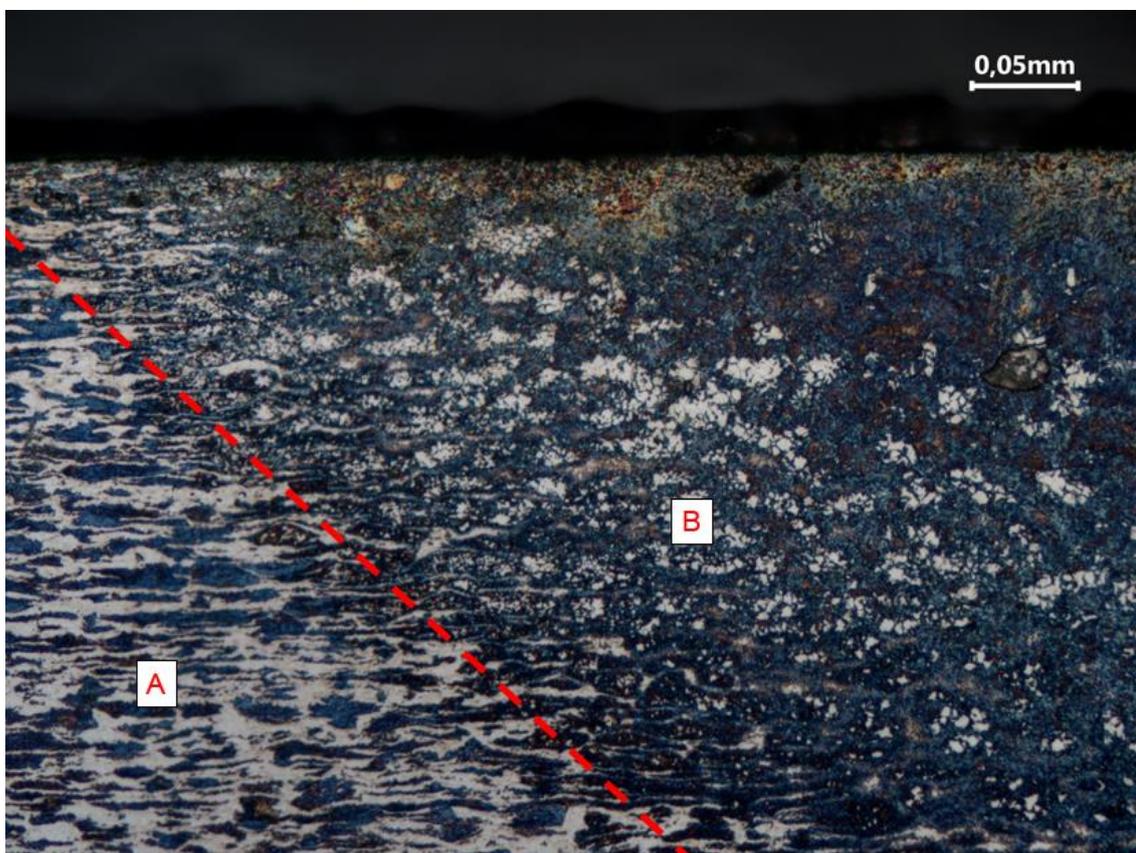


Figura 28 – Mudança microestrutural entre metal base e ZTA. 200x, Nital 2%.
Fonte: O Autor 2021.

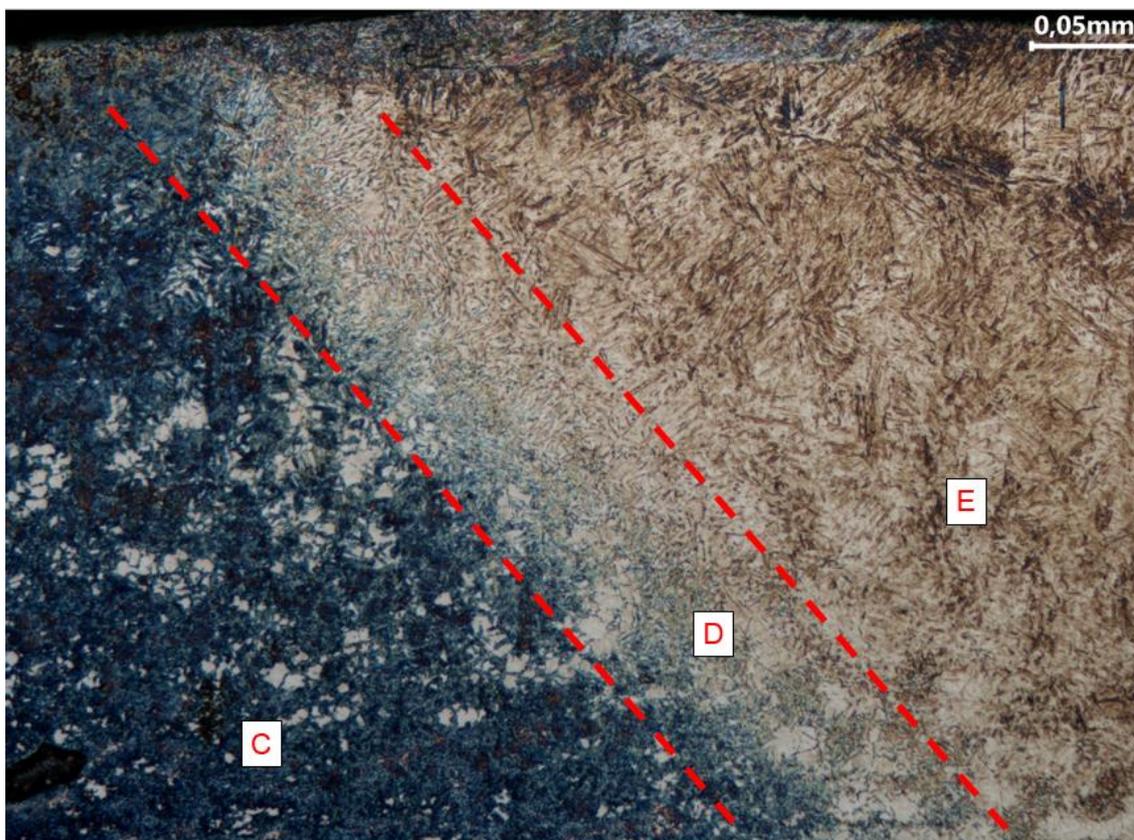


Figura 29 – Mudança microestrutural entre ZTA. 200x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

Região 4

A região 4 é a região da Armadura de Pressão que não foi afetada pelo calor gerado na soldagem. Analisando a Figura 30 é possível dizer que trata-se de uma microestrutura composta de matriz ferrítica com ilhas de perlita (ferrita + cementita) que seguem o sentido de laminação proveniente da fabricação.



Figura 30 – Metalografia da região 4, amostra Y11. 200x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.4.2 Amostra Y12 (Corrente de soldagem 60 A)

A Figura 31 mostra a região onde foi detectada uma trinca na inspeção por partículas magnéticas, é destacado o início da trinca formada.

A Figura 32 mostra a macrografia do cordão de solda, pode-se observar a falta de fusão nas 2 regiões destacadas.

Na Figura 33 observa-se as transições microestruturais entre o material base e a ZTA. Em A é possível verificar a microestrutura ferrítica com ilhas de perlita do material base composto pela Armadura de Pressão e a microestrutura presente na zona de fusão composta de martensita não revenida. Em B existem as microestruturas do material base da chapa retangular com microestrutura de ferrita acicular/perlita e da zona de fusão com microestruturas de martensita não revenida.

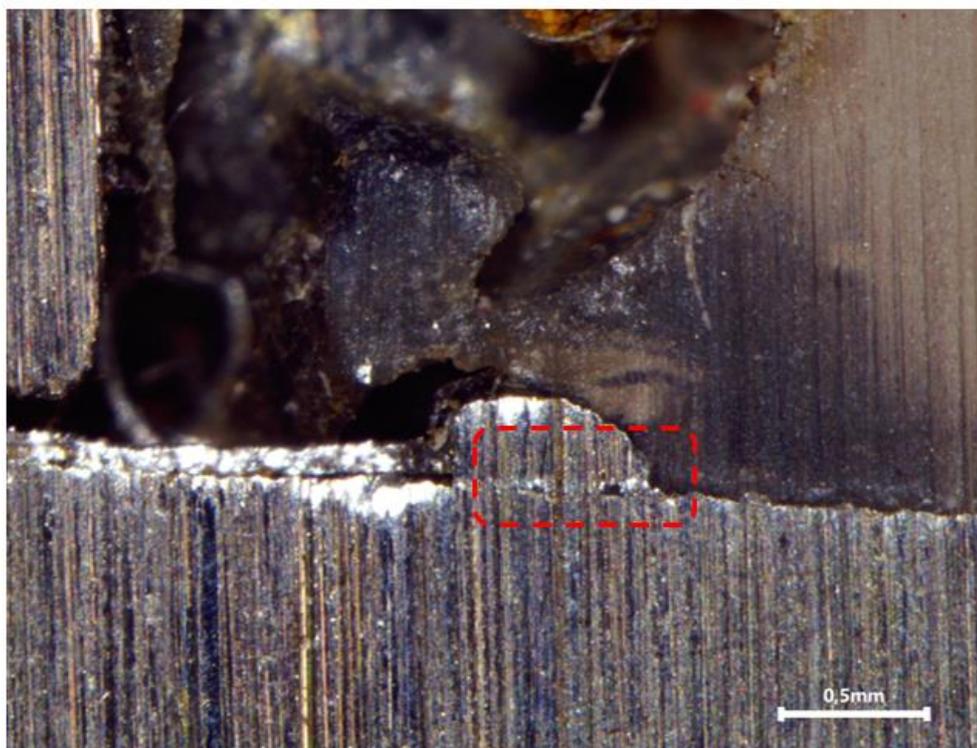


Figura 31 – Início da trinca encontrada na inspeção por partículas magnéticas. 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

