

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FÁBIO DOS SANTOS SILVA

AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE E DO DESEMPENHO DA UNIÃO
ENTRE AÇOS EM ESCAPAMENTOS AUTOMOTIVOS

SANTOS/SP

2019

FÁBIO DOS SANTOS SILVA

**AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE E DO DESEMPENHO DA UNIÃO ENTRE
AÇOS EM ESCAPAMENTOS AUTOMOTIVOS**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Me. Willy Ank de Moraes.

SANTOS/SP

2019

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

671.52 Silva, Fábio dos Santos.
S58a Avaliação da Soldabilidade e do Desempenho da União entre
Ações em Escapamentos Automotivos/ Fábio dos Santos Silva.
- 2019.
90 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Willy Ank de Moraes.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP,
2019.

1. Fadiga Térmica. 2. Corrosão Intergranular. 3. Arame Tubular
AISI 439Ti. 4. Arame Sólido AISI 307SI. 5. Sistema de
Escapamento.

I. Moraes, Willy Ank. II. Avaliação da Soldabilidade e do
Desempenho da União entre Ações em Escapamentos Automotivos

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha esposa e meu filho
por todo incentivo e apoio durante esta
importante jornada de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Willy Ank por todo o apoio, ideias e conhecimento compartilhado durante a elaboração deste trabalho.

Ao amigo José Castillo pela oportunidade de trabalhar com um tema tão interessante, por toda a sua contribuição e por colaborar na realização dos experimentos.

Aos técnicos dos laboratórios Wilson Roberto Oliveira Santos, da Universidade Santa Cecília e a Margarete Cristina Moreira Serbino, do Instituto de Tecnologia Mauá.

Aos grandes amigos Márcio Moura, Diogo Peres, Rafael Frizo, Adriel Castro, Carlos Rodrigues e Carlos Sambinelli pela ajuda durante a fase experimental.

Agradeço à minha família pelo apoio e em especialmente a minha esposa que nunca me deixou desistir durante o período de estudo e sempre me motivou a buscar novas ideias e que sempre esteve de ouvidos e me deu bons conselhos.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

E por fim a Universidade Santa Cecília que me propiciou belos anos da minha vida e a maior oportunidade que tive: descobrir que sou capaz. Muito obrigado.

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico ocorrido nas últimas décadas tem colaborado notoriamente no desenvolvimento na área de ciência dos materiais. Isto ocorre dada à necessidade de desenvolvimento de novos tipos de materiais para diversos fins. No mercado automobilístico, os aços são os materiais mais utilizados e naturalmente necessitam de atenção especial. O processo de soldagem também se destaca na indústria automotiva, uma vez que, é um processo de união permanente de materiais e possui grande versatilidade e economia. Uma das principais vantagens da soldagem é o fato de se obter uma união onde os materiais mantêm suas características mecânicas e químicas. São encontrados diferentes tipos de arame de solda no mercado em geral, porém um dos mais utilizados pelo mercado automotivo é o arame sólido. Por outro lado, o arame tubular tipo “metal cored” começou a ser também utilizado por essa indústria, mas com uma proporção muito inferior, devido a falta de estudos sobre o mesmo. Cada um deles apresenta seus benefícios, seja comercial ou de produtividade. Os arames sólidos são mais comuns no processo produtivo de escapamentos automotivos. Em contrapartida os arames tubulares ainda são pouco utilizados neste segmento de mercado devido aos seus custos serem superiores ao do arame sólido. Porém, diversas empresas estão buscando redução de custos e uma das alternativas é através da produtividade e neste caso o comportamento do arame tubular é superior versus o arame sólido uma vez que o processo de fabricação robotizada seja o mesmo. Este trabalho foi idealizado com o intuito de contribuir com maiores esclarecimentos em relação a utilização de arames tubulares do tipo AISI 439Ti em soldagem de escapamentos automotivos compostos de aço carbono AISI 1018, e aço inoxidável AISI 409 e AISI 439 em vez do arame de solda sólido AISI 307Si. Para analisar os corpos de provas produzidos durante esse estudo, foram utilizados os seguintes ensaios: análise micrográfica, fadiga, fadiga térmica, líquido penetrante e sensitização conforme norma ASTM A763. Os resultados obtidos demonstraram a maior eficiência do arame tubular comparado ao arame sólido. Em todos os ensaios o arame tubular apresentou um comportamento melhor, justificando sua utilização como melhor opção para metal de adição. Com isso, a sugestão deste trabalho é a utilização do arame tubular como melhor opção de metal de adição na produção de escapamentos.

Palavras Chave: Fadiga Térmica, Corrosão Intergranular, Arame Tubular AISI 439Ti, Arame Sólido AISI 307Si, Sistema de Escapamento.

ABSTRACT

The technological development occurred in the last decades has been collaborating notoriously in the development of materials science area. This is due to the need to develop new types of materials for several purposes. In the automotive market, steels are the most used materials and naturally require special attention. The welding process also stands out in the automotive industry, since it is a permanent union process of materials and has great versatility and economy. One of the main advantages of welding is the fact of obtaining a union where the materials maintain their mechanical and chemical characteristics. Different types of welding wire are found in the market in general, but one of the most used by the automotive market is solid wire. On the other hand, tubular wire, known as "metal core" began to be also used by this industry, but with a much lower proportion due to lack of studies on it. Each of them presents its benefits, such as commercial or productivity. Solid wires are more common in the automotive exhausts production. On the other hand, tubular wires are still not widely used in this market segment, due to the fact that their costs are higher than solid wire. However, several companies are looking for cost reduction through superior tubular wire productivity versus solid wire once the robotic manufacturing process is the same. This study was conceived with the purpose of contributing with further clarification regarding the use of tubular wires AISI 439Ti, in automotive exhausts welding, composed of AISI 1018 carbon steel and stainless steel AISI 409 and AISI 439 instead of solid welding wire AISI 307Si. To analyze the test specimens produced during this study, the following tests were used: micrographical analysis, fatigue, thermal fatigue, penetrating liquid and sensitization according to ASTM A763. The obtained results demonstrated the greater efficiency of the tubular wire compared to the solid wire. In all the tests, the tubular wire presented a better behavior, justifying its use as the best option as addition metal. With this, the recommendation of this study is the usage of tubular wire as the best addition metal option in the exhaust production.

Keywords: Thermal Fatigue, Intergranular Corrosion, Tubular wire AISI 439Ti, Solid wire AISI 307Si, exhaust System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de exaustão.....	19
Figura 2 – Penetração de solda em junta sobreposta (MORGANTI, 2013).....	25
Figura 3 – Ilustração de soldagem filete de duas chapas (OBERG, 2017).....	25
Figura 4 - Geometria de soldagem empregada neste trabalho e regiões mensuradas metalograficamente para determinação da diluição (δ).	26
Figura 5 – Perna da solda em junta sobreposta (MORGANTI, 2013).....	26
Figura 6 – Garganta da solda em junta sobreposta (MORGANTI, 2013).	27
Figura 7 – a) Cordão Côncavo com respectiva perna e garganta b) Cordão convexo (MORGANTI, 2013).....	27
Figura 8 - Ilustração esquemática do processo MIG/MAG. (SILVA, 2014).....	28
Figura 9 – Aços Inoxidáveis da Série 300. (CARBÓ, 2008).....	30
Figura 10 – Aços Inoxidáveis da Série 400. (CARBÓ, 2008).....	31
Figura 11 - Norma ASTM A763 (a) Estrutura aceitável de aço inoxidável ferrítico após ensaio.....	36
Figura 12 - Fonte de energia modelo Transpuls Synergic 5.000MV da empresa FRONIUS	39
Figura 13 - Arame tubular AISI 439Ti de fabricação da empresa ESAB.	40
Figura 14 - Desenho esquemático (dimensões em mm) do Conjunto de testes empregado neste estudo.....	41
Figura 15 - Detalhe da junta soldada com as dimensões mínimas do depósito de solda. A área verde representa o tubo e área cinza a flange.	41
Figura 16 - Corpo de Prova.....	42
Figura 17 – a) Corpo de prova soldado internamente com arame sólido. b). Corpo de prova soldado internamente com arame tubular.	43
Figura 18 - Soldagem Interna e direção da soldagem	44
Figura 19 – Soldagem Externa e direção da soldagem	45
Figura 20 - Configuração do ensaio de fadiga.	45
Figura 21 - Gráfico representativo da variação de temperatura ao longo do tempo.	46
Figura 22 - Pontos de medições do ensaio de Fadiga Térmica.....	47
Figura 23 - Equipamento utilizado para realizar ensaio de vazamento.	47
Figura 24 – Imagens utilizadas no Aplicativo ImageJ	49
Figura 25 - Tamanho de grão 1.....	50

Figura 26 - Tamanho de grão2.	52
Figura 27 - Tamanho de grão3.....	53
Figura 28 - Tamanho de grão 4.....	54
Figura 29 - Tamanho de grão 5.....	55
Figura 30 - Tamanho de grão 5.....	56
Figura 31 - Tamanho de grão 6.....	57
Figura 32 - Tamanho de grão 7.....	58
Figura 33 - Tamanho de grão 8.....	59
Figura 34 - Tamanho de grão 9.....	60
Figura 35 - Tamanho de grão 10.....	61
Figura 36 - Tamanho de grão 12.....	62
Figura 37 - Tamanho de grão 13.....	63
Figura 38 - Tamanho de grão 14.....	64
Figura 39 - Tamanho de grão 15.....	65
Figura 40 - Tamanho de grão 16.....	66
Figura 41 - Exemplo da área solda entre o tubo e o flange de um dos conjuntos de testes estudados, bem como seus respectivos resultados de penetração de solda	68
Figura 42 - Gráficos de probabilidade com os dados obtidos dos ensaios de fadiga (número de ciclos antes da falha). À esquerda: resultados obtidos sem submissão dos conjuntos testados à fadiga térmica. À direita: resultados obtidos após fadiga térmica.	71
Figura 43 - Ensaio de Líquido Penetrante.....	72
Figura 44 - Amostra Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular.	73
Figura 45 - Amostra Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular.	73
Figura 46 - Amostra Solda Interna, Tubo 439 e Arame Tubular.	74
Figura 47 - Amostra Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido.	74
Figura 48 - Amostra Solda Externa, Tubo 409 e Arame Sólido.	75
Figura 49 - Amostra Solda Externa, Tubo 439 e Arame Sólido.	75
Figura 50 - Amostra Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido.	76
Figura 51 - Amostra Solda Externa, Tubo 439 e Arame Tubular.	76
Figura 52 – Amostra de Tubo inoxidável 409 com a utilização de arame tubular.....	77
Figura 53 – Amostra de Tubo inoxidável 439 com a utilização de arame tubular.....	77
Figura 54 – Amostra de Tubo inoxidável 409 com a utilização de arame sólido.	78
Figura 55 – Amostra de Tubo inoxidável 439 com a utilização de arame sólido.	78

Figura 56 – Junta soldada com arame tubular AISI 439Ti.	80
Figura 57 – Avaliação integrada dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga, considerando cada uma das variáveis associada com um fator de peso (1, 2 ou 4).82	
Figura 58 – Corrosão intergranular.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (%) – fonte: EWM e ESAB datasheet.....	40
Tabela 2 - Composição química (%).	40
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem empregados neste estudo.	43
Tabela 4 - Diluição Amostra 1A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular.....	51
Tabela 5 - Diluição Amostra 2A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular.....	52
Tabela 6 - Diluição Amostra 1B - Solda Externa Tubo 439 Arame Tubular.....	53
Tabela 7 - Diluição Amostra 2B - Solda Externa, Tubo 439 e Arame Tubular.....	54
Tabela 8 - Diluição Amostra 1F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido	55
Tabela 9 – Diluição Amostra 2F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido	56
Tabela 10 - Diluição Amostra 1G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido.....	57
Tabela 11 - Diluição Amostra 2G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido.....	58
Tabela 12 - Diluição Amostra 1C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular.....	59
Tabela 13 - Diluição Amostra 2C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular.....	61
Tabela 14 - Diluição Amostra 1D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido	62
Tabela 15 - Diluição Amostra 2D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido	63
Tabela 16 - Diluição Amostra 1E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular	64
Tabela 17 - Diluição Amostra 2E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular	65
Tabela 18 - Diluição Amostra 1H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido	66
Tabela 19 - Diluição Amostra 2H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido	67
Tabela 20 - Resultados obtidos da avaliação na penetração da solda empregando consumível de arame tubular e comparação com os limites de montadora parceira deste trabalho.....	67
Tabela 21 - Número máximo de ciclos em fadiga obtidos para os conjuntos testados (vide Fig. 13) constituídos de tubos de aço inoxidável 409 e 439 com flange de aço carbono AISI 1018.....	69
Tabela 23 – Número máximo de ciclos em fadiga obtidos para os conjuntos testados (vide Fig. 13) constituídos de tubos de aço inoxidável 409 e 439 com flange de aço carbono AISI 1018.....	69
Tabela 24 - Número máximo de ciclos em fadiga obtidos, após a execução de 200 ciclos de carregamentos térmicos (vide Gráfico 1), para os conjuntos testados (vide Fig. 13) constituídos de tubos de aço inoxidável 409 e 439 com flange de aço carbono AISI 1018.....	70

Tabela 26 – Ensaio Fadiga 7. 71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Combinações de Consumíveis vs Metal Base	44
Quadro 02: Penetração de Solda.....	51
Quadro 3 - Penetração de Solda.....	52
Quadro 4 – Penetração de Solda.....	53
Quadro 5 - Penetração de Solda.....	54
Quadro 6 - Penetração de Solda.....	55
Quadro 7 – Penetração de Solda.....	56
Quadro 8 – Penetração de Solda.....	57
Quadro 9 - Penetração de Solda.....	58
Quadro 10 - Penetração de Solda.....	59
Quadro 11 - Penetração de Solda.....	60
Quadro 12 - Penetração de Solda.....	62
Quadro 13 - Penetração de Solda.....	63
Quadro 14 - Penetração de Solda.....	64
Quadro 15 - Penetração de Solda.....	65
Quadro 16 - Penetração de Solda.....	66
Quadro 17 - Penetração de Solda.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	–	American Iron and Steel Institute
Al	–	Alumínio
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
C	–	Carbono
Cr	–	Cromo
Cu	–	Cobre
Fe-Cr	–	Ferro-Cromo
GMAW	–	Gas Metal Arc Welding
MAG	–	Metal Active Gas
MIG	–	Metal Inert Gas
mm	–	Milímetro
Mn	–	Manganês
Mo	–	Molibdênio
Nb	–	Nióbio
Ni	–	Níquel
PH	–	Precipitation-hardening
S	–	Enxofre
SAE	–	Society of Automotive Engineers
Si	–	Silício
Ta	–	Tântalo
Ti	–	Titânio
%	–	Porcentagem

LISTA DE SÍMBOLOS

$\leq$	–	Menor igual
$\geq$	–	Maior igual
$^{\circ}\text{C}$	–	Graus Celsius
A	–	Corrente
g	–	Garganta da solda (mm)
Hz	–	Hertz
L	–	Litros
N	–	Newton
P1	–	Perna da Solda1 (mm)
P2	–	Perna da Solda2 (mm)
V	–	Voltagem
μm	–	Micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo	21
1.2	Objetivos Secundários	21
1.3	Justificativa e Relevância do Tema	21
1.4	Organização da Dissertação.....	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM	23
2.2	Dimensões de análise de solda	24
2.3	Penetração.....	24
2.4	Perna (p1, p2) e Garganta (g).....	26
2.5	Soldagem MIG/MAG	27
2.6	Aços Carbono	29
2.7	Aços Inoxidáveis	29
2.8	Arame Sólido	32
2.9	Arame Tubular	32
2.10	Fadiga	33
2.11	Fadiga Térmica	34
2.12	Corrosão	34
2.13	Corrosão Intergranular.....	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Materiais	38
3.1.1	Tubo de Aço Inoxidável.	38
3.1.2	Flange Aço Carbono.	38
3.1.3	Fonte de Potência para soldagem	38
3.1.4	Gás	39
3.1.5	Metal de Adição	39
3.1.6	Metal de Base.	40
3.2	Métodos	41
3.2.1	Parâmetros de Soldagem	43
3.2.2	Processo de Soldagem Interno.....	43
3.2.3	Combinações de Consumíveis vs Metal Base.....	44
3.2.4	Processo de Soldagem Externo	44

3.2.5 Ensaio de Fadiga	45
3.2.6 Ensaio de Fadiga Térmica	46
3.2.7 Ensaio de Estanqueidade	47
3.2.8 Ensaio Micrográfico	48
3.2.9 Ensaio de Sensitização.....	48
3.2.10 Cálculo de Diluição de Solda	48
4 RESULTADOS.....	50
4.1 Ensaio de Microestrutura	50
4.1.1 Amostra 1A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular	50
4.1.2 Amostra 2A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular	52
4.1.3 Amostra 1B - Solda Externa Tubo 439 Arame Tubular.	53
4.1.4 Amostra 2B - Solda Externa, Tubo 439 e Arame Tubular.	54
4.1.5 Amostra 1F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido.....	55
4.1.6 Amostra 2F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido.....	56
4.1.7 Amostra 1G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido.	57
4.1.8 Amostra 2G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido.	58
4.1.9 Amostra 1C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular.	59
4.1.10 Amostra 2C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular.....	60
4.1.11 Amostra 1D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido.....	61
4.1.12 Amostra 2D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido.....	62
4.1.13 Amostra 1E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular.....	63
4.1.14 Amostra 2E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular.....	64
4.1.15 Amostra 1H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido.....	65
4.1.16 Amostra 2H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido.....	66
4.2 Ensaio de Fadiga	68
4.2.1 Solda Externa	68
4.2.2 Solda Interna.....	69
4.3 Ensaio de Fadiga após realizar o ensaio de fadiga térmica	70
4.3.1 Solda Externa	70
4.3.2 Solda Interna.....	71
4.4 Ensaio de Líquido Penetrante.....	72
4.5 Ensaio de Sensitização.....	72
4.6 Ensaio de Microdureza	76
5 DISCUSSÃO	79

Fadiga térmica.....	83
Microdureza.....	83
Corrosão.....	84
6 CONCLUSÕES.....	86
6.1 Trabalhos futuros	87
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o aço é um dos principais materiais da indústria automotiva. O aço também estabeleceu um custo razoável, maior vida útil e variabilidade nos níveis de resistência, atendendo às necessidades de engenharia cada vez mais rigorosas. Algumas das outras vantagens do aço a serem usadas no setor automotivo são: facilidade de formação, consistência de fornecimento, resistência à corrosão com revestimentos de zinco, facilidade de união, reciclagem e boa absorção de energia em colisões. Houve desenvolvimentos significativos na produção de ampla gama de aço usando vários aditivos e implementando intervenções tecnológicas durante a produção de aço (SINGH, 2016).