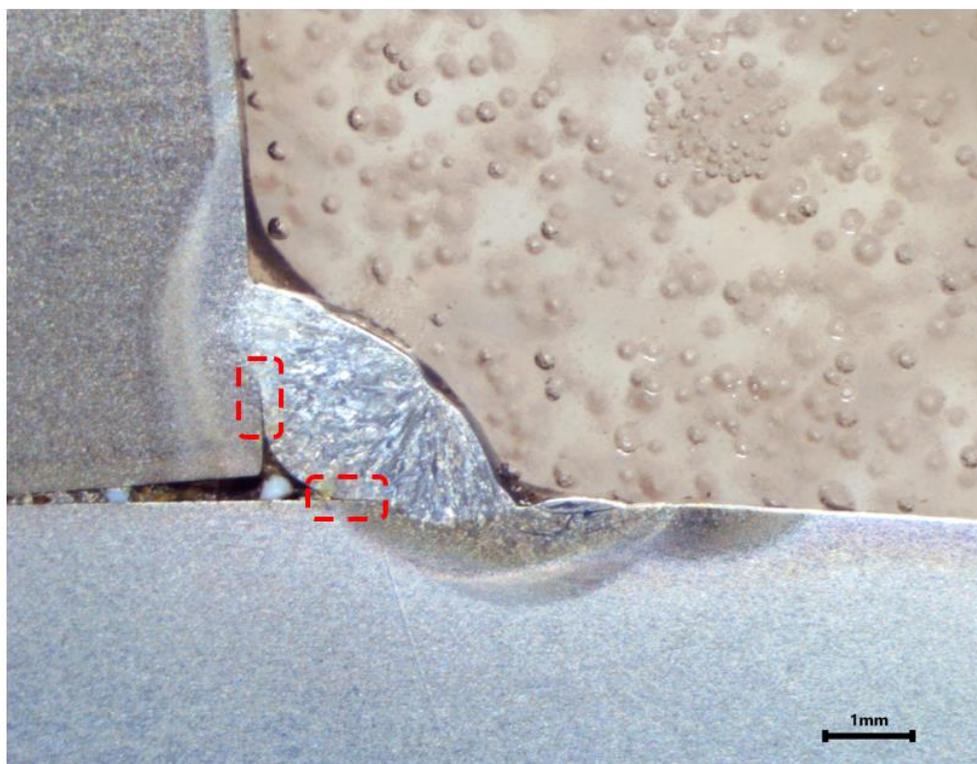


Figura 32 – Macrografia da amostra Y12. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.



Figura 33 – Transições microestruturais entre material base ZTA (Y12). (A) 50x; (B)50x: Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.4.3 Amostra Y13 (Corrente de soldagem 60 A)

Na Figura 34 é mostrado a macrografia da amostra Y13. Pode-se verificar os seguintes defeitos de soldagem presentes: Presença de 3 porosidades, a geometria do cordão está com convexidade excessiva e há falta de fusão na região da raiz da solda.

Na Figura 35 observa-se as transições microestruturais entre o material base e a ZTA. Em A é possível verificar a microestrutura ferrítica com ilhas de perlita do material base composto pela chapa retangular, em B verifica-se o refino de grão presente na ZTA composto de estrutura martensítica e em C a microestrutura presente é martensita com grão maior da zona de fusão.

Já na Figura 36 em D verifica-se a microestrutura da Armadura de Pressão composta de ferrita com ilhas de perlita. Em E inicia-se a ZTA com microestrutura de ferrita e martensita refinada, enquanto que em F há martensita com grão mais grosseiro da zona de fusão.

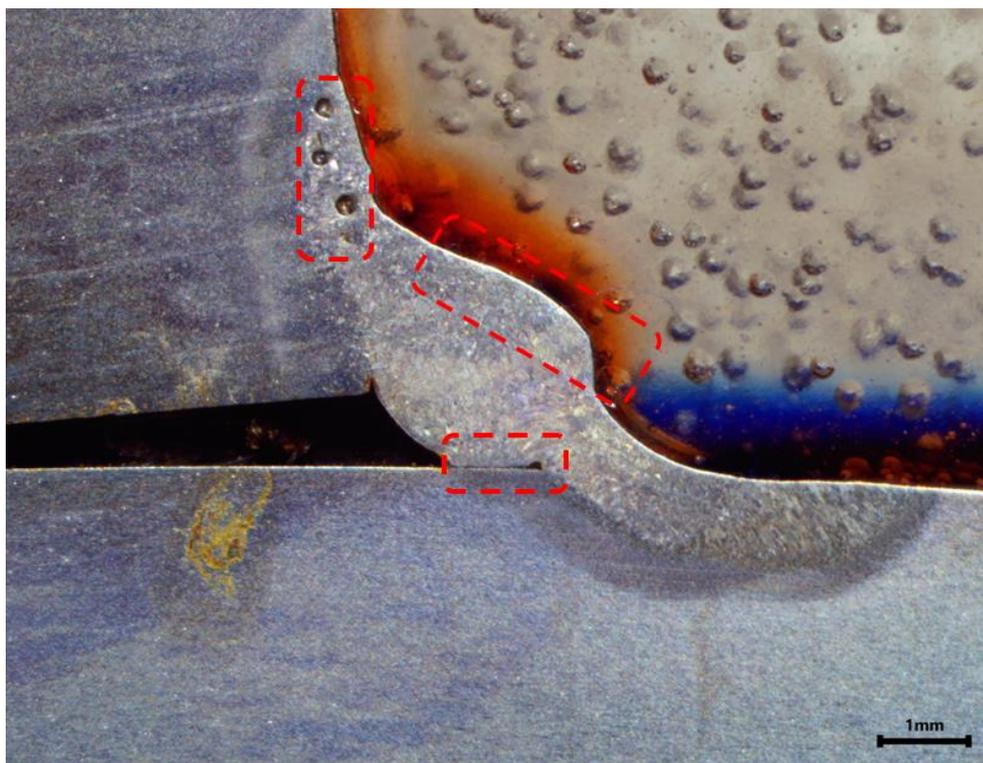


Figura 34 – Macrografia da amostra Y12. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

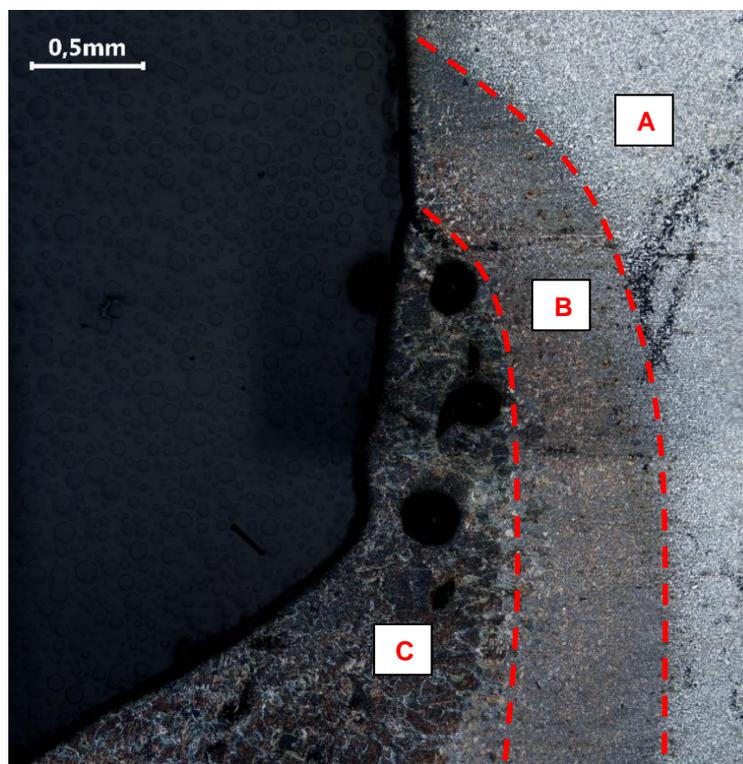


Figura 35 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y13). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

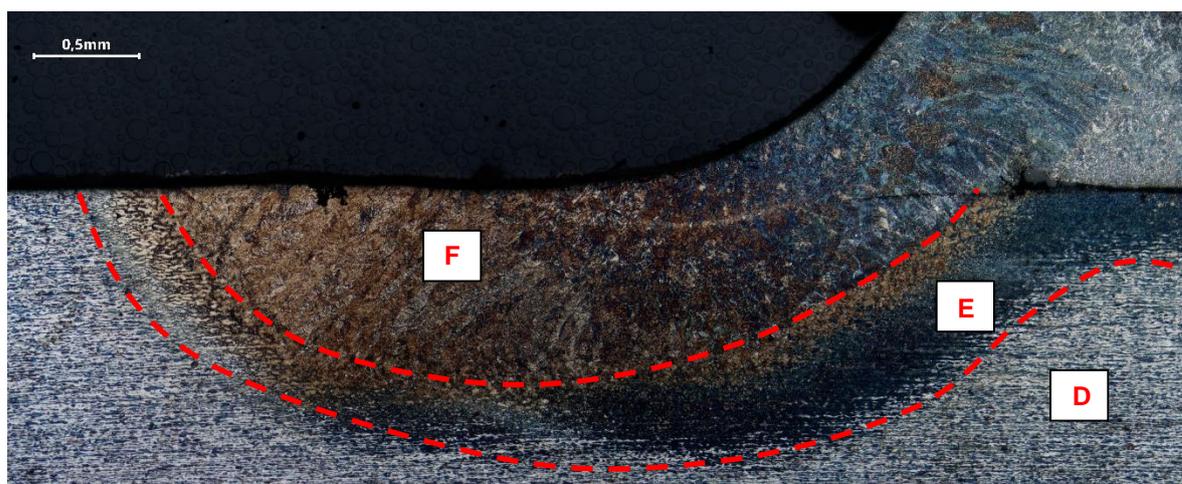


Figura 36 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y13). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.4.4 Amostra Y21 (Corrente de soldagem 70 A)

Na Figura 37 é possível verificar a assimetria da solda com pernas significativamente desiguais mostradas na macrografia. Essa anomalia é considerada um defeito de soldagem, pois representa diferentes valores de resistência metais base na região da solda.