O sistema de exaustão de automóveis é parte integrante da cadeia geral de funções em um sistema automotivo. A seleção de materiais durante o processo de fabricação do sistema de exaustão de automóveis tem sido muito importante. Os sistemas de exaustão operam a temperaturas relativamente altas em torno de 400° a 700° e tais condições de operação geralmente exigem o uso de materiais com alta resistência às altas temperaturas, a fim de evitar que a corrosão térmica limite a vida útil do material de escape. Em princípio, os tubos do sistema de exaustão são responsáveis por unirem o coletor de exaustão, o ressonador, o silenciador e os conversores catalíticos. Esse conjunto tem como objetivo um fluxo de exaustão efetivo, mínimo ruído e níveis de emissão (ANIEKAN, 2017), conforme ilustra a Figura 1.

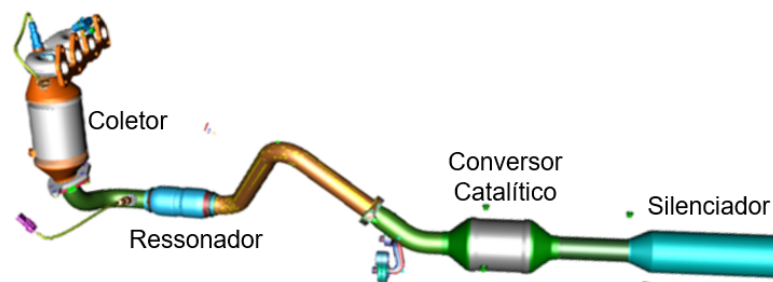


Figura 1 – Sistema de exaustão

O sistema de exaustão durante a operação também é exposto a várias condições químicas, tais como condensado de escape alcalino e ácido no sistema de exaustão. Com base nesses fatores, os materiais selecionados para a fabricação do

sistema de exaustão devem possuir não apenas resistência suficiente e resistência à fadiga, mas também excelente resistência à corrosão contra variedades de condições operacionais.

A seguir, alguns mecanismos de falha que podem facilmente dificultar a vida útil do material do sistema de escapamento durante sua condição em serviço:

- a) Corrosão de alta temperatura (corrosão quente seco);
- b) Condensado e corrosão salina (corrosão úmida);
- c) Falha mecânica por temperatura elevada;
- d) Corrosão sob tensão e
- e) Corrosão intergranular; (ANIEKAN, 2017).

Uma classe muito importante conhecido pela alta resistência à corrosão uniforme é o aço inoxidável. Os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro carbono, com composição mínima de 10,5% de Cromo (Cr) e Níckel (Ni) (em massa), porém outros vários elementos de liga tais como: nióbio (Nb), molibdênio (Mo), cobre (Cu), alumínio (Al), titânio (Ti) entre outros, podem fazer parte da composição química dos aços inoxidáveis com o objetivo de melhorar as propriedades do material (SILVA, 2017).

Devido à boa resistência à corrosão, alta resistência ao calor e 100% reciclável, os aços inoxidáveis são amplamente utilizados como materiais componentes de veículos automotivos. A fim de evitar o alto preço do níquel, os aços inoxidáveis da série 400 de baixo níquel ou sem níquel substituíram outros aços inoxidáveis com alto teor de níquel. Particularmente os aços inoxidáveis ferríticos apresentam bons desempenhos em fluência, corrosão, oxidação, conformabilidade e soldabilidade comparados com outros aços inoxidáveis, portanto também são utilizados nos tubos de escape dos veículos automotivos (CHIU, 2013).

A soldagem é um método importante de fabricação de materiais complexos e a estabilidade de soldas em aço inoxidável está intimamente relacionada à composição do aço, às condições térmicas associadas à soldagem e a qualquer tensão que possa estar presente no serviço (LAKSHMINARAYANAN, 2012).

O arame tubular permite a realização da soldagem em todas as posições, possibilidade de soldar diversos tipos de aços, como: aços inoxidáveis, soldar aços carbono e dissimilares (cuja composição química do metal de base das peças difere entre si significativamente), além de propiciar propriedades mecânicas favoráveis a

soldagem, resistência à corrosão e ao desgaste no cordão de solda. O resultado final da soldagem com esse consumível apresenta boas características mecânicas, que muitas vezes dispensa o processo de tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem, minimizando ainda mais o custo final do produto, pois desta forma, dispensa a utilização de fornos e de meios logísticos para deslocamento do produto até o forno (CUNHA, 2016).

O presente estudo tem como objetivo avaliar a soldabilidade e desempenho da união entre aços inoxidáveis e aços carbono em escapamentos automotivos de veículos leves, utilizando como metal de adição: arame sólido e tubular. O estudo foi realizado tendo como parâmetros ensaios de fadiga, fadiga térmica, teste de estanqueidade, líquido penetrante e corrosão intergranular (sensitização).

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo identificar opções que possa colaborar com a melhoria do desempenho estrutural de juntas soldadas empregadas em escapamentos automotivos. Por consequência ampliar o conhecimento sobre a avaliação da soldabilidade e desempenho em aços utilizados em escapamento automotivos, por meio de testes comparativos entre arame de solda sólido e tubular, e aços inoxidáveis e aços carbonos.

1.2 Objetivos Secundários

Identificar qual é o melhor tipo de arame de solda (tubular ou sólido) de acordo com os ensaios de fadiga, fadiga térmica, líquido penetrante, análise micro estrutural e os benefícios obtidos no processo produtivo do escapamento automobilístico para veículos de passeio de pequeno e médio porte.

1.3 Justificativa e Relevância do Tema

Identificar produtos de melhor qualidade e melhoria de produtividade. O desenvolvimento e aplicação de novos materiais proporcionou oportunidades de redução de custo e melhoria de qualidade. Portanto, identificar e avaliar os benefícios

da utilização da melhor condição de consumível de solda para a união dos metais dissimilares, tal como o aço carbono e o aço inoxidável AISI 409/AISI 439, torna-se fundamental para o mercado automotivo.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

Na apresentação é introduzido um breve histórico e destacada a importância da qualidade. Na Introdução são apresentados os objetivos do trabalho, a justificativa e relevância do tema. Na Fundamentação Teórica é feita a fundamentação teórica, na sequência a metodologia utilizada neste estudo é exposta em Materiais e Métodos.

Em Resultados e Discussões são apresentados todos os resultados obtidos e discussões iniciando-se pelos procedimentos para avaliar a soldabilidade e o desempenho da união entre aços dissimilares para escapamentos automotivos. São discutidos os resultados finais para a tomada de decisão. Finalmente são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para novas pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica compreende uma sucinta revisão bibliográfica de soldagem, aços inoxidáveis, fadiga, fadiga térmica, fenômeno de corrosão dos aços inoxidáveis e das técnicas utilizadas no presente trabalho.

2.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM

A soldagem é considerada como um método de união de materiais, para obter a coalescência localizada de metais e não metais, assegurando a continuidade das propriedades físicas, químicas e mecânicas. O termo Soldagem pode ser utilizado em diferentes processos aplicados na fabricação de peças e/ou recuperação de peças desgastadas, estruturas e equipamentos. Outra aplicação da soldagem é a utilização da mesma para a formação de um revestimento com características especiais. (MARQUES, 2017).

Os benefícios de utilizar a soldagem como método de ligação são diversos, tais como: ótima relação custo-benefício; pode ser utilizado em uma grande variedade de espessuras de materiais que podem ser unidos; versatilidade, dado o fato que pode ser aplicado em diversos materiais, formas e dimensões. As juntas produzidas por soldagem são reproduzíveis, podem ser avaliadas por técnicas, tais como, não destrutivas e normalmente apresentam resistência superior à dos materiais de base. (SILVA, 2014).

Comparada com a fundição, uma das grandes vantagens da soldagem é a possibilidade de utilizar diferentes processos para unir materiais, sejam eles com espessura inferior a 1 mm (componentes eletrônicos, jóias, entre outros), bem como, estruturas de grandes dimensões (aviões, navios, etc). (MARQUES, 2017).

Os termos solda e soldagem são comumente utilizados na indústria, mas não podem ser confundidos entre si. Soldagem é a “ação de unir peças, ao passo que solda é o “resultado ou ao produto da operação”. (FERREIRA, 2013).

A soldagem de diferentes materiais é mais complexa do que a soldagem entre materiais similares devido às diferentes propriedades físicas, químicas e mecânicas apresentadas pelos metais envolvidos (KHORRAMI, 2014). Essas diferenças também dificultam a definição do material de adição que seja compatível com os diferentes

materiais base a serem soldados e que possa gerar uma junta que melhor atenda ao objetivo básico da soldagem que é obter a continuidade das características na união.

Uma das formas mais representativas de avaliar uma junta dissimilar é pela execução de ensaios de fadiga (CESAR NETO, 2015). A fadiga é um processo de degradação localizada, progressiva e permanente, que ocorre devido a variações de tensões e deformações.

Uma das principais características da fratura por fadiga é a iniciação de danos e nucleação de trincas nas regiões onde existem heterogeneidades estruturais ou mecânicas, tais como inclusões, imperfeições microestruturais ou entalhes mecânicos (RABBI, 2009). Devido a esta sensibilidade da fadiga com a heterogeneidade dos materiais, um ensaio de fadiga pode ser empregado como uma forma eficaz de comparar o desempenho e a qualidade da união por soldagem de materiais dissimilares.

Atualmente, existem inúmeros processos de soldagem detalhados na literatura, tais como: Soldagem a arco elétrico, soldagem por resistência, solda branda, soldagem no estado sólido, soldagem oxicomustível, brasagem, soldagem por alta densidade de energia, outros processos (eletroescória, por indução, aluminotermia). (FERREIRA, 2013).

2.2 Dimensões de análise de solda

O objetivo principal de uma solda é unir peças atendendo requisitos mínimos de resistência, às quais a região do cordão de solda sendo submetidas a tais esforços (cisalhamento, tração, entre outros) deverá manter uma área mínima para que não haja ruptura. Sendo assim, há diversas Normas associando as dimensões do cordão (perna, garganta e penetração) com suas respectivas resistências a esforços mínimos suportados (MORGANTI, 2013).

Um aspecto de qualidade escolhido para monitorar a qualidade da solda é a profundidade de penetração da solda nas soldas de filete produzidas pela soldagem por arco de metal a gás (OBERG, 2017).

2.3 Penetração

Penetração é a quantidade de material penetrada no material base (material

que constitui as partes a unir). Refere-se à cota entre a superfície do metal base até a linha de fusão. Em outras palavras, é a profundidade alcançada pela fusão, medida perpendicularmente à superfície do material base, na seção reta da solda. A figura 2 apresenta um exemplo de penetração de solda em junta sobreposta (MORGANTI, 2013).

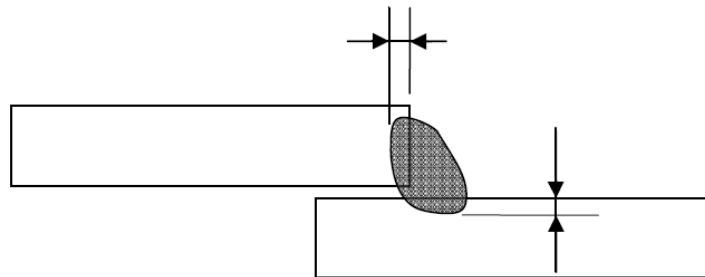


Figura 2 – Penetração de solda em junta sobreposta (MORGANTI, 2013).

A penetração da solda é altamente conectada à vida de fadiga e, conseqüentemente, é importante que durante a produção das peças consigam assegurar uma profundidade suficiente de penetração da solda. Com uma profundidade de penetração conhecida, a espessura da garganta de solda (figura 03) pode, em alguns casos, ser reduzida, aumentando assim a produtividade e reduzindo o custo. Por outro lado, a penetração incompleta reduz a seção transversal da carga e corresponde geometricamente a uma rachadura (OBERG, 2017).

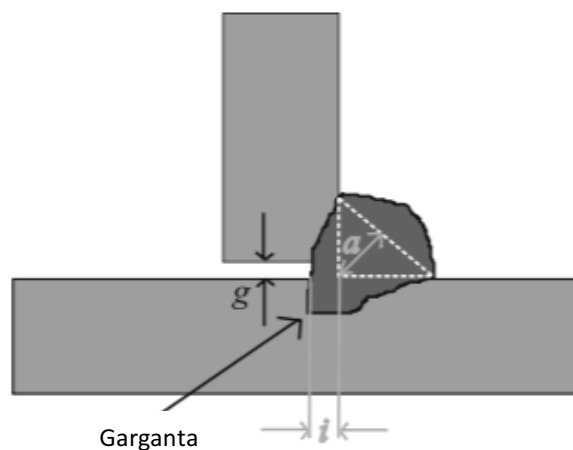


Figura 3 – Ilustração de soldagem filete de duas chapas (OBERG, 2017).

As áreas quantificadas através do software IMAGE J permitiram obter a diluição (δ) em cada uma das juntas soldadas, através da equação 2.1 (MORAIS, 2015):

$$\delta = \frac{B}{A+B} (\times 100\%) \quad (2.1)$$

Onde: A é a área da seção reta metalográfica associada ao metal de solda depositado e B é a área da seção reta metalográfica do metal de base que foi fundida pelo metal adicionado e a ele misturado (diluído), conforme ilustrado pela Figura 4 (SOUZA, 2016).

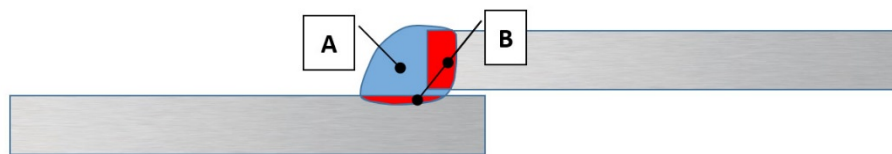


Figura 4 - Geometria de soldagem empregada neste trabalho e regiões mensuradas metalograficamente para determinação da diluição (δ).

2.4 Perna (p1, p2) e Garganta (g)

Perna é a projeção de segmento de reta que representa a largura da solda sobre uma das superfícies do metal base, conforme figura 04 (MORGANTI, 2013).

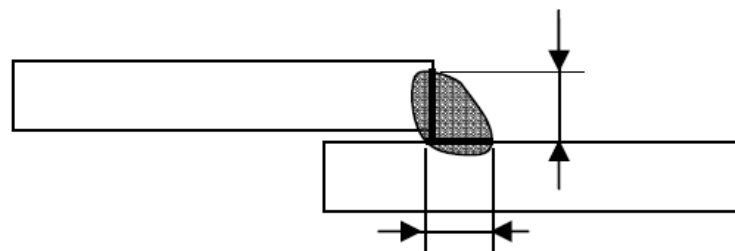


Figura 5 – Perna da solda em junta sobreposta (MORGANTI, 2013).