Na Figura 38 observa-se as transições microestruturais entre o material base da chaparectangular e a ZTA. Em A se tem microestrutura ferrítica com ilhas de perlita, em B verifica-se o refino de grão presente na ZTA com microestrutura martensítica e em C a microestrutura presente é martensita com grão maior da zona de fusão.

Já na Figura 39 em D verifica-se a microestrutura da Armadura de Pressão composta de ferrita com ilhas de perlita. Em E inicia-se a ZTA com microestrutura de ferrita e martensita refinada, enquanto que em F há martensita com grão mais grosseiro da zona de fusão.

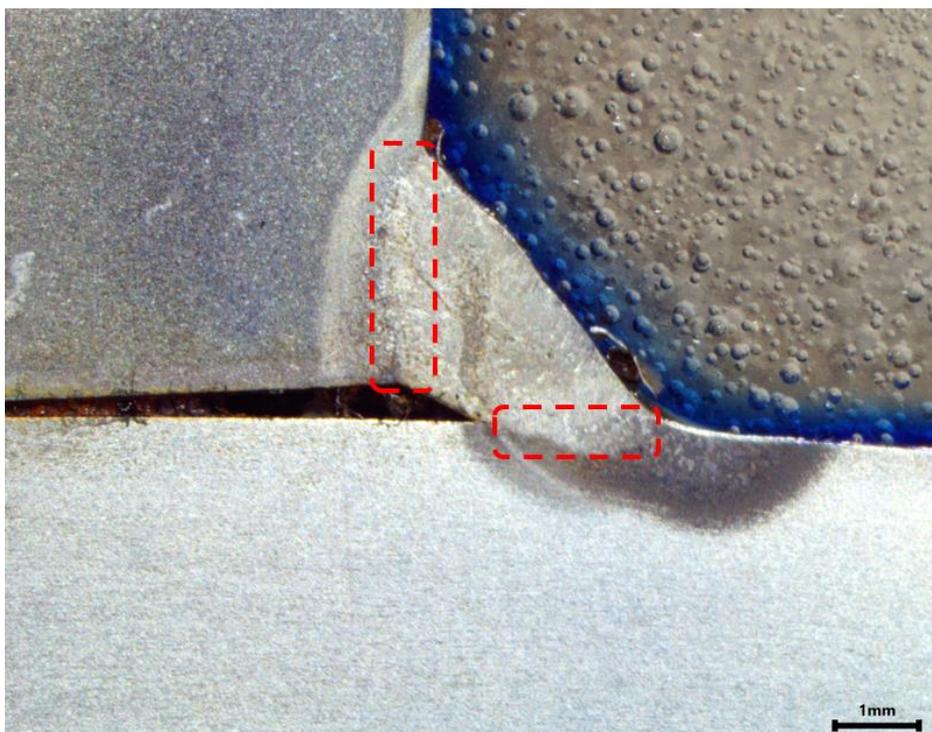


Figura 37 – Macrografia da amostra Y12. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

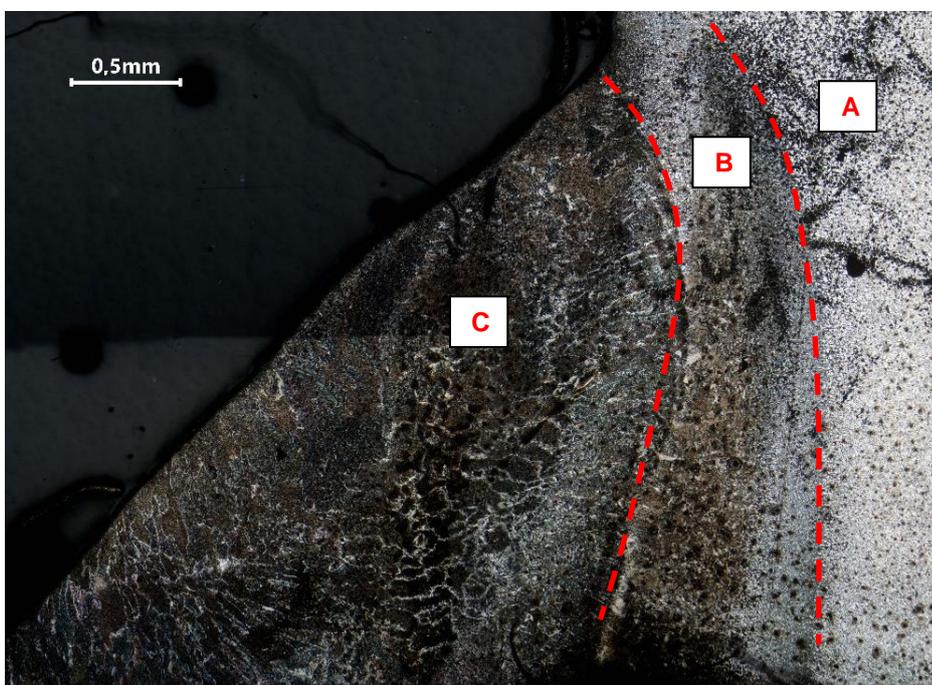


Figura 38 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y21). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

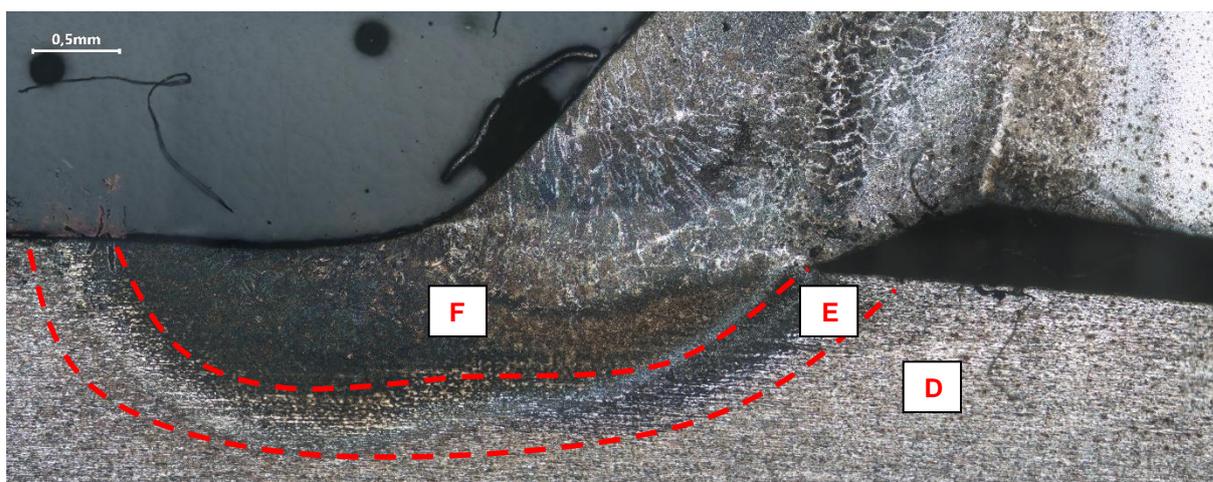


Figura 39 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y21). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.4.5 Amostra Y22 (Corrente de soldagem 70 A)

A Figura 40 mostra a macrografia do cordão de solda da amostra Y22. Se comparado aos cordões de solda analisados anteriormente, é possível verificar maior homogeneidade, melhor aspecto e não há presença de defeitos nesse cordão.

Na Figura 41 observa-se as transições microestruturais entre o material base e a ZTA. Em A existem as microestruturas do material base da chapa retangular com microestrutura de ferrita acicular/perlita e da zona de fusão com microestrutura de martensita não revenida. Em B verifica-se a microestrutura ferrítica com ilhas de perlita do material base composto pela Armadura de Pressão e a microestrutura presente na zona de fusão composta de martensita não revenida.