A garganta por sua vez é a altura do triângulo formado pelo pé da solda e o ponto de encontro entre as duas superfícies do metal de base (figura 05), também conhecido como origem de junta (MORGANTI, 2013).

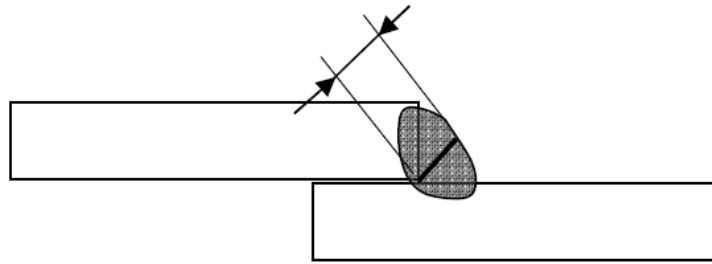


Figura 6 – Garganta da solda em junta sobreposta (MORGANTI, 2013).

A figura 06 a) e b) apresentam a perna (p_1 e p_2), bem como a garganta (g):

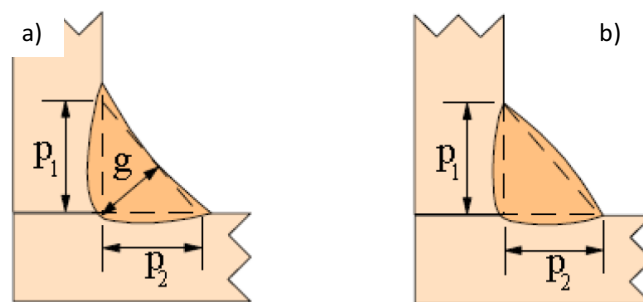


Figura 7 – a) Cordão Côncavo com respectiva perna e garganta b) Cordão convexo (MORGANTI, 2013).

2.5 Soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem GMAW “*Gas Metal Arc Welding*” tem como característica principal a utilização de um arco de soldagem que produz a união das peças a serem soldadas pelo aquecimento com um arco elétrico entre o metal adicional chamado de consumível e a peça. Mais conhecida, genericamente, como soldagem MIG/MAG, onde MIG significa “*Metal Inert Gas*” e MAG representa “*Metal Active Gas*”, a proteção do arco da região da solda contra contaminação pela atmosfera é realizada por uma mistura de gases ou por um gás, os quais podem ser ativos ou inertes. (MARQUES, 2017)

MIG é o processo utilizado quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes. Por outro lado, MAG é quando o gás utilizado é ativo ou possui misturas ricas em gases ativos. (MARQUES, 2017). A figura 7 ilustra esquematicamente o processo MIG/MAG.

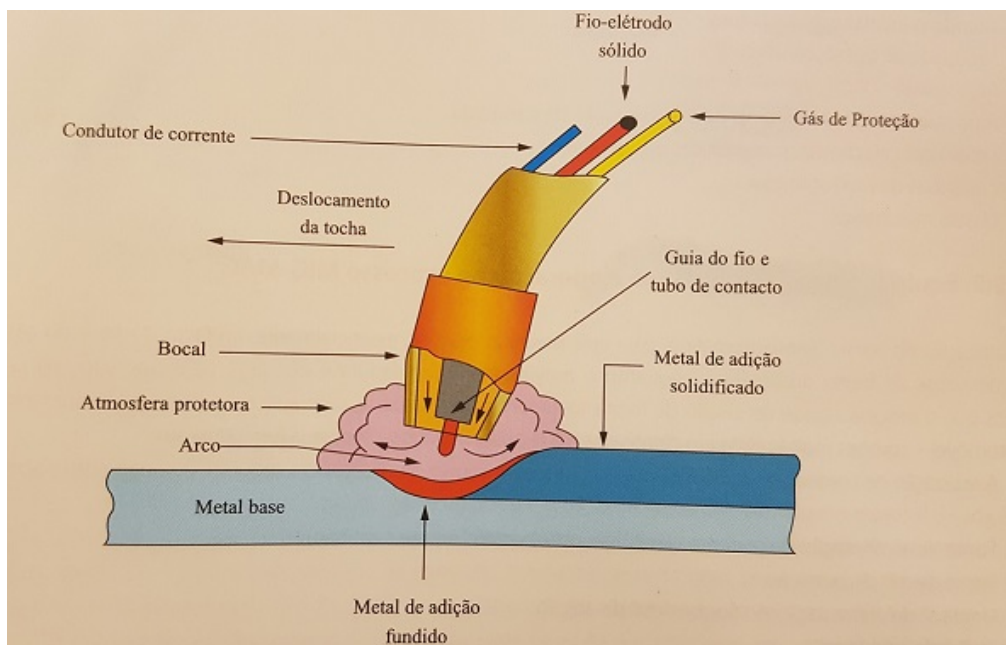


Figura 8 - Ilustração esquemática do processo MIG/MAG. (SILVA, 2014)

De acordo com Silva (2014), os benefícios da utilização do processo MIG/MAG são:

- Grande velocidade no processo de soldagem;
- Facilidade de operação/utilização;
- Arco visível;
- Ausência de escória a eliminar após a realização da soldagem;
- Excelentes características mecânicas dos depósitos;
- Custos mais baixos;

Segundo Marques (2017) as principais vantagens da soldagem MIG/MAG quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos são:

- Alta taxa de deposição;
- Grande versatilidade ao tipo de material e espessuras aplicáveis;
- Ausência de operações de remoção de escória e limpeza e exigência de menor habilidade do soldador.

O processo de soldagem a arco de metal a gás (GMAW) é utilizado principalmente para fabricar o sistema de exaustão de veículos (KIM, 2009).

2.6 Aços Carbono

O aço carbono é resultante da combinação de ferro e carbono. A porcentagem de cada elemento na composição final do material definirá as suas respectivas propriedades. O minério de ferro contido na composição do aço carbono, em sua maioria é constituído, através dos altofornos. A utilização desses fornos permite a redução do óxido de ferro para ferro metálico e remove as impurezas do metal. Os elementos reduzidos incorporam a massa de ferro e os elementos oxidados dissolvem-se na escória. O metal oriundo do alto forno denomina-se ferro gusa, este é submetido a reduções subsequentes nos elementos para a produção do aço. A sequência continua com o refino do aço e purificação nas lingoteiras em ferro fundido (CUNHA, 2016).

O aço carbono é amplamente utilizado devido à sua soldabilidade adequada e tipos de aplicações diferentes. Este material é praticamente soldado por todos os processos convencionais, dependendo de sua espessura, da qualidade esperada da junta e do custo da soldagem. Além da redução de peso e custo, tem sido relatado que uma junta dissimilar entre o aço carbono e o aço inoxidável ferrítico poder ser usada no sistema de exaustão automotivo (KHORRAMI, 2014).

2.7 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são definidos como ligas à base de ferro que contêm pelo menos 10,5% de Cr. O fino, mas denso filme de óxido de cromo que se forma na superfície de um aço inoxidável fornece resistência à corrosão e é uma barreira à oxidação. (KOTECKI, 2003).

Outros elementos metálicos também integram as ligas de aços inoxidáveis, mas o Cr é considerado o mais importante elemento. Ele é responsável pela elevada resistência à corrosão. (CARBÓ, 2008)

Os aços Ferríticos são menos resistentes à corrosão, no entanto, não são geralmente usados em condições tão exigentes, mas a necessidade de maiores economias aumentou o uso dos graus ferríticos mais baratos. (LAKSHMINARAYANAN, 2012)

Os aços inoxidáveis são classificados conforme a composição química e estrutura metalúrgica da liga em temperatura ambiente. Uma das mais importantes

especificações utilizadas para classificar os inoxidáveis é a AISI (*"American Iron and Steel Institute"*), a qual classificou as ligas em séries padronizadas 200, 300, 400 e 600. No Brasil as especificações são classificadas conforme a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). (SILVA, 2017)

Conforme Kotecki (2003), existem cinco tipos de aços inoxidáveis dependendo das outras adições de ligas presentes, e elas variam de totalmente austenítico a totalmente ferrítico.

Aços inoxidáveis austeníticos incluem as séries 200 e 300, das quais o tipo 304 é o mais comum. As principais adições de ligas são cromo e níquel. A figura 8 apresenta os aços inoxidáveis da série 300 (CARBÓ, 2008).

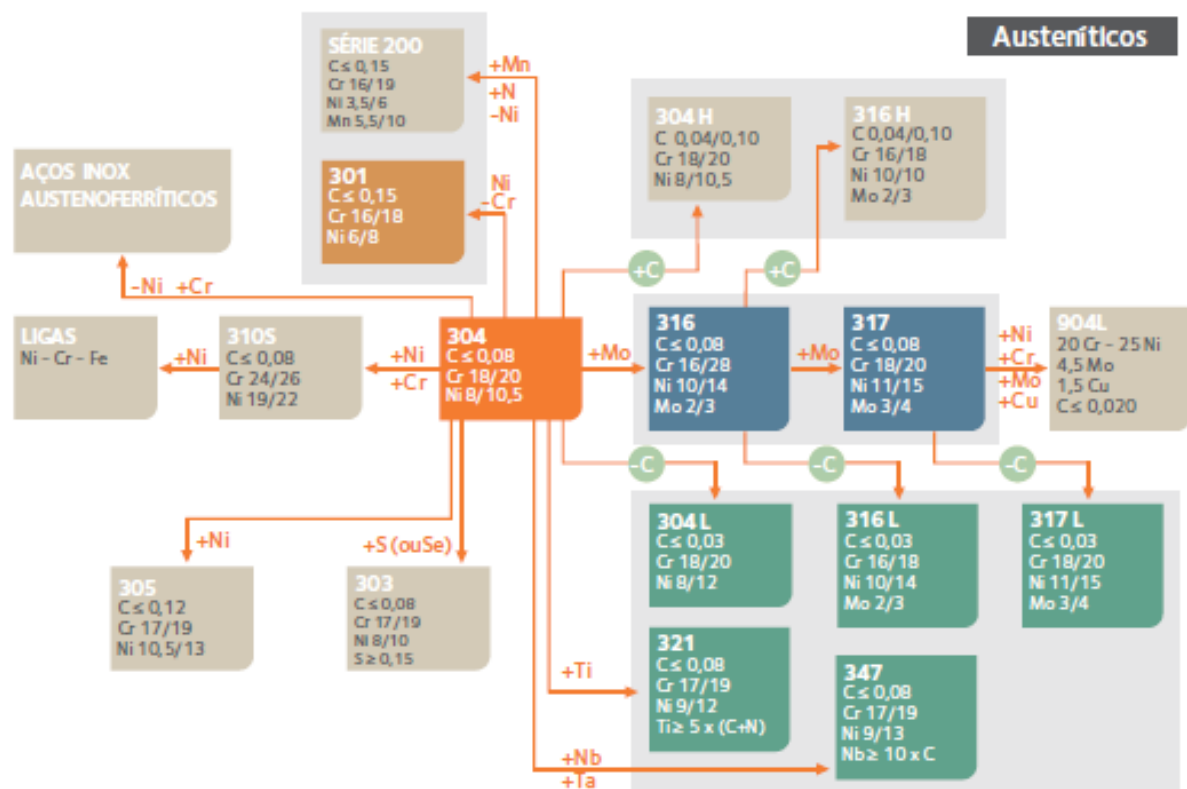


Figura 9 – Aços Inoxidáveis da Série 300. (CARBÓ, 2008)

Os aços inoxidáveis ferríticos não são Ligas de Fe-Cr endurecidos. Os tipos 405, 409, 430, 422 e 446 são representativos de esse grupo. São empregados na fabricação de eletrodomésticos, utensílios para cozinha e laboratórios, em aplicações a altas temperaturas, tais como sistema de exaustão e descarga de fumos provenientes da combustão de derivados do petróleo, indústria nuclear, etc

(KOTECKI, 2003).

Os aços inoxidáveis martensíticos são similares em composição ao grupo ferrítico, mas possui maior concentração de carbono e menor concentração de cromo para permitir endurecimento por tratamento térmico. Os tipos 403, 410, 416 e 420 são representante deste grupo (KOTECKI, 2003). A combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e de dureza justifica a utilização desses aços na fabricação de válvulas, rolamentos de esferas e facas de alta qualidade (ASKELAND, 2014). Na figura 9 pode-se observar os aços inoxidáveis da série 400.

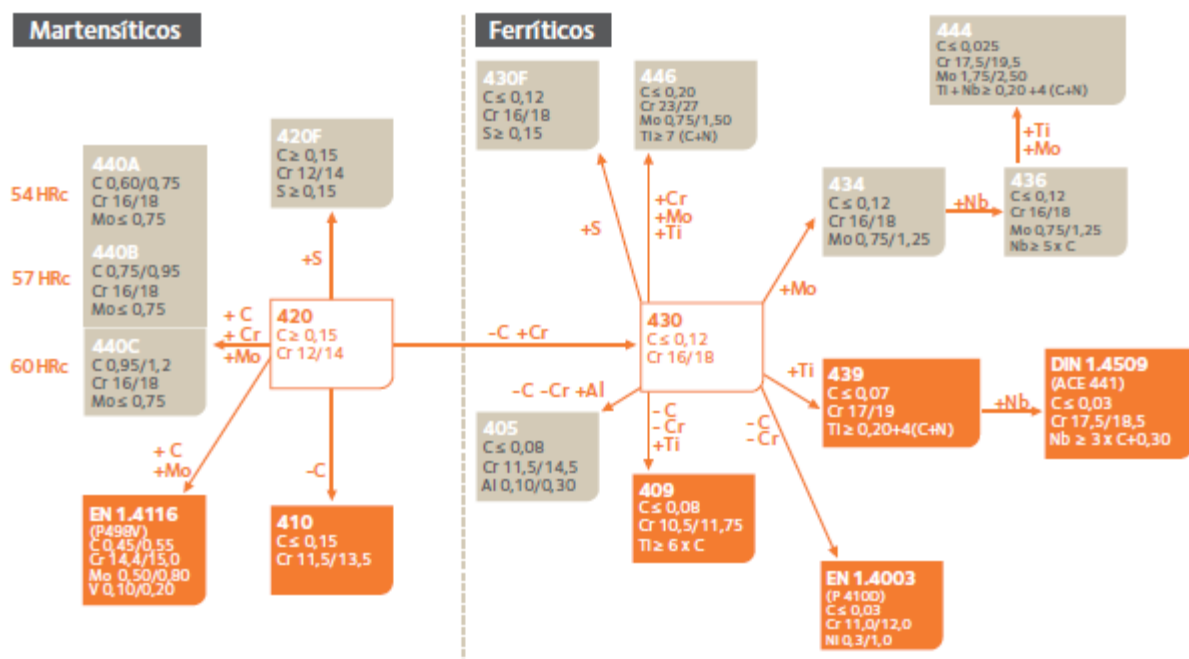


Figura 10 – Aços Inoxidáveis da Série 400. (CARBÓ, 2008)

Os aços inoxidáveis duplex têm uma estrutura combinada das fases austenita e ferrita, por consequência possui propriedades comuns aos dois tipos de aço (SILVA, 2017). Eles contêm aproximadamente 24% de cromo e 5% de níquel. Seu sistema de numeração não está incluído nos grupos 200, 300 ou 400 (KOTECKI, 2003). Os aços inoxidáveis duplex apresentam maior resistência à corrosão sob tensão, mas não são imunes a ela. O molibdênio aumenta a resistência à corrosão por pite da liga. Dado o teor de carbono ser inferior a 0,03% (massa) não sofrem corrosão intergranular (SILVA, 2017).

Os aços inoxidáveis de endurecimento por precipitação contêm adições de ligas como o alumínio, que permitem que sejam endurecidos por uma solução e

tratamento térmico de envelhecimento (KOTECKI, 2003). Estes aços também são identificados pela sigla PH (*precipitation-hardening*), em sua formação possuem Al, Nb ou Ta como elementos de liga e endurecem por solução sólida, por envelhecimento, por encruamento e por transformação martensítica (ASKELAND, 2014).

Muitos tipos de aços inoxidáveis ferríticos têm sido amplamente utilizados nos sistemas de exaustão automotivos, a fim de atender a requisitos de garantia de longo prazo, peso leve e regulamentações estritas do meio ambiente. Os sistemas de exaustão automotivos podem ser divididos em partes quentes e frias de acordo com sua temperatura de operação. As partes finais quentes, como um coletor de escape, são usadas a temperaturas acima de 600°C e a temperatura máxima de operação se aproxima de 900°C. Um silenciador e um tubo de escape são componentes das partes frias do sistema de exaustão que operam abaixo de 600°C até a temperatura ambiente ou abaixo do ponto de congelamento. As partes da extremidade fria são frequentemente expostas à faixa de temperatura que causa a corrosão do ponto de orvalho (KIM, 2009).