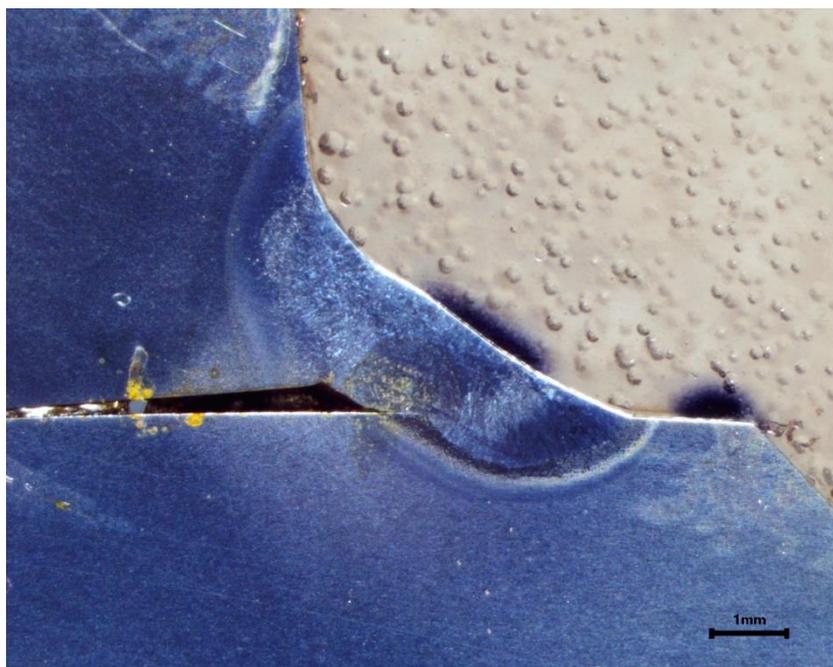


Figura 40 – Macrografia da amostra Y22. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

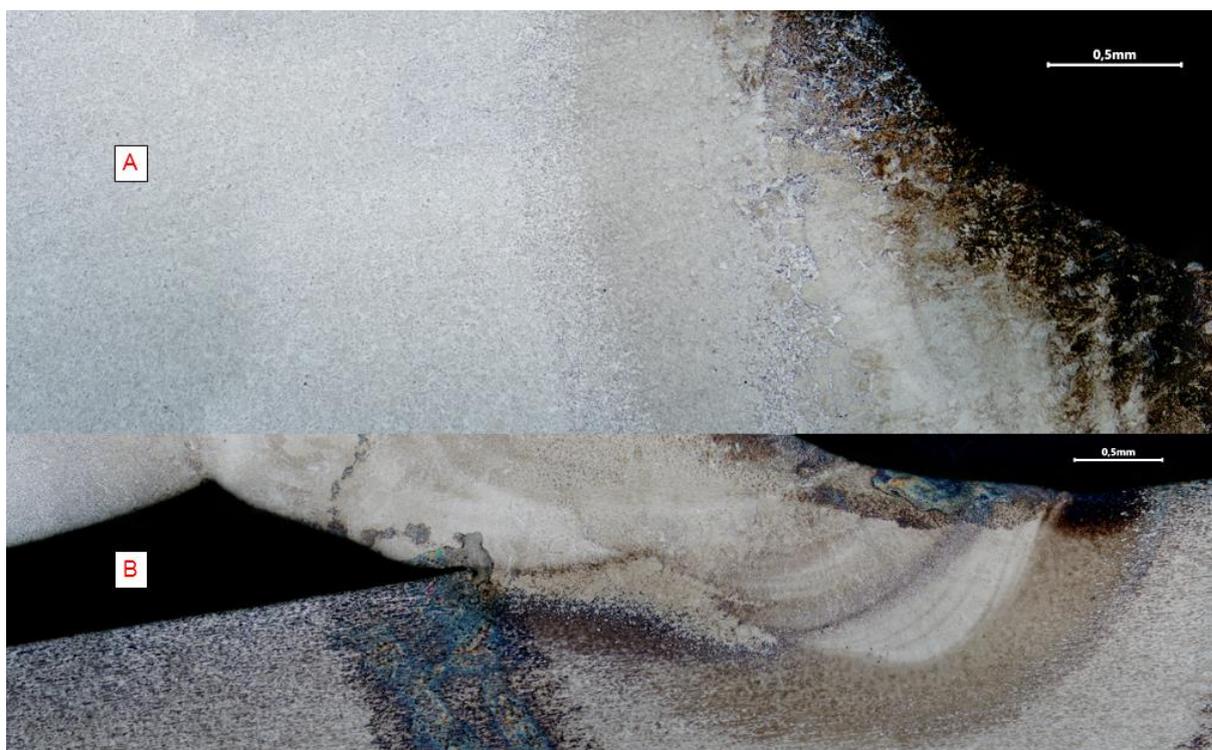


Figura 41 – Transições microestruturais entre material base ZTA (Y22). (A) 50x;
(B) 50x: Nital 2%

Fonte: O Autor 2021.

5.4.6 Amostra Y23 (Corrente de soldagem 70 A)

A Figura 42 mostra a macrografia do cordão de solda da amostra Y23. Com exceção da falta de fusão entre cordão e raiz encontrada, a solda se apresentou com bom aspecto e homogênea.

Na Figura 43 observa-se as transições microestruturais entre o material base da chapa retangular e a ZTA. Em A microestrutura ferrítica com ilhas de perlita, em B verifica-se refino de grão presente na ZTA com microestrutura martensítica e em C a microestrutura presente é martensita com grão maior da zona de fusão.

Já na Figura 44 em D verifica-se a microestrutura da Armadura de Pressão composta de ferrita com ilhas de perlita. Em E inicia-se a ZTA com microestrutura de ferrita e martensita refinada, enquanto que em F há martensita com grão mais grosseiro da zona de fusão.

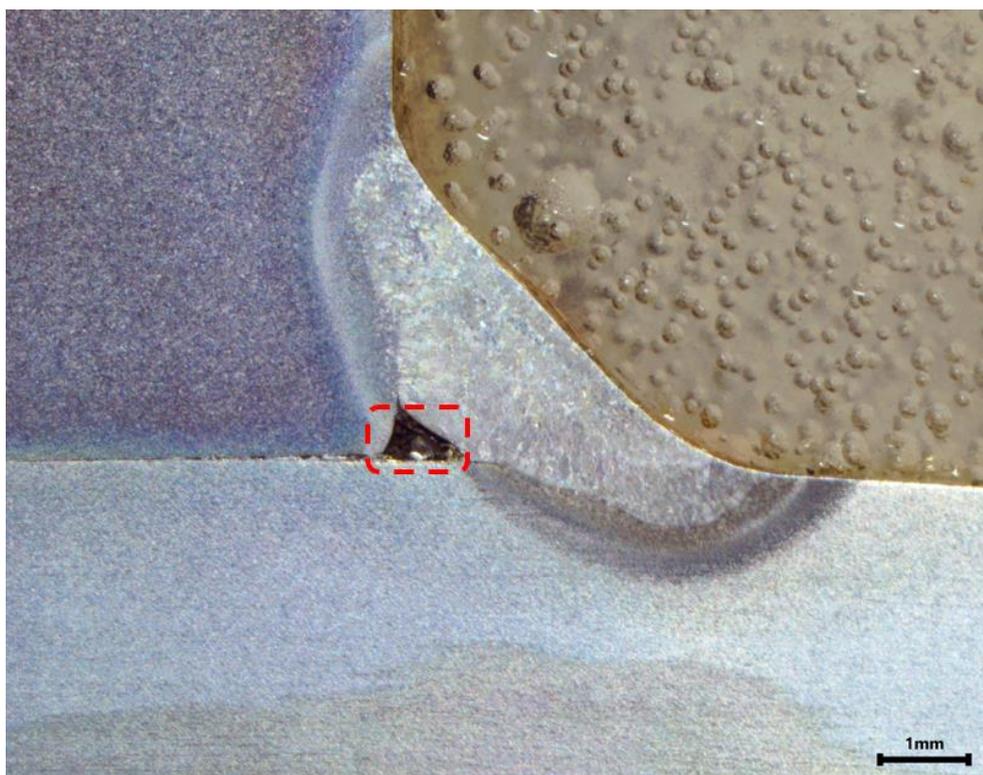


Figura 42 – Macrografia da amostra Y23. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

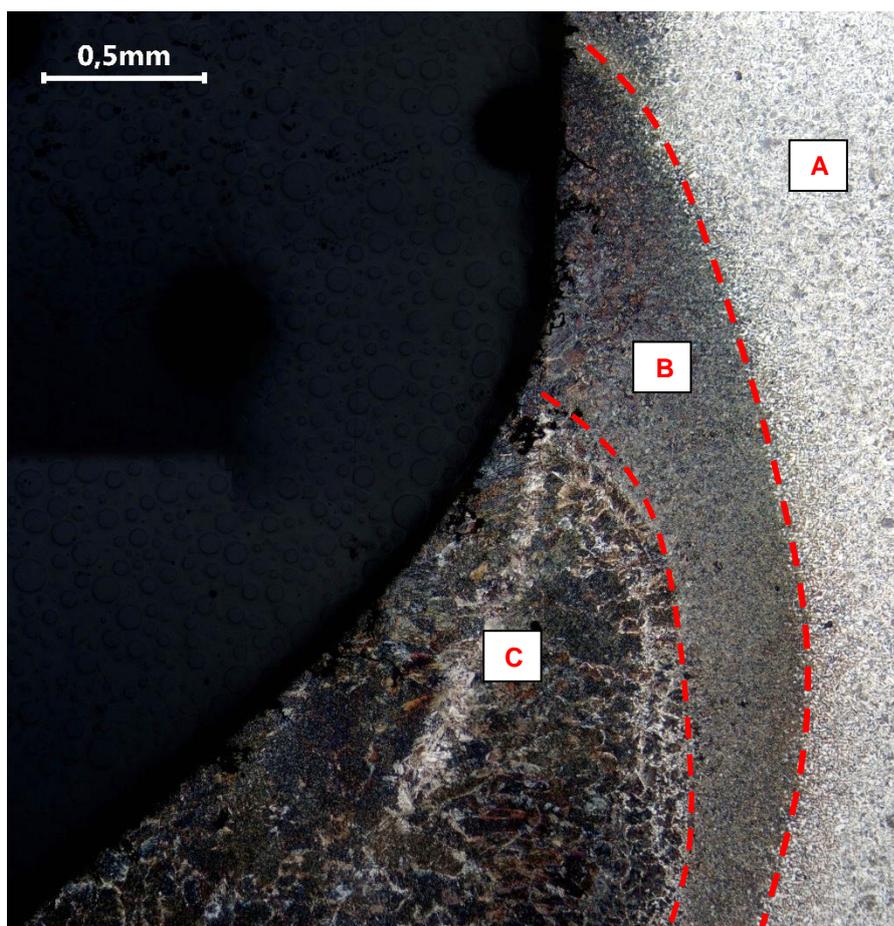


Figura 43 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y23). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

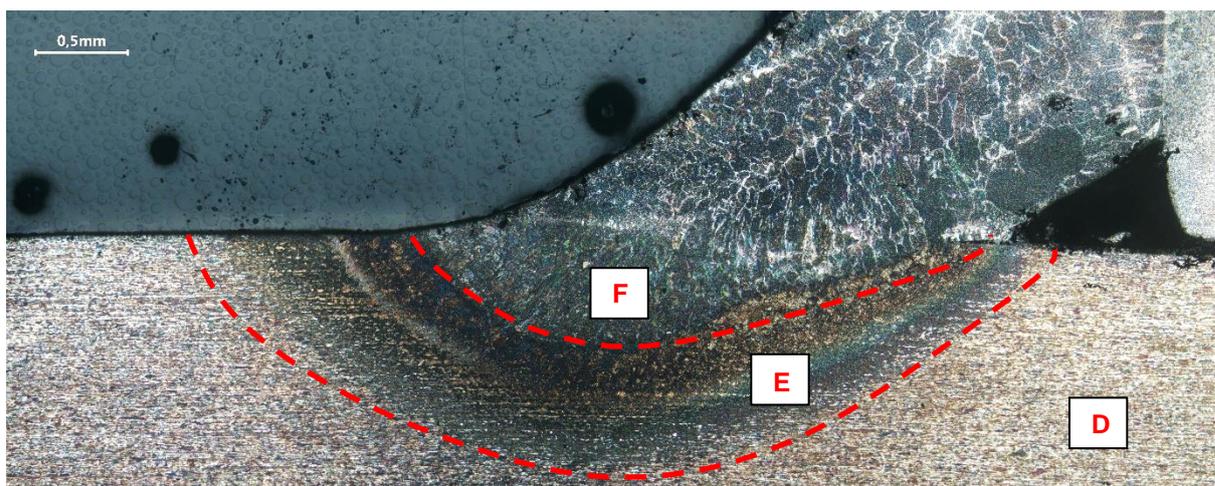


Figura 44 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y23). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.4.7 Amostra Y31 (Corrente de soldagem 80 A)

A Figura 45 mostra a macrografia do cordão de solda da amostra Y31. Foi encontrado falta de fusão entre cordão e raiz na amostra analisada.

Na Figura 46 observa-se as transições microestruturais entre o material base da chapa retangular e a ZTA. Em A microestrutura ferrítica com ilhas de perlita, em B verifica-se refino de grão presente na ZTA com microestrutura martensítica e em C a microestrutura presente é martensita com grão maior da zona de fusão.

Já na Figura 47 em D verifica-se a microestrutura da Armadura de Pressão composta de ferrita com ilhas de perlita. Em E inicia-se a ZTA com microestrutura de ferrita e martensita refinada, enquanto que em F há martensita com grão mais grosseiro da zona de fusão.

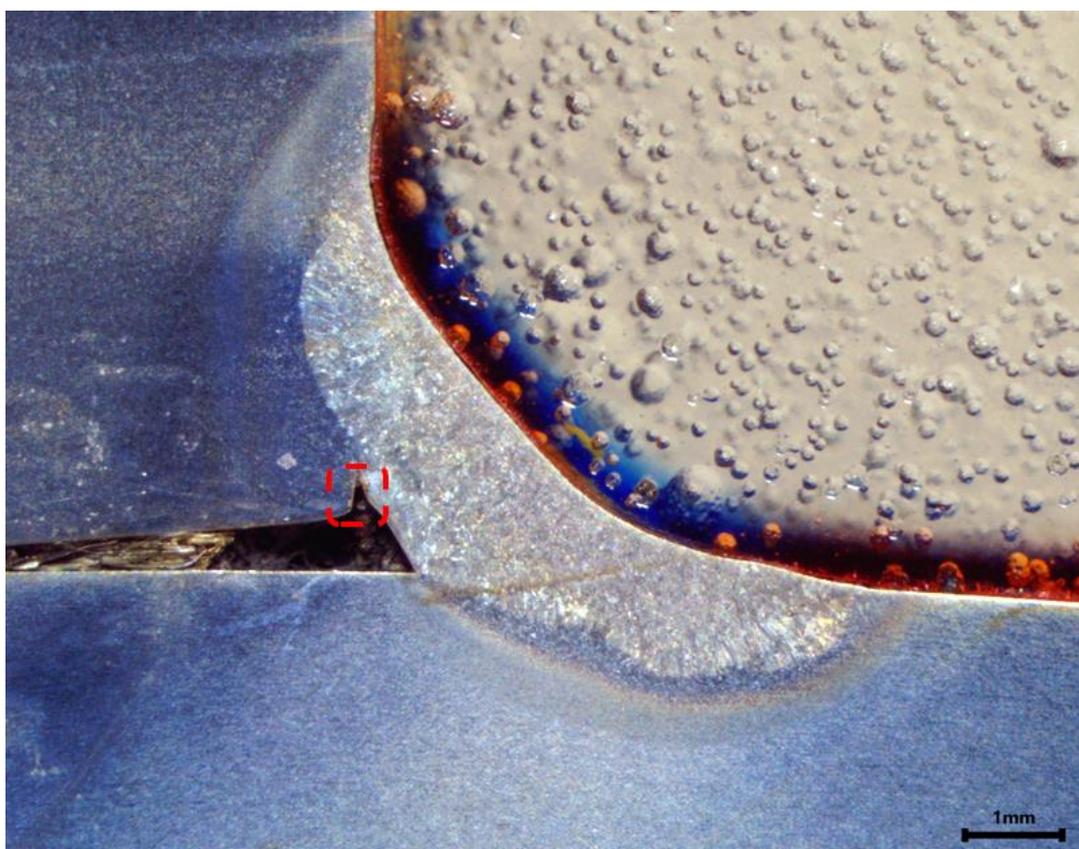


Figura 45 – Macrografia da amostra Y31. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

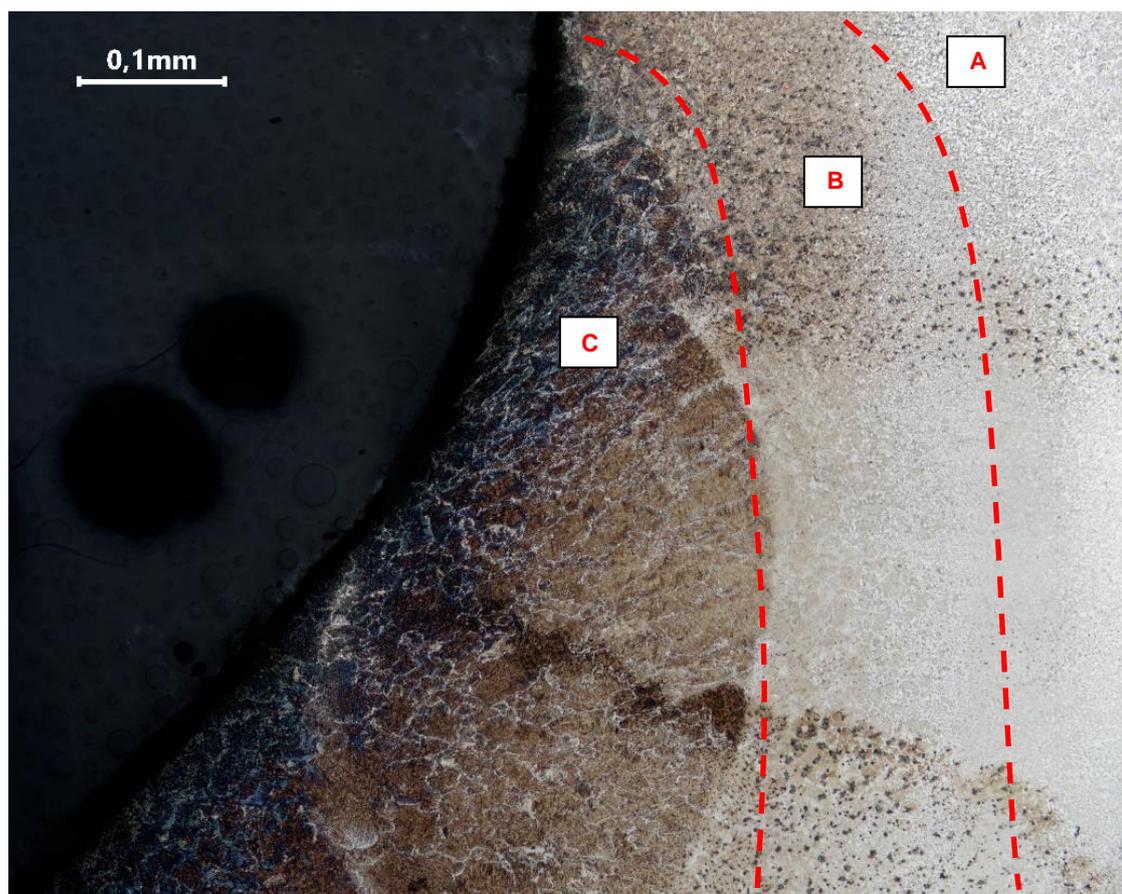


Figura 46 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y31). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