2.8 Arame Sólido

Adequado para aplicação em soldagem de aços heterogêneos (juntas dissimilares ou desiguais), chapeados, camadas de tampão para deposições duras, aços com alto teor de C e de difícil fusão. Apresenta excelentes propriedades de soldagem pelo alto teor de Si. (EWM, 2015)

2.9 Arame Tubular

Estes arames têm como características maior taxa de deposição e um perfil de penetração menos profundo do que um arame sólido. Por consequência, estes arames são recomendados para soldagem de chapas finas em juntas de topo, filete e sobrepostas. A maior taxa de deposição do arame “*Metal Cored*” proporciona altas velocidades de soldagem, consequentemente, maior produção horária e reduções de custo de fabricação direta e indireta (ESAB, 2018).

São diversos os benefícios da utilização do arame tubular, entre eles,

podemos identificar:

- 1) O baixo nível de respingos fazem estes arames especialmente adequados para aplicações automatizadas ou robotizadas;
- 2) Oferecem excelente acabamento do cordão de solda e são capazes de absorver gaps nas juntas melhor do que quando utilizado arames sólidos;
- 3) Possui alta resistência a corrosão e apresenta excelente resistência mecânica a altas temperaturas promovendo uma microestrutura ferrítica (ESAB, 2018).

O arame tubular foi desenvolvido para utilização de soldagem de sistemas completos de exaustão, conversores catalíticos, silenciadores e “*manifolds*”. (ESAB, 2018).

2.10 Fadiga

A fratura por fadiga verifica-se em estruturas ou componentes submetidos à aplicação de cargas variáveis, que podem ser substancialmente inferiores ao limite de resistência do material e que, se fossem aplicadas lentamente ou de uma forma estática, seriam insuficientes para causar a ruptura. A fadiga é um fenômeno gradual, que se inicia em regiões localizadas, onde existe, em geral, uma concentração de tensões originária, por exemplo, do processo de fabricação ou de descontinuidades resultantes do projeto (MODENESI, 2012).

Uma das maneiras mais representativas de avaliar uma junta dissimilar é através da execução de ensaios de fadiga. Uma das principais características da fadiga é a iniciação de danos e nucleação de trincas nas regiões onde se localizam heterogeneidades estruturais ou mecânicas, tais como inclusões, imperfeições microestruturais ou entalhes mecânicos. Na indústria automobilística, há um interesse crescente na soldagem de materiais dissimilares, dado o fato que neste setor há um grande incremento no uso de materiais variados, inclusive do aço inoxidável. (SILVA, 2018)

As propriedades de fadiga dos componentes automotivos dependem da geometria, espessura, cargas aplicadas e limite de resistência do material. (SINGH, 2016).

Há diversos parâmetros utilizados para caracterizar os ciclos de tensões variáveis. A amplitude da tensão oscila em relação a uma tensão média σ_m , definida

como a média entre tensões máxima e mínima no ciclo, como podemos observar na equação (2.2):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.2)$$

Ademais, o intervalo de tensões σ_i (2.3) é simplesmente a diferença entre $\sigma_{m\acute{a}x}$ + $\sigma_{m\acute{i}n}$, ou seja,

$$\sigma_i = \sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2.3)$$

A amplitude de tensão σ_a é unicamente a metade desse intervalo de tensões, conforme equação (2.4):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_i}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.4)$$

A razão de tensões R, apresentada na equação 2.5, é a razão entre as amplitudes das tensões mínima e máxima (CALLISTER, 2016).

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (2.5)$$

2.11 Fadiga Térmica

Processo no qual a peça é submetida a um ciclo térmico, ou seja, através de ciclos de aquecimento e resfriamento da peça possibilita-se estudar à queda das propriedades mecânicas do metal. A vantagem deste teste é que ele é simples de classificar as classes de aço inoxidável e representa o processo de fadiga térmica real de um escapamento (SANTACREU, 2006).

2.12 Corrosão

A corrosão resume-se na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos. De uma maneira geral, a corrosão consiste num processo espontâneo e está constantemente transformando os materiais metálicos, provocando a perda de suas

propriedades mecânicas. Sendo assim, estes materiais deixam de atender os fins a que se destinam (OLIVEIRA, 2015).

Normalmente, o processo de corrosão de materiais metálicos é eletroquímico, isto é, uma reação química que apresenta transferência de elétrons a partir de uma espécie química para uma outra. De modo geral, átomos metálicos perdem ou cedem elétrons, esse fenômeno é chamado de reação de oxidação ou reação anódica. Estes elétrons são transferidos para outra espécie química na chamada reação de redução ou reação catódica (SILVA, 2017).

Uma taxa muito alta de corrosão nos componentes de escape automotivos, mais provavelmente em silenciadores, é um dos maiores problemas que a indústria automobilística enfrenta. O uso de aços inoxidáveis de cromo ferrítico, aços inoxidáveis cromo-molibdênio ferrítico e aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns atualmente. Mesmo os aços inoxidáveis não possuem resistência à corrosão ilimitada devido às condições agressivas de operação. A quantidade de peças extremamente corroídas é muito alta devido a uma variedade de fenômenos de corrosão que ocorrem no campo. De todas as falhas de escapamento automotivo, cerca de 80% são causadas por diferentes mecanismos de corrosão, enquanto a maioria do restante é causada por fadiga mecânica ou térmica (YASIR, 2011).

2.13 Corrosão Intergranular

A corrosão intergranular nos aços inoxidáveis é normalmente resultado da sensitização, termo geralmente utilizado para descrever tratamentos térmicos que podem ou não tornar uma liga susceptível à corrosão intergranular. O fenômeno da sensitização consiste na precipitação dos carbonetos nos contornos de grão e no empobrecimento em cromo da região vizinha, após do material ter sido tratado termicamente ou aquecidos para trabalho a quente ou para soldagem numa certa faixa de temperatura entre 400°C e 850°C e quando o aço for aquecido dentro dessa faixa mesmo que por um tempo muito curto (ZANETIC, 2014).

Conforme a norma ASTM A763, os aços inoxidáveis ferríticos estarão suscetíveis à corrosão intergranular quando apresentarem contornos de grãos valetados ou com “*ditches*”, em outras palavras, completamente envolvidos pela corrosão, a figura 10 apresenta um exemplo de estrutura aceitável de aço inoxidável

e outra estrutura inaceitável, apresentando corrosão intergranular.

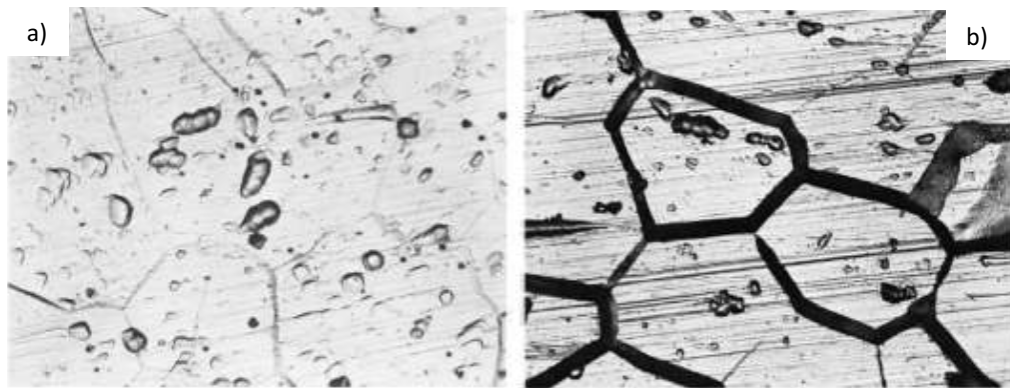


Figura 11 - Norma ASTM A763 (a) Estrutura aceitável de aço inoxidável ferrítico após ensaio (b) Estrutura inaceitável, apresentando corrosão intergranular, de aço inoxidável ferrítico após ensaio.

A corrosão intergranular ocorre na zona afetada pelo calor da solda, porque o ambiente nos sistemas de exaustão dos automóveis é muito corrosivo devido ao gás de exaustão e à condensação de água (KIM, 2009).

2.14 Média aritmética ($\bar{x}$)

É o coeficiente da divisão da soma dos valores da variável pelo número deles (CRESPO, 2009), conforme equação 2.6:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2.6)$$

Sendo:

$\bar{x}$ a média aritmética;

x_i os valores da variável;

n o número de valores.

2.15 Desvio Padrão

Denotado por s , apresentado na equação 2.7, é definido como a raiz quadrada positiva da variância.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (2.7)$$

A variância é uma medida de variabilidade que utiliza todos os dados (SWEENEY, 2016). Para fins práticos, há uma formula mais simples para o cálculo da variância (DOWNING, 2011), apresentado na equação 2.8.

$$Var(x) = \overline{x^2} - \bar{x}^2 \quad (2.8)$$

2.16 Coeficiente de variação

O Coeficiente de variação (CV) de um conjunto de dados refere-se ao desvio padrão como uma porcentagem da média (LARSON, 2016), o qual é calculado através da equação 2.9.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (2.9)$$

2.17 Análise fatorial

A análise fatorial procura definir, em um estudo com muitas variáveis, conjuntos de variáveis altamente correlacionadas, denominados como fatores. Os fatores têm o objetivo de resumir as inúmeras variáveis em um conjunto menor de dimensões com uma perda mínima de informação (FIGUEIREDO FILHO, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia empregados no estudo comparativo da soldagem de materiais dissimilares, visando resultados quantificáveis e comparáveis.

3.1 Materiais

3.1.1 Tubo de Aço Inoxidável.

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de tubos de aço inoxidável, AISI 409 e AISI 439. Em ambos os casos, os tubos possuíam 250 mm de comprimento, diâmetro de 45 mm e espessura de 1,2 mm, sem bisel.

3.1.2 Flange Aço Carbono.

Os flanges utilizados neste estudo, são de aço carbono AISI 1018 e apresentavam 10 mm de espessura e área de 127,4 mm x 127,8mm, sem bisel.

3.1.3 Fonte de Potência para soldagem

Para realização dos ensaios foi utilizada uma fonte de energia, modelo Transpuls Synergic 5.000MV da empresa FRONIUS, conforme figura 11, a qual permite a realização de uma série de processos de soldagem, tais como, eletrodo revestido, tubular entre outros. Todos os modos de seleção de programas da máquina encontravam-se disponíveis no visor do cabeçote facilitando a seleção de cada processo.



Figura 12 - Fonte de energia modelo Transpuls Synergic 5.000MV da empresa FRONIUS

3.1.4 Gás

Para o estudo desenvolvido neste trabalho buscou-se avaliar o efeito da proteção gasosa sobre o processo MIG, adotando vazões e correntes com as características necessárias para utilização de cada metal de adição. O tipo de gás utilizado foi o AG12, de composição 98% Ar e 2% CO₂.

3.1.5 Metal de Adição

Como metal de adição foram utilizados arame sólido AISI 307Si de fabricação da empresa Novametal do Brasil, com diâmetro de 1,2 mm e o arame tubular AISI 439Ti de fabricação da empresa ESAB, com diâmetro de 1,2 mm, conforme figura 12.



Figura 13 - Arame tubular AISI 439Ti de fabricação da empresa ESAB.

A composição química dos arames, conforme dados fornecidos pelos fabricantes, são apresentados na tabela 01.

Tabela 1 - Composição química (%) – fonte: EWM e ESAB datasheet.

Material	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Ti
AISI 307Si	0,08	7,00	0,90	18,00	8,0	–
AISI 439Ti	0,02	0,50	0,50	17,50	–	0,50

A seleção do tipo e diâmetro do eletrodo está relacionado com a fato que os mesmos são comercialmente utilizados no processo de fabricação de escapamentos.

3.1.6 Metal de Base.

O material base para confecção dos corpos de prova foram tubos de aço inoxidável ferríticos AISI 409 e 439, e flanges de aço baixo carbono AISI 1018 (equivalente ao SAE J403 1018), conforme tabela 02.

Tabela 2 - Composição química (%).

	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Ti
AISI 1018	0,18	0,75	–	≤ 0,04	≤ 0,05	–	–	–	–
AISI 409	≤ 0,03	≤ 0,75	≤ 1,00	≤ 0,04	≤ 0,02	11,00	≤ 0,50	–	0,30
AISI 439	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 0,04	≤ 0,03	17~19,0	≤ 0,50	–	0,30

3.2 Métodos

Os corpos de prova foram produzidos a partir de tubos de aço inoxidável de 250 mm de comprimento, diâmetro de 45 mm e espessura de 1,2 mm. Os flanges de aço carbono apresentavam 10 mm de espessura e área de 127,4 mm x 127,8 mm, conforme ilustrado no desenho esquemático apresentado na figura 14, 15 e 16.

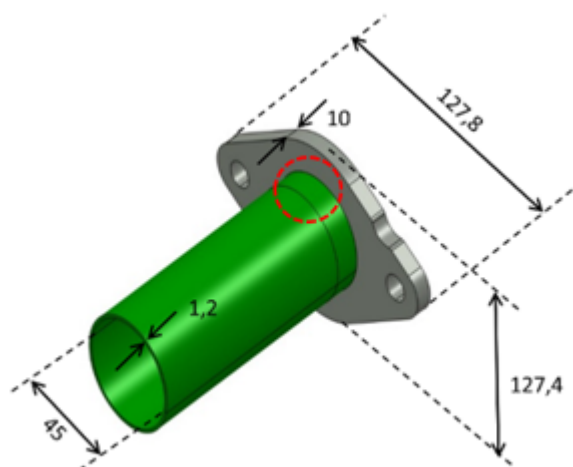


Figura 14 - Desenho esquemático (dimensões em mm) do Conjunto de testes empregado neste estudo.

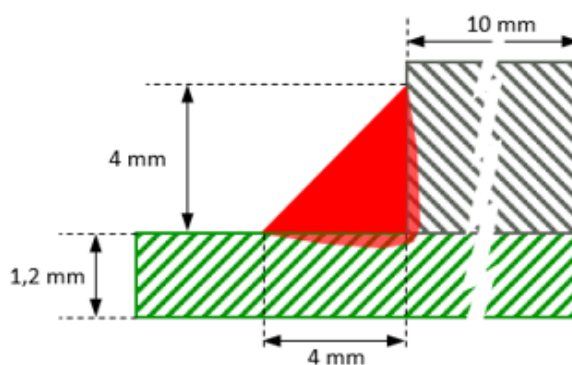


Figura 15 - Detalhe da junta soldada com as dimensões mínimas do depósito de solda. A área verde representa o tubo e área cinza a flange.



Figura 16 - Corpo de Prova

O processo de soldagem utilizado foi GMAW, mais conhecida como soldagem MIG/MAG. Foram produzidos 32 corpos de prova, sendo eles: 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 409 soldados com flanges de aço carbono internamente utilizando arame sólido, 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 409 soldados com flanges de aço carbono externamente utilizando arame sólido, 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 409 soldados com flanges de aço carbono internamente utilizando arame tubular, 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 409 soldados com flanges de aço carbono externamente utilizando arame tubular, 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 439 soldados com flanges de aço carbono internamente utilizando arame sólido, 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 439 soldados com flanges de aço carbono externamente utilizando arame sólido, 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 439 soldados com flanges de aço carbono internamente utilizando arame tubular e 4 corpos de prova de tubo de aço inoxidável 439 soldados com flanges de aço carbono externamente utilizando arame tubular. As figuras 17 a e b apresentam exemplos de corpos de provas soldados internamente.

Todos os corpos de provas foram produzidos nas dependências da empresa Tenneco Automotive do Brasil, localizada na cidade de Mogi Mirim. Assim como, todos os ensaios foram realizados na mesma.

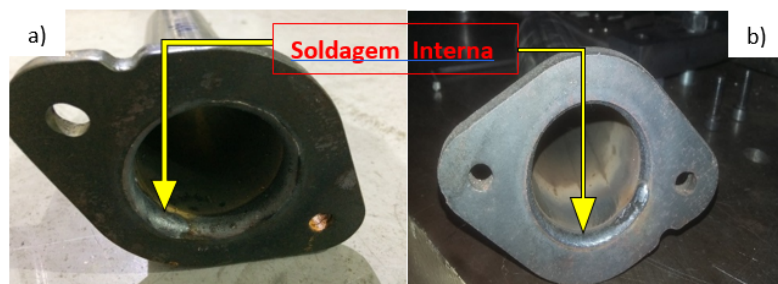


Figura 17 – a) Corpo de prova soldado internamente com arame sólido. b). Corpo de prova soldado internamente com arame tubular.

3.2.1 Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros de soldagem empregados neste estudo, foram baseados nas práticas utilizadas pela empresa *Tenneco Automotive* do Brasil para produção de escapamentos automotivos, e podem ser identificados na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem empregados neste estudo.