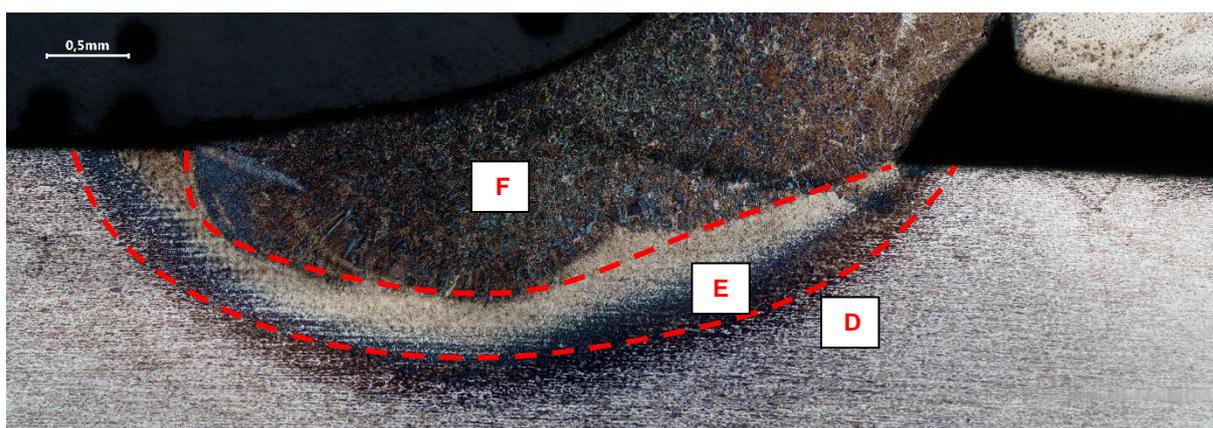


Figura 47 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y31). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.4.8 Amostra Y32 (Corrente de soldagem 80 A)

A Figura 48 mostra a macrografia do cordão de solda da amostra Y23. Pode-se observar homogeneidade na solda, cordão simétrico e sem presença de defeitos.

Na Figura 48 observa-se as transições microestruturais entre o material base da chapa retangular e a ZTA. Em A microestrutura ferrítica com ilhas de perlita, em B verifica-se refino de grão presente na ZTA com microestrutura martensítica e em C a microestrutura presente é martensita com grão maior da zona de fusão.

Já na Figura 49 em D verifica-se a microestrutura da Armadura de Pressão composta de ferrita com ilhas de perlita. Em E inicia-se a ZTA com microestrutura de ferrita e martensita refinada, enquanto que em F há martensita com grão mais grosseiro da zona de fusão.

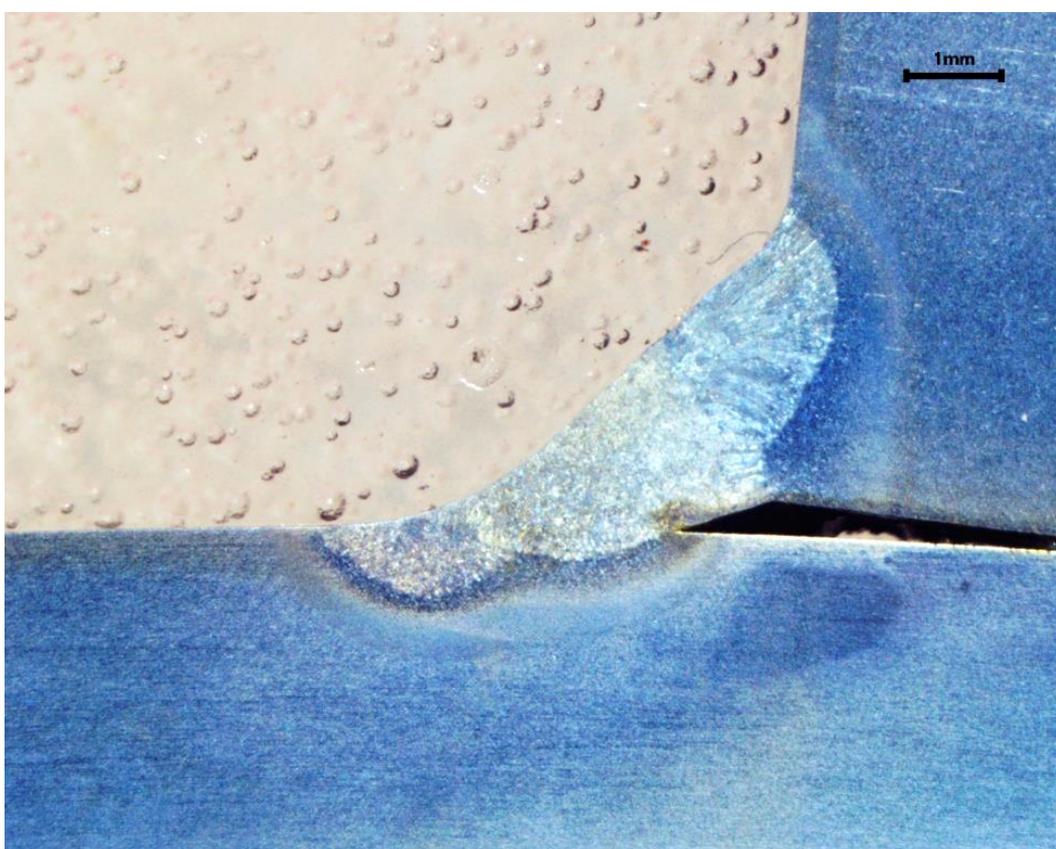


Figura 48 – Macrografia da amostra Y32. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

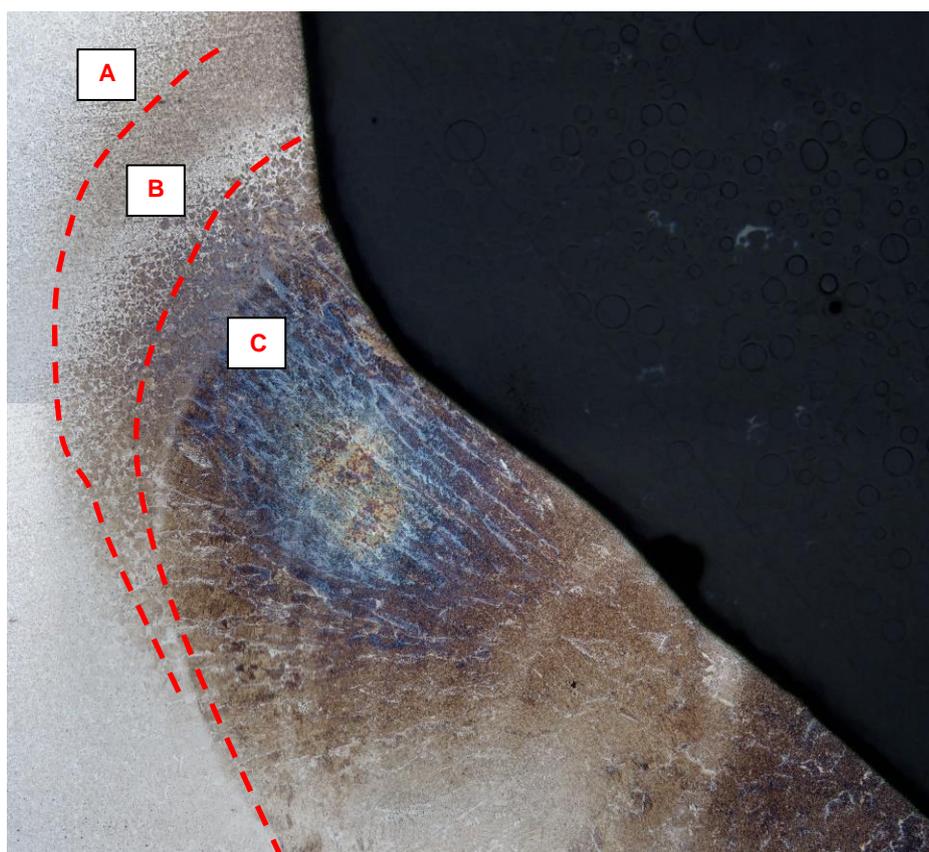


Figura 49 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y32). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