PARÂMETROS	TUBULAR (EXTERNO)	TUBULAR (INTERNO)	SÓLIDO (INTERNO E EXTERNO)
Programa	10 CrNi => 18 - 8 - 6	10 CrNi => 18 - 8 - 6	9 CrNi => 18 - 8 - 6
Arame	1,2mm => MC439Ti	1,2mm => MC439Ti	1,0mm => 307Si
Corrente (A)	325A	295A	202A
Tensão (V)	27,3V	21,3V	27,3V
Indutância	-5	-5	-5
Comprimento do Arco	-18	-15	-18
Velocidade (mm/s)	25	25	25
Gás	AG12	AG12	AG12

3.2.2 Processo de Soldagem Interno

Foi utilizado o processo de solda de filete horizontal, na posição 2F. O tubo foi posicionado dentro do flange permitindo um espaçamento de 1.0mm com a base da flange. Sendo assim, foi realizada a soldagem na parte interna da flange com o objetivo de unir a flange e o tubo. O ângulo de ataque foi de 30°. A figura 18 representa a área da solda entre a flange com o tubo e a direção da soldagem.

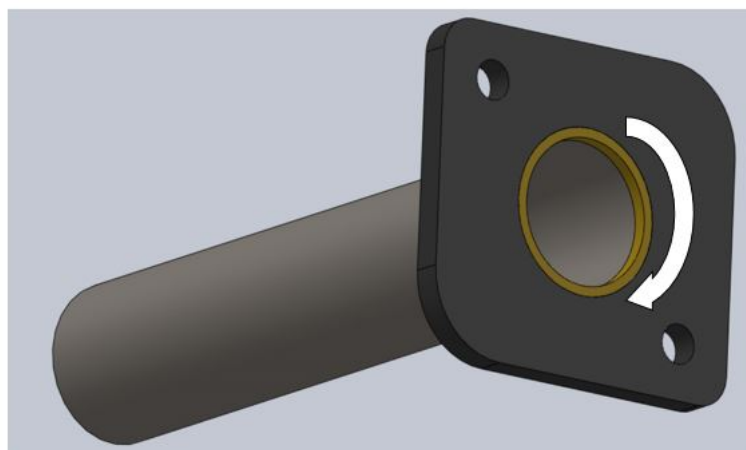


Figura 18 - Soldagem Interna e direção da soldagem

3.2.3 Combinações de Consumíveis vs Metal Base

Quadro 1: Combinações de Consumíveis vs Metal Base

Combinações de Consumíveis x Metal Base	Arame Sólido	Arame Tubular
Flange AISI 1018 x Tubo de aço inoxidável AISI 409	X	X
Flange AISI 1018 x Tubo de aço inoxidável AISI 439	X	X

Os arames sólidos e tubulares foram utilizados nas duas combinações de consumíveis e metal de base, ou seja, flange AISI 1018 x tubo de aço inoxidável AISI 409 e flange AISI 1018 x tubo de aço inoxidável AISI 439.

3.2.4 Processo de Soldagem Externo

Para realizar a solda externa do arame da flange com o tubo, foi utilizado o processo de solda de filete horizontal, na posição 2F. O tubo foi posicionado dentro da flange permitindo um espaçamento de 1.0mm entre a base da flange e o tubo. O ângulo de ataque foi de 75°. A figura 19 representa a área da solda entre a flange com o tubo e a direção da soldagem.

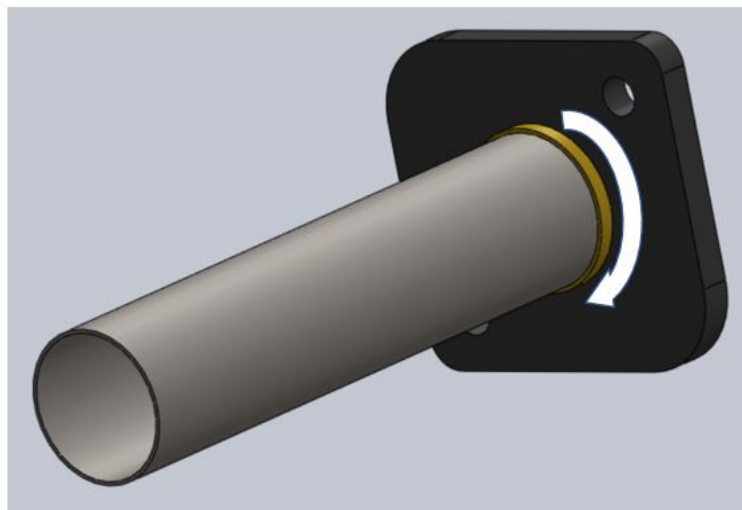


Figura 19 – Soldagem Externa e direção da soldagem

3.2.5 Ensaios de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme recomendações de uma montadora automotiva nacional, utilizando uma amplitude de 1.200N igual em tração/compressão, constituindo em um carregamento tipo de Wöhler no qual a tensão média é nula, $\sigma_m = 0$; e a razão entre tensões, $R = -1$.) O carregamento foi aplicado no conjunto de testes (vide Fig. 14) diretamente no tubo a uma frequência de 8 Hz. Os ensaios foram executados em um equipamento de ensaios de fadiga, fabricado pela empresa MOOG, servo-atuador modelo G446-1024. A Figura 20 apresenta a configuração de testes empregada neste estudo

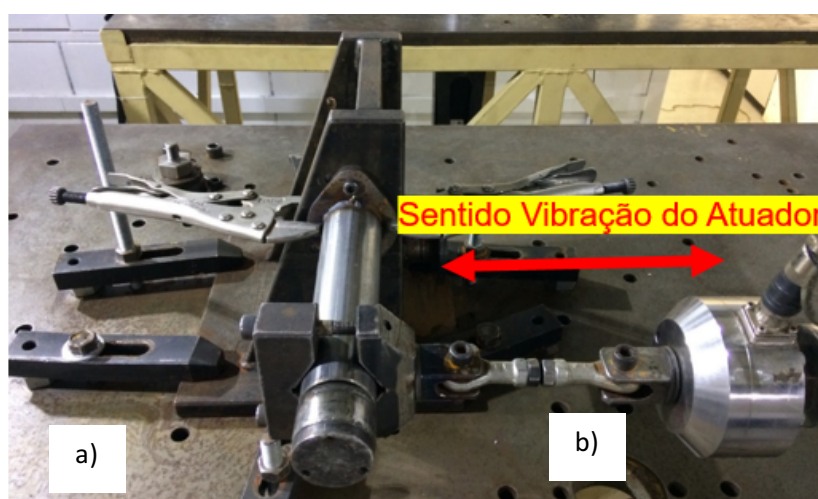


Figura 20 - Configuração do ensaio de fadiga.

3.2.6 Ensaio de Fadiga Térmica

Os ensaios de fadiga térmica foram realizados para reproduzir certas condições de trabalho existentes no escapamento automotivo. O equipamento utilizado foi um queimador industrial, do tipo Duto, da empresa Holamaq. Conduziram-se ensaios de fadiga térmica por 200 ciclos em cada corpos-de-prova (vide Fig. 14). Cada ciclo envolveu a fase de aquecimento do gás até uma temperatura de 700°C e uma fase de resfriamento por convecção ao ar comprimido, até a temperatura de 25°C, completando um ciclo em 4,5 minutos, foi utilizado um coeficiente de vazão de 300 kg/h, a figura 21 representa a variação de temperatura ao longo do tempo. Os pontos de medições podem ser observados na figura 22.

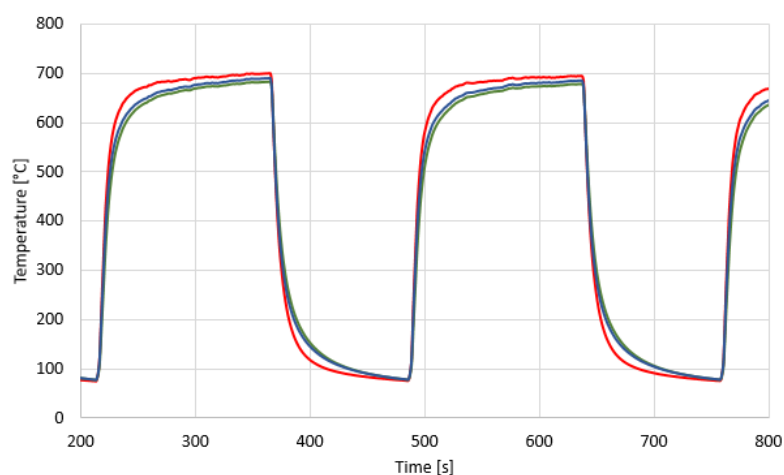


Figura 21 - Gráfico representativo da variação de temperatura ao longo do tempo.



1. Dispositivo de medida da temperatura do gás;
2. Dispositivo de medida da temperatura do gás antes das amostras A e B;
3. Dispositivo de medida da temperatura do gás antes das amostras C e D.

Figura 22 - Pontos de medições do ensaio de Fadiga Térmica.

3.2.7 Ensaios de Estanqueidade

Para avaliação do material estudado perante o ensaio de estanqueidade, todas as amostras foram avaliadas para verificar se não houve vazamento. Foi utilizada a pressão de 0,3 Bar e um fluxo de referência de 1 L/min, a figura 23 demonstra o equipamento utilizado para realizar este ensaio. O objetivo deste ensaio é localizar possíveis defeitos na superfície.



Pressão: 0.3 bar

Fluxo de referência: 1 L/min

Figura 23 - Equipamento utilizado para realizar ensaio de vazamento.

3.2.8 Ensaio Micrográfico

Os ensaios micrográficos no cordão de solda foram realizados para analisar o tamanho de grão depois da execução do ensaio de fadiga térmica. Os ensaios micrográficos foram realizados conforme a norma ASTM E 112.

Para preparação das amostras foram utilizados os equipamentos: Lixadeira AROTEC modelo AROPOL 2V, Embutidora AROTEC PRE 30 e Politriz AROTEC modelo AROPOL 2V. A análise micrográfica foi realizada utilizando um microscópio e uma câmara de captura de imagem Olympus.

Amostras dos corpos-de-prova foram retiradas em cortes transversais para ensaios micrográficos. Então, estas foram lixadas e polidas até a pasta de diamante de granulometria 0,25 µm. Em seguida foram atacadas com ácido oxálico 10%, para revelação de sua microestrutura.

3.2.9 Ensaio de Sensitização

Os ensaios de corrosão foram feitos em 8 amostras de acordo com a norma ASTM A763 com ataque eletrolítico em ácido oxálico 10%, cuja composição é dada por 10g de Ácido Oxálico e 10 ml H₂O (H₂C₂O₄.2H₂O) para caracterizar a suscetibilidade a corrosão intergranular. Este ensaio tem como objetivo avaliar a precipitação de carbonetos de cromo, estas sendo prejudiciais à principal característica presente em tais ligas: a resistência à corrosão.

3.2.10 Cálculo de Diluição de Solda

Para realizar o cálculo de diluição da solda, foi utilizado o programa “IMAGE J”, versão 1.44p – Wayne Rasband, programa de domínio público, feito em JAVA destinado para processamento de imagens, representado pela figura 24. Os corpos de prova tiveram sua área total de solda avaliadas, bem como a área de diluição da flange e área de diluição do tubo.

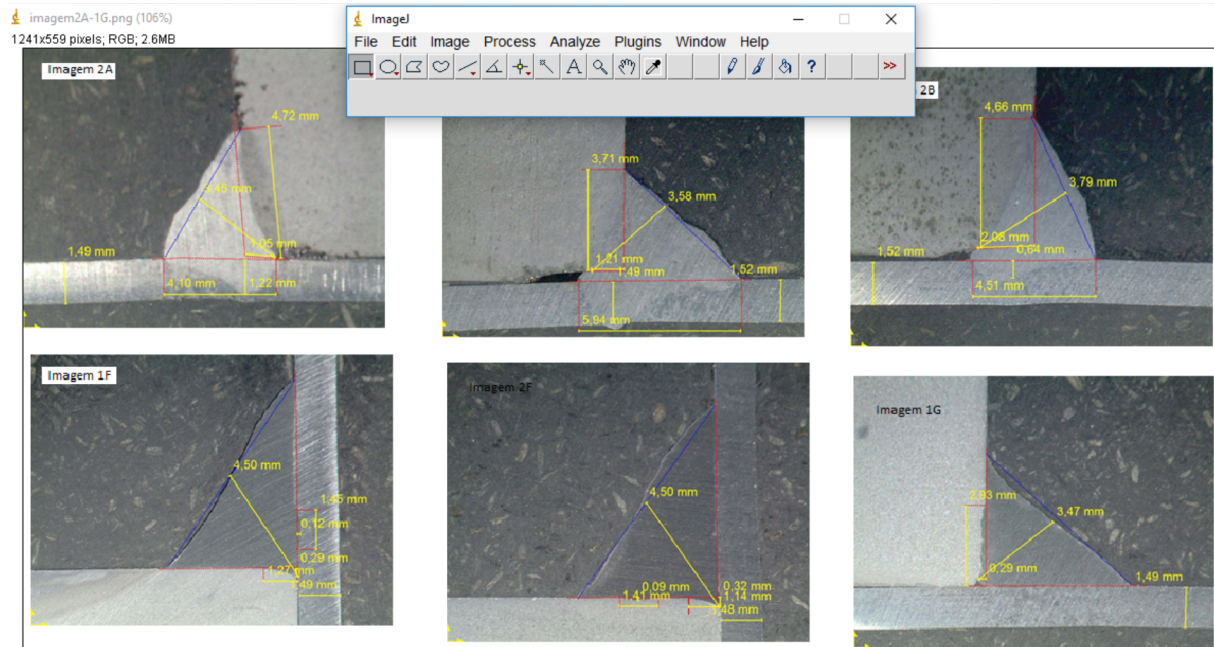


Figura 24 – Imagens utilizadas no Aplicativo ImageJ

4 RESULTADOS

Após a análise dos ensaios realizados nos corpos de prova e dos resultados propriamente ditos, alguns fatores importantes foram identificados. Estes fatores serão apresentados a seguir, visando à obtenção do melhor cenário para a aplicação do material estudado.

4.1 Ensaio de Microestrutura

A figura 25 apresenta três diferentes ampliações. A imagem superior apresenta a área soldada, bem como tubo e flange. A imagem inferior esquerda ilustra a zona termicamente afetada do tubo e a imagem inferior direita apresenta a zona termicamente afetada da flange.

4.1.1 Amostra 1A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular

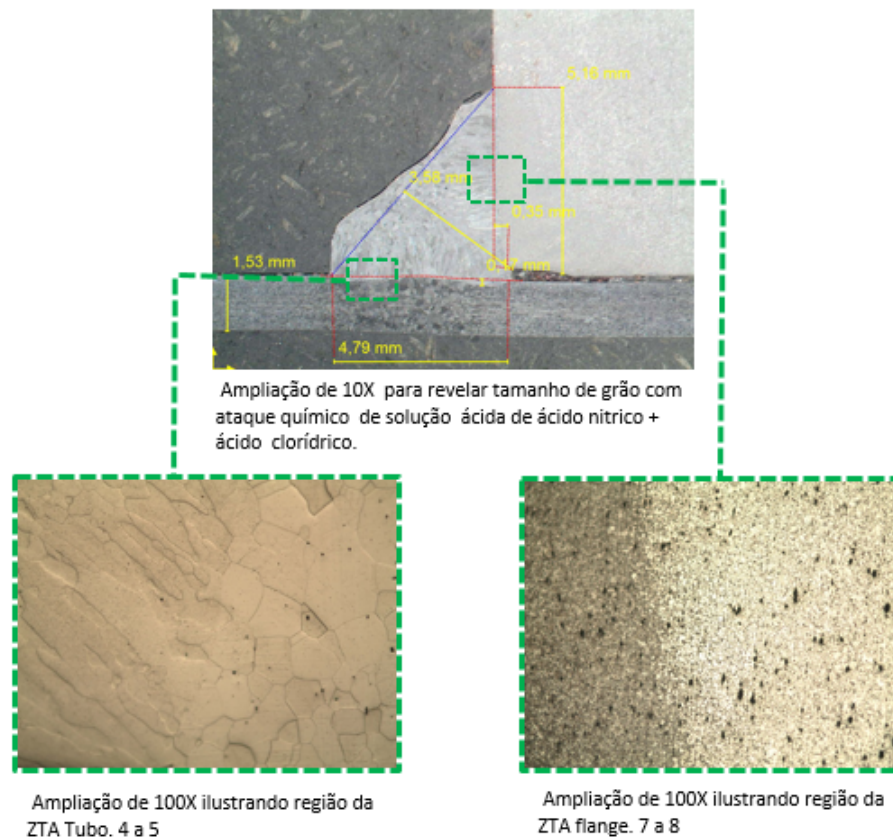


Figura 25 - Tamanho de grão 1.

Conforme quadro 2, os resultados obtidos da penetração da solda atendem o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 02: Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g $\geq$	1.071	3.58	OK
	Flange b $\geq$	1.377	5.16	OK
	Tubo b $\geq$	1.377	4.79	OK
	Penetração Flange $\geq$	0.153	0.35	OK
	Penetração Tubo $\geq$	0.153	0.17	OK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 4 - Diluição Amostra 1A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular.

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
15.442	0.578	0.706	1.800	1.485

4.1.2 Amostra 2A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular

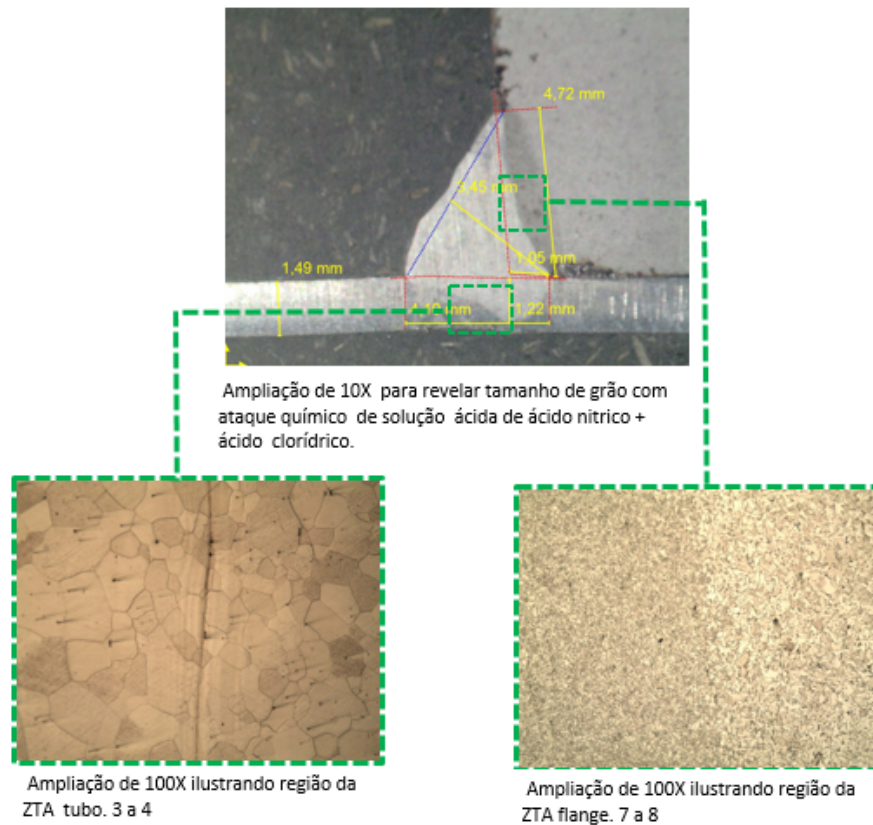


Figura 26 - Tamanho de grão2.

Conforme quadro 3, os resultados obtidos da penetração da solda atendem o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 03- Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g $\geq$	1.043	3.45	OK
	Flange b $\geq$	1.341	4.72	OK
	Tubo b $\geq$	1.341	4.1	OK
	Penetração Flange $\geq$	0.149	1.05	OK
	Penetração Tubo $\geq$	0.149	1.22	OK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 5 - Diluição Amostra 2A - Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular.

Área Total Solda (mm2)	Área Diluição Tubo (mm2)	Área Diluição Flange (mm2)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
12.463	2.925	1.951	7.877	11.484

4.1.3 Amostra 1B - Solda Externa Tubo 439 Arame Tubular.

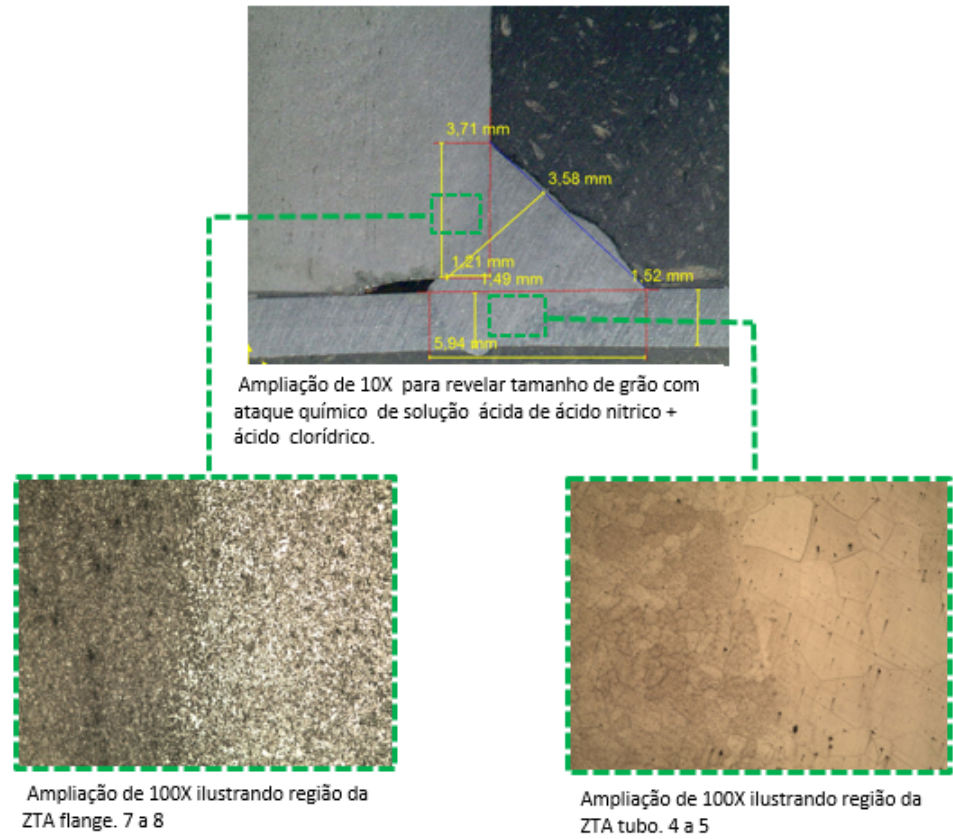


Figura 27 - Tamanho de grão3.

Conforme quadro 4, os resultados obtidos da penetração da solda atendem o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 04 – Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g ≥	1.064	3.58	OK
	Flange b ≥	1.368	3.71	OK
	Tubo b ≥	1.368	5.94	OK
	Penetração Flange ≥	0.152	1.21	OK
	Penetração Tubo ≥	0.152	1.52	OK
	Diâmetro do poro ≤ 0,5	0.5	0	OK

Tabela 6 - Diluição Amostra 1B - Solda Externa Tubo 439 Arame Tubular.

Área Total Solda (mm2)	Área Diluição Tubo (mm2)	Área Diluição Flange (mm2)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
16.848	4.321	2.647	6.491	12.853

4.1.4 Amostra 2B - Solda Externa, Tubo 439 e Arame Tubular.

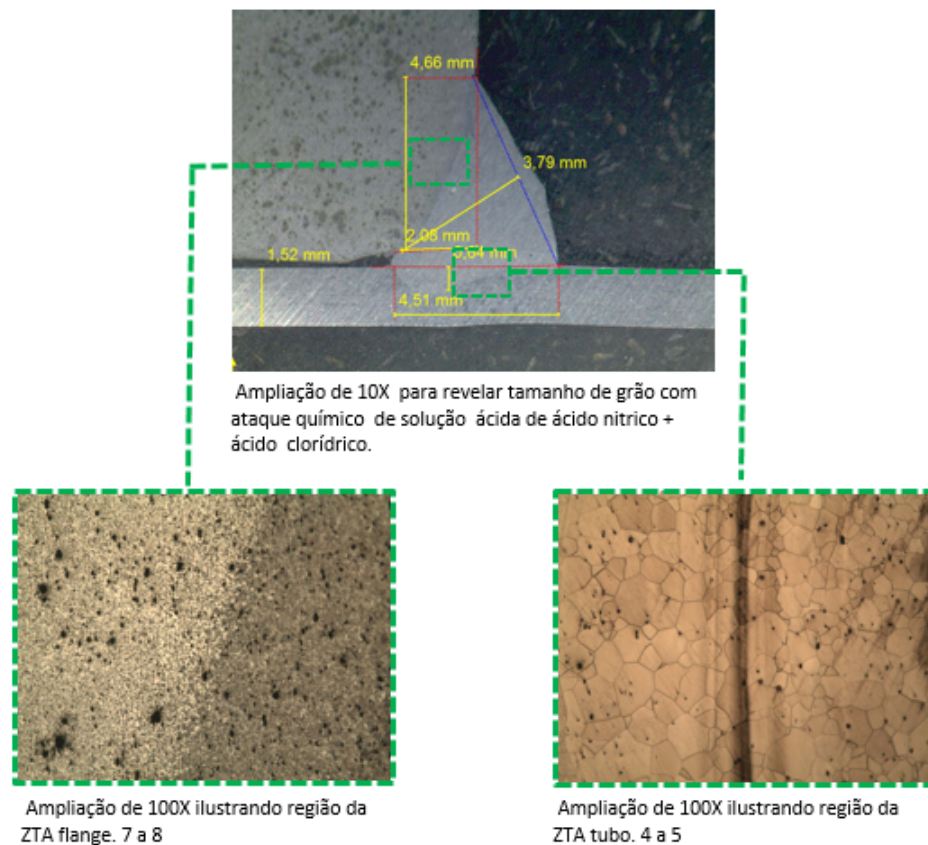


Figura 28 - Tamanho de grão 4.

Conforme quadro 5, os resultados obtidos da penetração da solda atendem o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 05 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g $\geq$	1.064	3.79	OK
	Flange b $\geq$	1.368	4.66	OK
	Tubo b $\geq$	1.368	4.51	OK
	Penetração Flange $\geq$	0.152	2.08	OK
	Penetração Tubo $\geq$	0.152	0.64	OK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 7 - Diluição Amostra 2B - Solda Externa, Tubo 439 e Arame Tubular.

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
12.890	1.650	3.885	15.715	6.000

4.1.5 Amostra 1F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido.

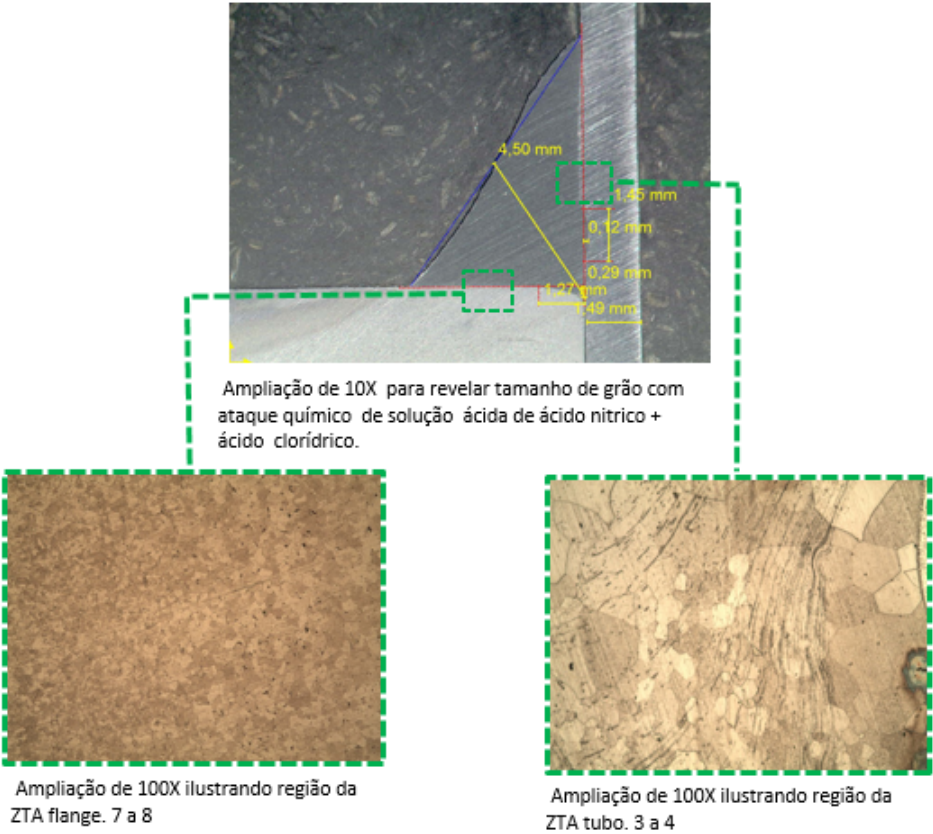


Figura 29 - Tamanho de grão 5.

Conforme quadro 6, os resultados obtidos da penetração da solda não atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 06 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g ≥	1.043	4.5	OK
	Flange b ≥	1.341	1.27	NOK
	Tubo b ≥	1.341	1.45	OK
	Penetração Flange ≥	0.149	0.29	OK
	Penetração Tubo ≥	0.149	0.12	NOK
	Diâmetro do poro ≤ 0,5	0.5	0	OK

Tabela 8 - Diluição Amostra 1F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido

Área Total Solda (mm2)	Área Diluição Tubo (mm2)	Área Diluição Flange (mm2)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
16.865	0.598	0.498	1.312	2.420

4.1.6 Amostra 2F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido.

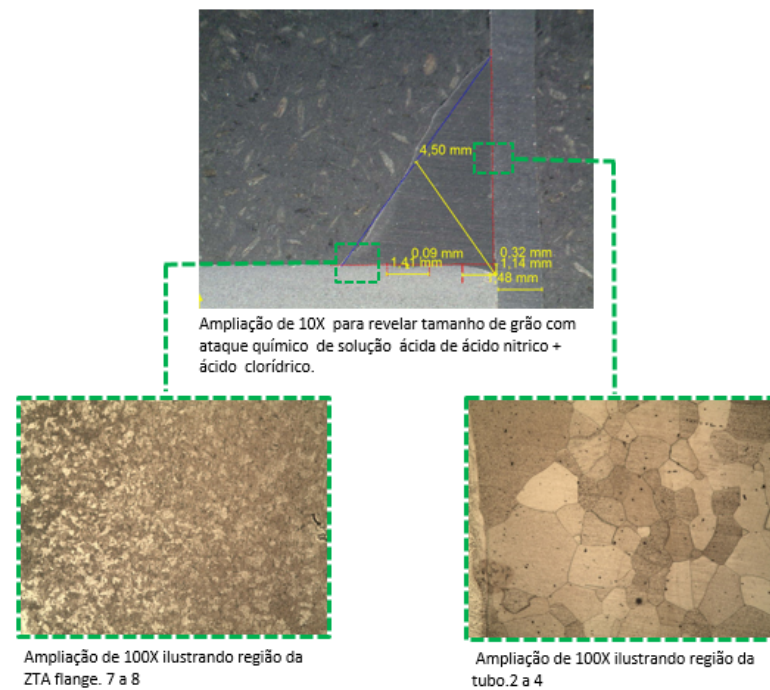


Figura 30 - Tamanho de grão 5.

Conforme quadro 7, os resultados obtidos da penetração da solda não atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 7 – Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g $\geq$	1.036	4.5	OK
	Flange b $\geq$	1.332	1.41	OK
	Tubo b $\geq$	1.332	0	NOK
	Penetração Flange $\geq$	0.148	0.32	OK
	Penetração Tubo $\geq$	0.148	0	NOK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 9 – Diluição Amostra 2F - Solda Externa, Tubo 409 Arame Sólido

Área Total Solda (mm2)	Área Diluição Tubo (mm2)	Área Diluição Flange (mm2)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
18.811	0.502	0.314	0.630	1.509

4.1.7 Amostra 1G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido.

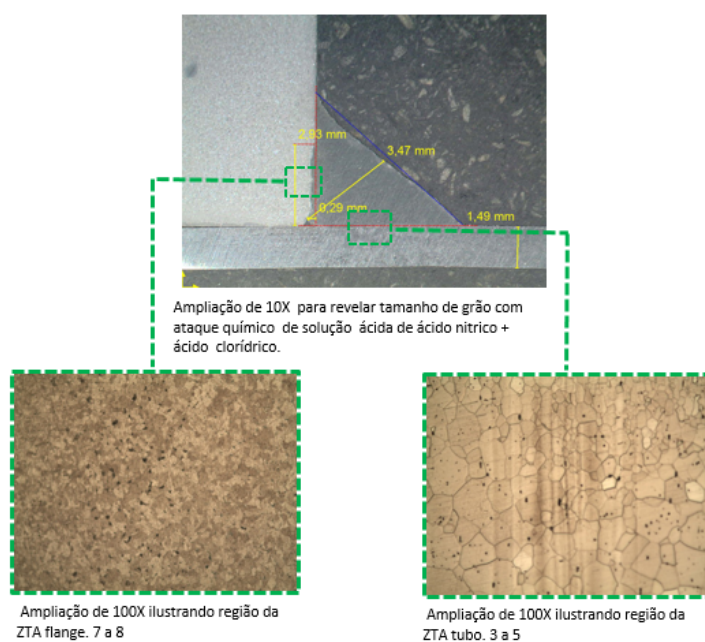


Figura 31 - Tamanho de grão 6.