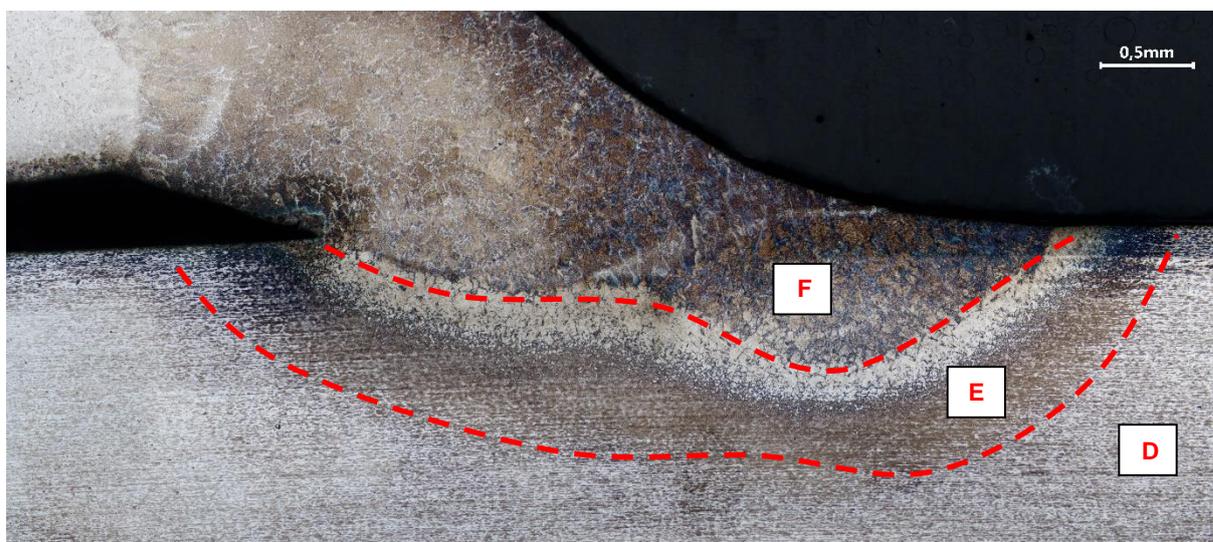


Figura 50 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y32). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.4.9 Amostra Y33 (Corrente de soldagem 80 A)

A Figura 51 mostra a macrografia do cordão de solda da amostra Y23. Pode-se observar homogeneidade na solda, cordão simétrico e sem presença de defeitos.

Na Figura 52 observa-se as transições microestruturais entre o material base da chapa retangular e a ZTA. Em A microestrutura ferrítica com ilhas de perlita, em B verifica-se refino de grão presente na ZTA com microestrutura martensítica e em C a microestrutura presente é martensita com grão maior da zona de fusão.

Já na Figura 53 em D verifica-se a microestrutura da Armadura de Pressão composta de ferrita com ilhas de perlita. Em E inicia-se a ZTA com microestrutura de ferrita e martensita refinada, enquanto que em F há martensita com grão mais grosseiro da zona de fusão.

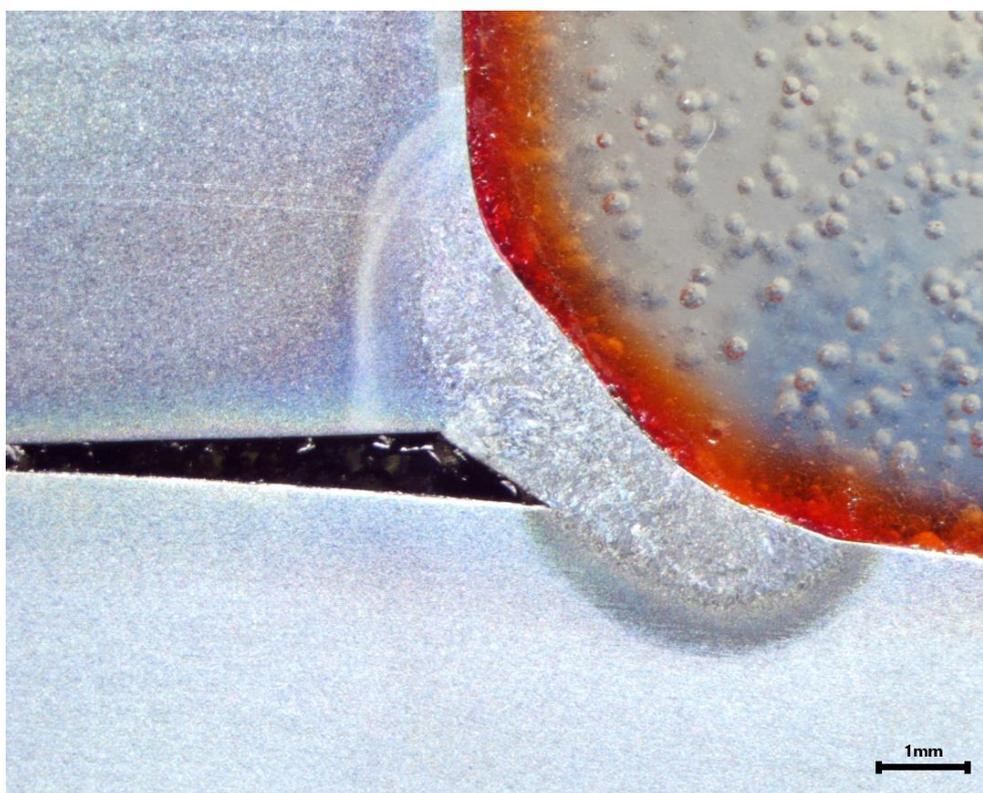


Figura 51 – Macrografia da amostra Y33. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

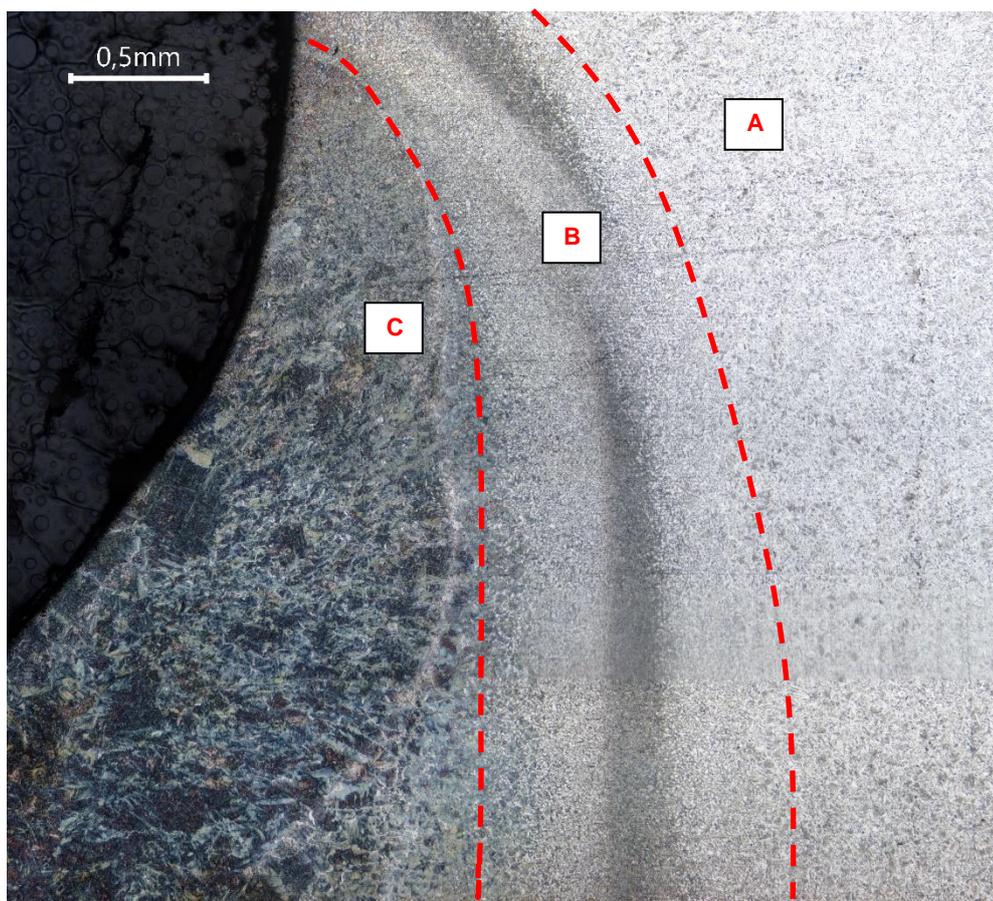


Figura 52 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y33). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

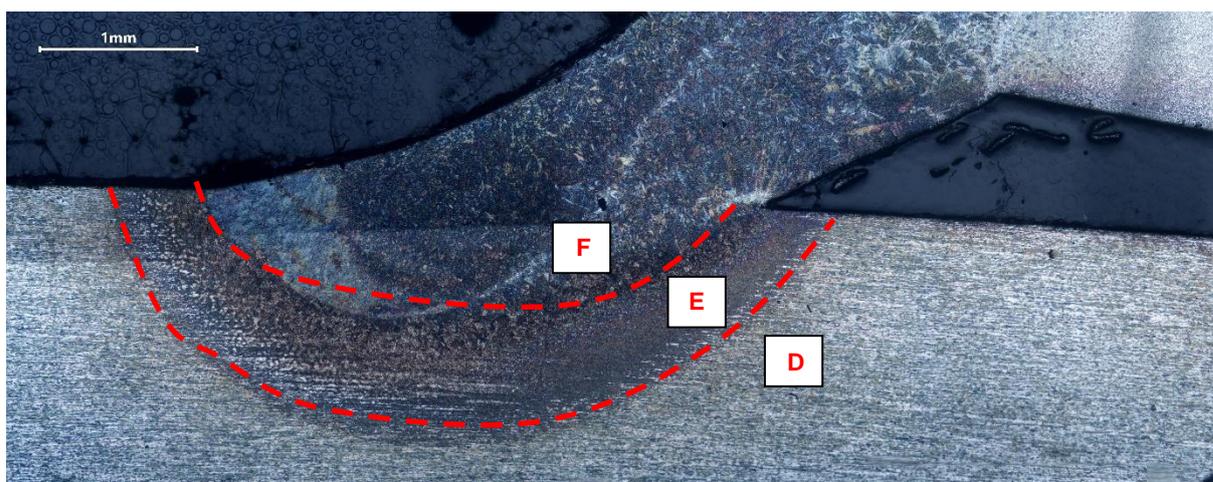


Figura 53 – Mudança microestrutural entre ZTA e zona de fusão (Y33). 50x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

5.5 Microdureza

O caminho das indentações ao longo da seção transversal das soldas é mostrado na Figura 54 e os dados obtidos no ensaio de microdureza para as amostras são apresentados na Tabela 7.