Conforme quadro 8, os resultados obtidos da penetração da solda não atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 08 – Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g $\geq$	1.043	3.47	OK
	Flange b $\geq$	1.341	2.93	OK
	Tubo b $\geq$	1.341	0	NOK
	Penetração Flange $\geq$	0.149	0.29	OK
	Penetração Tubo $\geq$	0.149	0	NOK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 10 - Diluição Amostra 1G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
12.918	1.234	0.594	1.929	1.471

4.1.8 Amostra 2G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido.

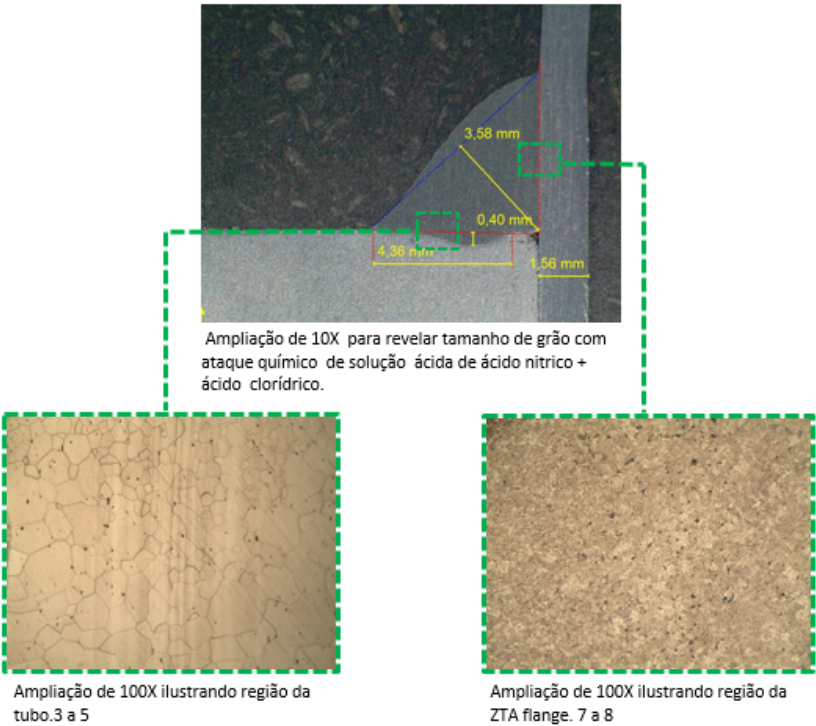


Figura 32 - Tamanho de grão 7.

Conforme quadro 9, os resultados obtidos da penetração da solda não atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 09 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g ≥	1.092	3.58	OK
	Flange b ≥	1.404	4.36	OK
	Tubo b ≥	1.404	0	NOK
	Penetração Flange ≥	0.156	0.4	OK
	Penetração Tubo ≥	0.156	0	NOK
	Diâmetro do poro ≤ 0,5	0.5	0	OK

Tabela 11 - Diluição Amostra 2G - Solda Externa Tub.439 Arame Sólido

Área Total Solda (mm2)	Área Diluição Tubo (mm2)	Área Diluição Flange (mm2)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
16.656	0.803	0.620	2.907	1.635

4.1.9 Amostra 1C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular.

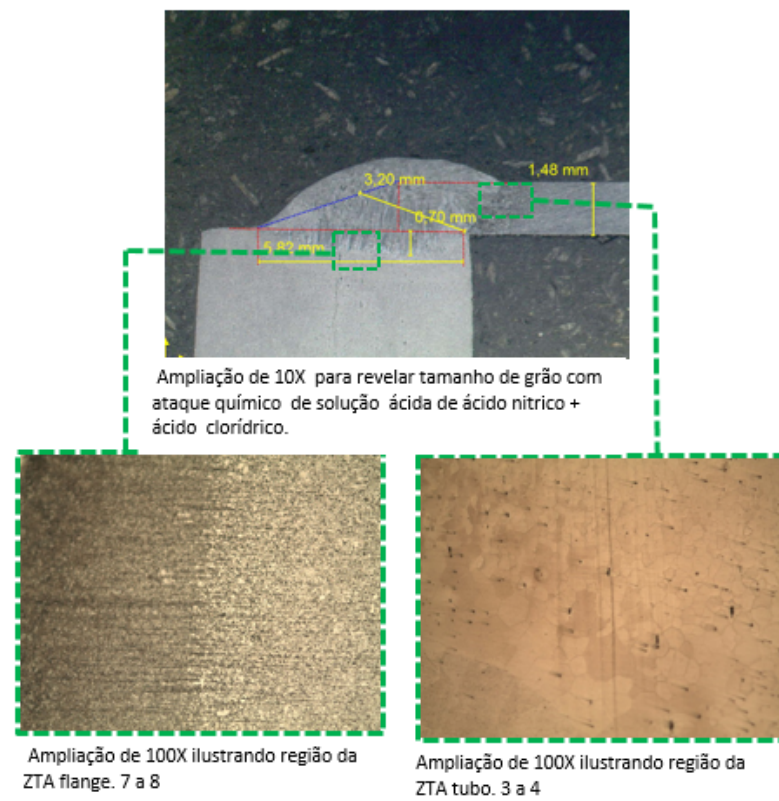


Figura 33 - Tamanho de grão 8.

Conforme quadro 10, os resultados obtidos da penetração da solda atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 10 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	$g \geq$	1.036	3.2	OK
	Flange $b \geq$	1.332	5.82	OK
	Penetração Flange $\geq$	0.148	0.7	OK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 12 - Diluição Amostra 1C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
13.857	3.181	4.758	13.394	13.035

4.1.10 Amostra 2C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular.

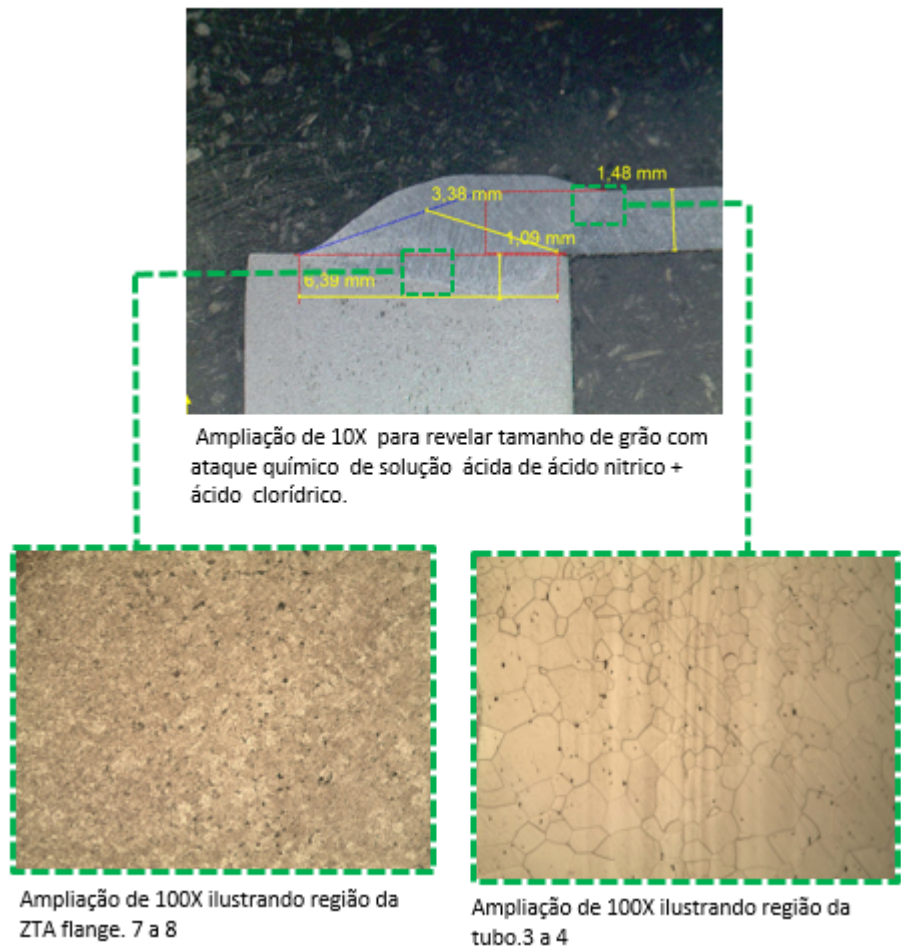


Figura 34 - Tamanho de grão 9.

Conforme quadro 11, os resultados obtidos da penetração da solda atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 11 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g ≥	1.036	3.38	OK
	Flange b ≥	1.332	6.39	OK
	Penetração Flange ≥	0.148	1.09	OK
	Diâmetro do poro ≤ 0,5	0.5	0	OK

Tabela 13 - Diluição Amostra 2C - Solda Interna, Tubo 439 Arame Tubular

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
14.719	3.672	4.698	13.532	12.116

4.1.11 Amostra 1D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido.

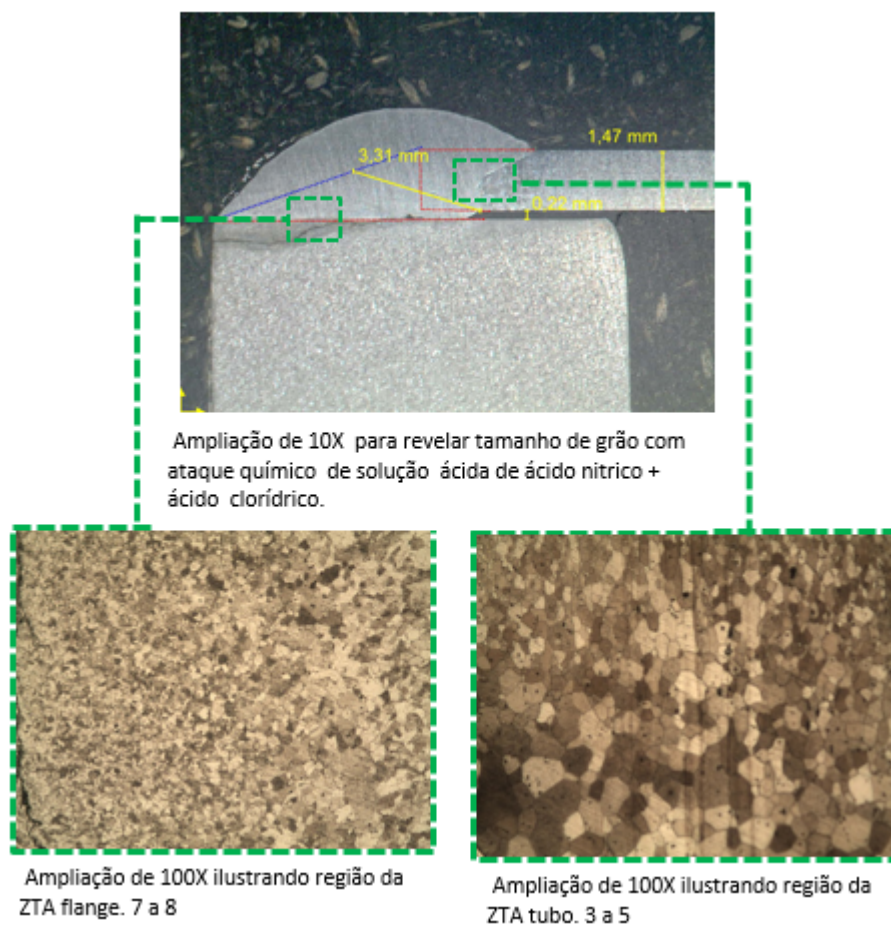


Figura 35 - Tamanho de grão 10.

Conforme quadro 12, os resultados obtidos da penetração da solda atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 12 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g $\geq$	1.029	3.31	OK
	Flange b $\geq$	1.323	0	NOK
	Penetração Flange $\geq$	0.147	0	NOK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 14 - Diluição Amostra 1D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
14.697	2.390	2.743	4.164	8.474

4.1.12 Amostra 2D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido.

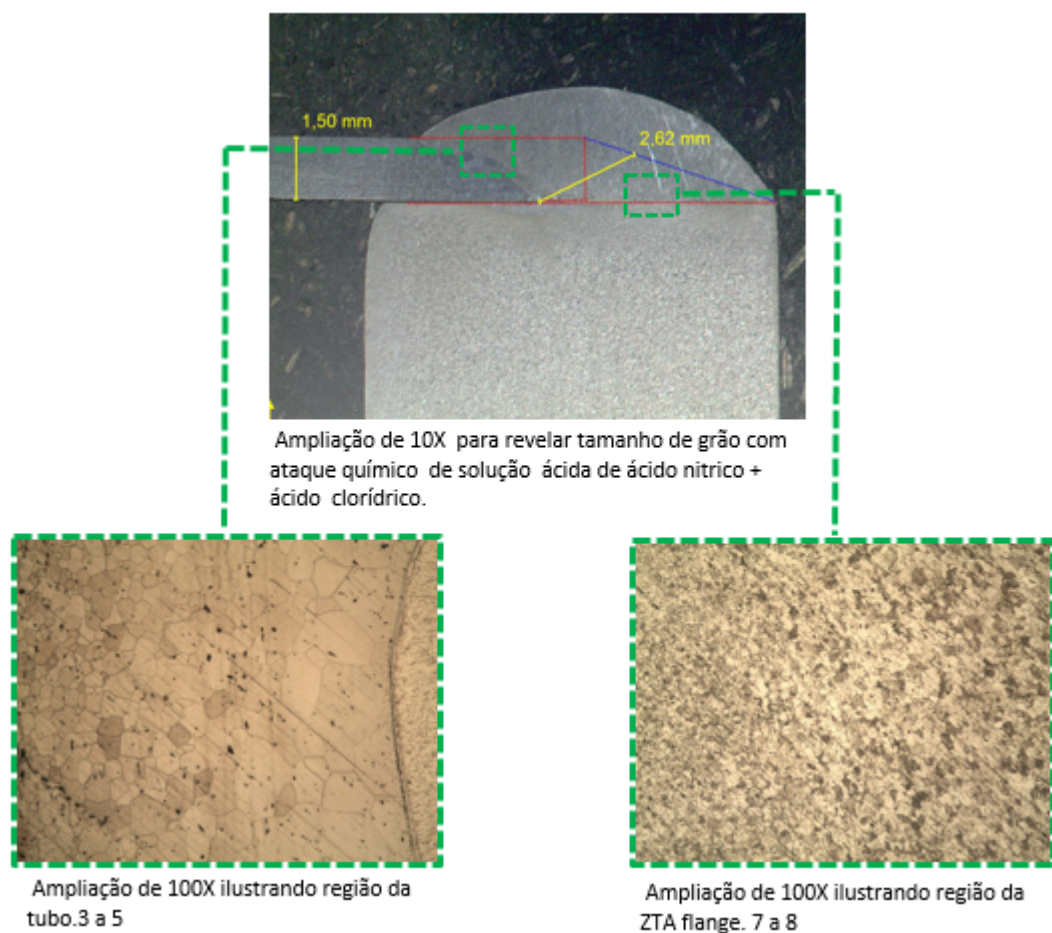


Figura 36 - Tamanho de grão 12.