Pode-se verificar que os pontos 11 e 12 apresentaram os maiores valores de microdureza em todas as amostras. A região 3 é onde está localizado esses pontos (vide Figura 22), os altos valores de microdureza ali encontrados são devido à martensita presente que possui mais alto teor de carbono (~0,35%) somado ao grão mais refinado da ZTA.

Os menores valores de microdureza são vistos no metal base de composição ASTM A36 que não sofreu mudança microestrutural no processo de soldagem. Estes valores são condizentes com a microestrutura de ferrita acicular e perlita presentes na região e ao menor teor de carbono.

Olhando para o conjunto de amostras de cada corrente de soldagem, pode-se dizer que na média os valores de dureza obtidos são maiores para as amostras soldadas com TIG em corrente de 80 A. Possivelmente nessa corrente foi gerado mais calor na região da poça de fusão e ZTA da Armadura de Pressão, permitindo que o carbono se difundisse com mais facilidade e gerasse martensita com maior teor deste elemento e por consequência mais dura.

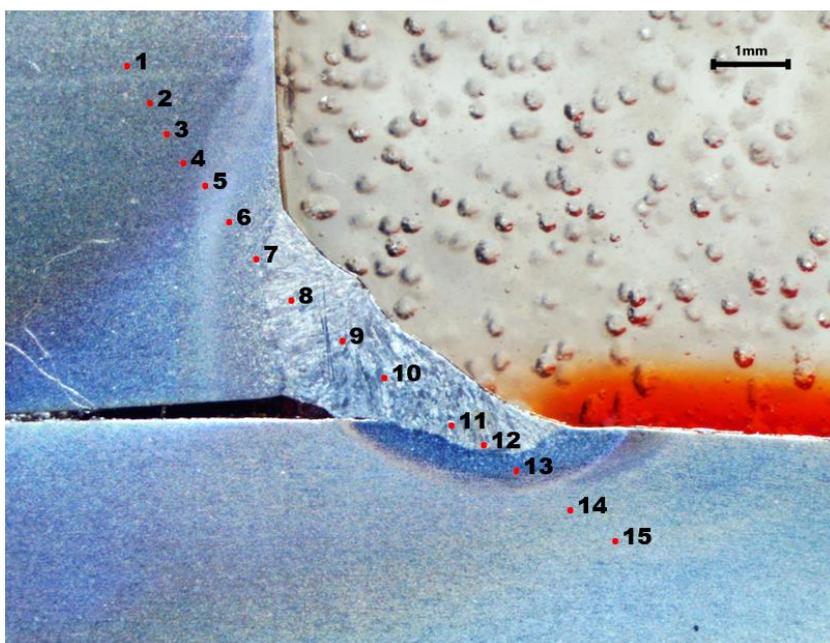


Figura 54 – Caminho das indentações. 6,7x, Nital 2%.

Fonte: O Autor 2021.

Tabela 7 – Dados de microdureza.

Ponto #	Microdureza (HV)								
	Y11	Y12	Y13	Y21	Y22	Y23	Y31	Y32	Y33
1	154	137	151	141	147	159	162	157	156
2	144	137	151	143	157	169	157	163	162
3	155	145	161	144	152	176	174	176	177
4	163	145	183	191	169	181	233	189	175
5	172	179	191	231	179	234	335	290	201
6	242	223	330	302	183	267	288	290	333
7	385	233	324	300	246	267	328	327	357
8	338	124	287	282	243	294	336	273	391
9	365	266	247	274	283	333	360	330	381
10	379	274	234	332	257	303	347	326	367
11	618	280	258	366	585	325	556	611	398
12	622	266	290	278	557	296	573	332	538
13	456	249	226	257	325	452	400	301	326
14	264	264	246	289	244	259	274	255	281
15	284	272	249	265	244	269	272	270	285

 100 – 200 (HV)
 200 – 300 (HV)

 300 – 400 (HV)
 400 – 500 (HV)

 500 – 600 (HV)

Fonte: O Autor 2021.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados e da fundamentação teórica é possível chegar às seguintes conclusões:

- A corrente de soldagem de 60 A apresentou altas temperaturas na face oposta da solda. Possivelmente pelo fato de a soldagem ter sido feita de maneira manual, nessa corrente foi necessária uma velocidade de soldagem menor (mais tempo de arco aberto) para se conseguir soldar, resultando em um maior aporte térmico.
- A soldagem feita com corrente de 70 A foi a que apresentou no geral menores temperaturas na face oposta da solda, desta maneira, é a mais recomendada para o caso em questão que a solda é realizada com uma camada polimérica abaixo.
- A corrente de soldagem 80 A apesar de ser a maior utilizada, não apresentou temperaturas muito superiores na face oposta se comparado as soldas feitas com menores correntes.
- Possivelmente se os CPs tivessem menores espessuras, se poderia utilizar menor aporte térmico para produzir soldas de mesma qualidade sem prejudicar a resistência mecânica da junta.
- Na inspeção visual, as amostras soldadas com 60 A apresentaram defeitos de porosidades. Isso reprovava as soldas no quesito qualidade para montagem de conectores.
- Foi encontrado uma trinca em uma das amostras soldadas com 60 A, fato que é indesejado devido à alta concentração de tensões nesse tipo de defeito.
- Em todas as amostras foi formado martensita na região da zona de fusão e ZTA. Essa estrutura causou altos valores de microdureza principalmente na região da ZTA da armadura pressão que continha maior teor de carbono e grão mais refinado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o efeito da espessura dos CPs na temperatura atingida na face oposta da solda, utilizando diferentes valores de corrente e velocidade de soldagem.
- Estudar a resistência à tração das juntas soldadas feitas com diferentes correntes de soldagem.
- Estudar a solda realizada na Armadura de Pressão utilizando métodos de soldagem semiautomáticos que permitam melhor controle da velocidade de soldagem.

8 REFERÊNCIAS

ABREU, F. G. **Análise de polifluoreto de vinilideno (PVDF) sob carregamento cíclico**. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Recommended Practice 17B: Recommended Practice for Flexible Pipe**. Washington, 2014b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM A29/A29M: Standard Specification for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought, General Requirements for**, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM A36/A36M: Standard Specification for Carbon Structural Steel**, 2005.

ARAÚJO, Márcia Regina Vieira de. **Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

BALARIM, Caio Vinicius Morisco. **Desenvolvimento de nanocompósitos poliamida 11 / dióxido de titânio para aplicação na indústria petrolífera**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2015.

CAMPELLO, G. C. **Metodologia de projeto para o sistema de ancoragem de conectores de dutos flexíveis e proposição de novas tecnologias**. 2014. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CARVALHAL, Rodrigo do Nascimento. **Análise da vida à fadiga de risers flexíveis com ênfase na região do conector**. 2014. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

COSER, T. B. **Avaliação de revestimento protetor de alumínio aplicado a arames da armadura de tração de dutos flexíveis**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Coutinho, Fernanda M. B. *et al.* **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. Polímeros [online]**. 2003, v. 13, n. 1 [Acessado 21 Novembro 2021], pp. 01-13. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>>. Epub 28 Mar 2003. ISSN 1678-5169. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>.

ESAB. **Mig Handbook**. Acessado em: 18 /10 /2021. Disponível em: <https://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig10_1.htm>

LORIO, Diego Andrés. **Proposta e análise de novos sistemas de ancoragem para End Fittings de Risers Flexíveis**. 2010, 80f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

KUTELU, Bolarinwa Johnson *et al.* Review of GTAW Welding Parameters. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, [s. l.], v. 06, n. 05, p. 541–554, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.65039>

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MARQUES, P. V. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia / Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz – 3ª edição atualizada.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

NEGREIROS, Luiz Antonio Sulino de. **Avaliação da resistência à fadiga e corrosão-fadiga da armadura de tração de um riser flexível retirado de operação.** 2016. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

TOMAZ, Italo do Valle *et al.* Investigations on quality characteristics in gas tungsten arc welding process using artificial neural network integrated with genetic algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 113, n. 11–12, p. 3569–3583, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06846-5>

WALLAUER, F. A. **Materiais para aplicação em arames da armadura de tração de dutos flexíveis: comportamento frente a entalhes.** 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.