Conforme quadro 13, os resultados obtidos da penetração da solda não atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 13 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	$g \geq$	1.05	2.62	OK
	Flange $b \geq$	1.35	0	NOK
	Penetração Flange $\geq$	0.15	0	NOK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 15 - Diluição Amostra 2D - Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
16.822	2.553	4.732	1.396	10.998

4.1.13 Amostra 1E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular.

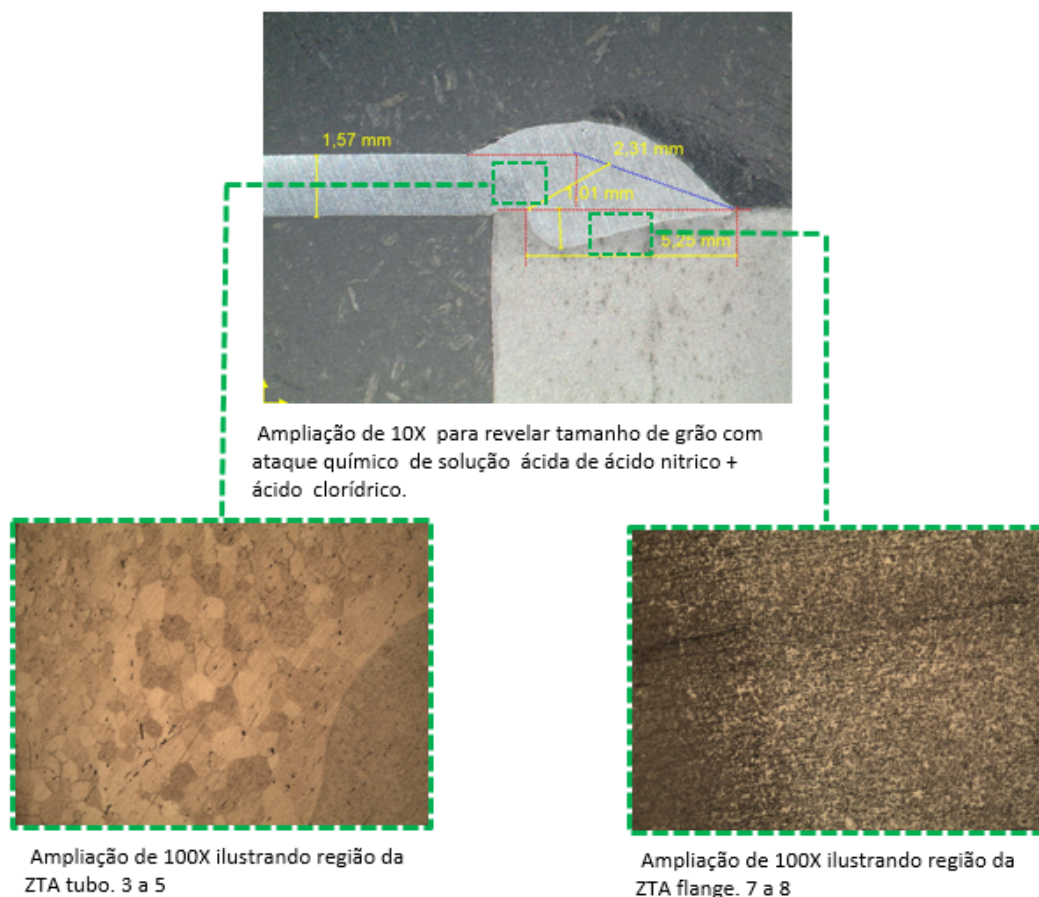


Figura 37 - Tamanho de grão 13.

Conforme quadro 14, os resultados obtidos da penetração da solda atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 14 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	$g \geq$	1.099	2.31	OK
	Flange $b \geq$	1.413	5.25	OK
	Penetração Flange $\geq$	0.157	1.01	OK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 16 - Diluição Amostra 1E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
12.646	2.667	3.384	10.744	10.301

4.1.14 Amostra 2E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular.

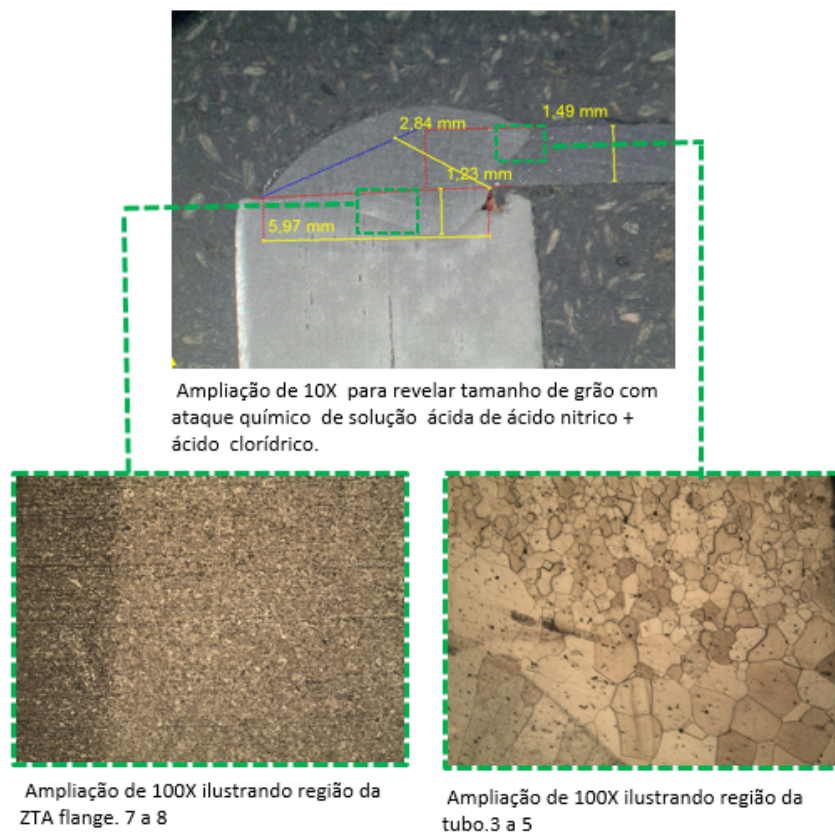


Figura 38 - Tamanho de grão 14.

Conforme quadro 15, os resultados obtidos da penetração da solda atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 15 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (m)		Status (mm)	
Penetração de Solda	$g \geq$	1.043	2.84	OK
	Flange $b \geq$	1.341	5.97	OK
	Penetração Flange $\geq$	0.149	1.23	OK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 17 - Diluição Amostra 2E - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
14.339	3.511	4.014	12.734	12.457

4.1.15 Amostra 1H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido.

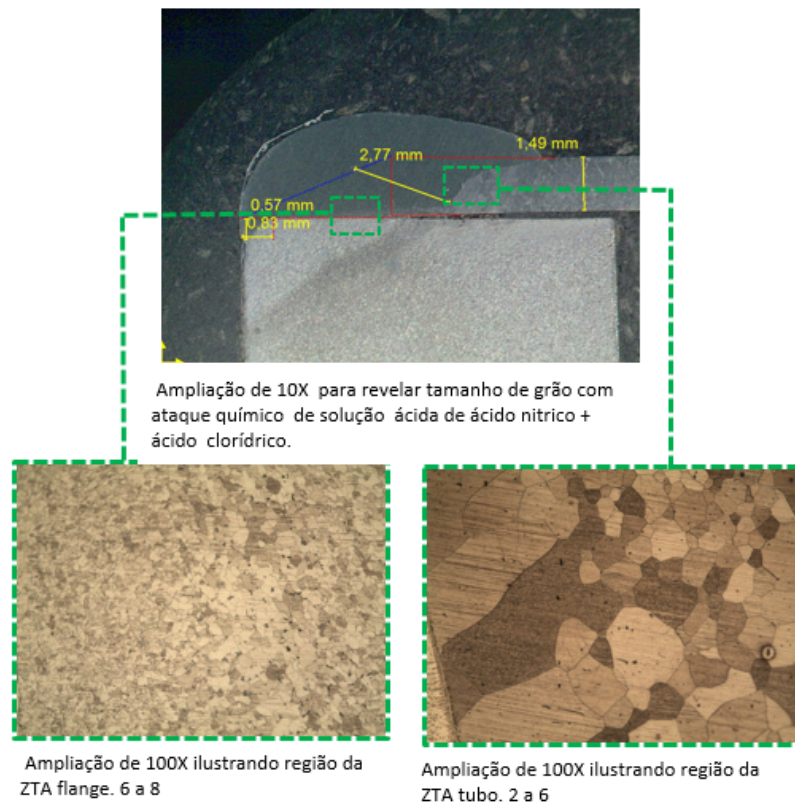


Figura 39 - Tamanho de grão 15.

Conforme quadro 16, os resultados obtidos da penetração da solda não atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 16 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g ≥	1.043	2.77	OK
	Flange b ≥	1.341	0.83	NOK
	Penetração Flange ≥	0.149	0.57	OK
	Diâmetro do poro ≤ 0,5	0.5	0	OK

Tabela 18 - Diluição Amostra 1H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido

Área Total Solda (mm2)	Área Diluição Tubo (mm2)	Área Diluição Flange (mm2)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
22.958	2.527	6.713	10.997	7.496

4.1.16 Amostra 2H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido.

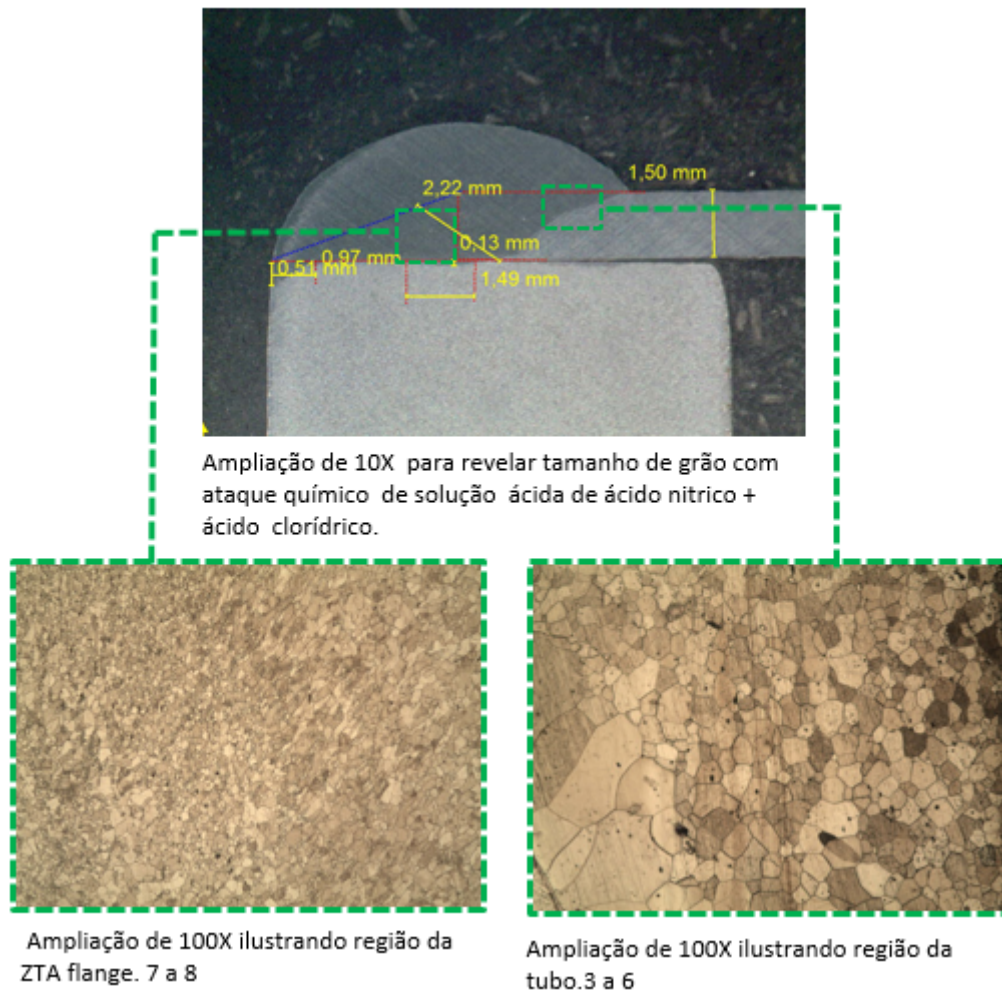


Figura 40 - Tamanho de grão 16.

Conforme quadro 17, os resultados obtidos da penetração da solda não atenderam o especificado pela norma de uma grande montadora de veículos nacional.

Quadro 17 - Penetração de Solda.

Teste	Especificado (mm)		Status (mm)	
Penetração de Solda	g $\geq$	1.05	2.22	OK
	Flange b $\geq$	1.35	1.49	OK
	Penetração Flange $\geq$	0.15	0.13	NOK
	Diâmetro do poro $\leq 0,5$	0.5	0	OK

Tabela 19 - Diluição Amostra 2H - Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido

Área Total Solda (mm ²)	Área Diluição Tubo (mm ²)	Área Diluição Flange (mm ²)	% Diluição Flange	% Diluição Tubo
18.890	2.034	2.002	1.724	8.917

Os resultados obtidos na avaliação de penetração da solda, para os corpos de prova produzidos com o arame tubular, atenderam o especificado pela norma da montadora parceira do trabalho. A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos e os limites considerados aceitáveis pela montadora, tais valores foram obtidos pela análise de imagem das micrografias, conforme ilustrado na Figura 40.

Tabela 20 - Resultados obtidos da avaliação na penetração da solda empregando consumível de arame tubular e comparação com os limites de montadora parceira deste trabalho

	Limites aceitáveis (ref. Montadora)	Tubo 409 Arame Tubular (mm)	Tubo 409 Arame Tubular (mm)	Tubo 439 Arame Tubular (mm)	Tubo 439 Arame Tubular (mm)
Garganta $\geq$	1,04	3,58	3,45	3,58	3,79
Flange $\geq$	1,34	5,16	4,72	3,71	4,66
Tubo $\geq$	1,34	4,79	4,10	5,94	4,51
Penetração Flange $\geq$	0,15	0,35	1,05	1,21	2,08
Penetração Tubo $\geq$	0,15	0,17	1,22	1,52	0,64

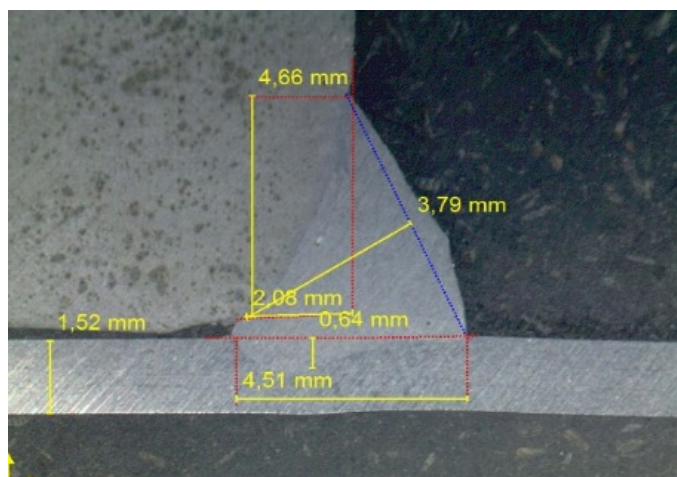


Figura 41 - Exemplo da área solda entre o tubo e o flange de um dos conjuntos de testes estudados, bem como seus respectivos resultados de penetração de solda

Por outro lado, os resultados da avaliação de penetração da solda para os corpos de prova produzidos com o arame sólido, tiveram todas as suas amostras rejeitadas, devido ao não atendimento de algum dos parâmetros de penetração, conforme apresentado pela Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados obtidos da avaliação na penetração da solda empregando consumível de arame sólido e comparação com os limites de montadora parceira deste trabalho

	Limites aceitáveis (ref. Montadora)	Tubo 409 Arame Sólido (mm)	Tubo 409 Arame Sólido (mm)	Tubo 439 Arame Sólido (mm)	Tubo 439 Arame Sólido (mm)
Garganta $\geq$	1,04	4,50	4,50	3,47	3,58
Flange $\geq$	1,33	1,27	1,41	2,93	4,36
Tubo $\geq$	1,33	1,45	0,00	0,00	0,00
Penetração Flange $\geq$	0,15	0,29	0,32	0,29	0,40
Penetração Tubo $\geq$	0,15	0,12	0,00	0,00	0,00

4.2 Ensaio de Fadiga

4.2.1 Solda Externa

A Tabela 22 apresenta, para os conjuntos testados (vide Fig. 14) constituídos de tubo de aço inoxidável 409 e 439, uma comparação entre o número de ciclos totais obtidos em condições de fadiga, quanto tais conjuntos foram soldados com arame tubular e arame sólido. Neste caso, verificou-se uma tendência similar à verificado na caracterização da penetração. A utilização do arame tubular levou a um incremento

médio de longevidade (resistência) à fadiga em torno de 110%, ou seja, duplicando a longevidade do componente, em relação ao desempenho obtido para o arame sólido.

Tabela 22 - Número máximo de ciclos em fadiga obtidos para os conjuntos testados (vide Fig. 14) constituídos de tubos de aço inoxidável 409 e 439 com flange de aço carbono AISI 1018.

Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame		Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame	
		Sólido	Tubular			Sólido	Tubo 439
1	AISI 409	92.284	148.031	5	AISI 439	71.683	148.372
2		100.335	189.325	6		108.445	271.799
3		42.883	112.621	7		108.088	209.488
4		53.956	149.767	8		74.889	132.201
Média		72.365	149.936	Média		90.779	190.465
Desvio		28.209	31.345	Desvio		20.239	63.623

4.2.2 Solda Interna

Os resultados obtidos com a utilização do arame sólido através do processo de soldagem interno, foram superiores aos do arame tubular. Um fato relevante foram os resultados obtidos utilizando o aço inoxidável 409, o qual obteve excelente resultado utilizando o arame sólido. A tabela 23 Ensaio Fadiga apresentam os resultados de cada amostra.

Tabela 23 – Número máximo de ciclos em fadiga obtidos para os conjuntos testados (vide Fig. 14) constituídos de tubos de aço inoxidável 409 e 439 com flange de aço carbono AISI 1018.

Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame		Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame	
		Sólido	Tubular			Sólido	Tubo 439
9	AISI 409	480.415	89.055	13	AISI 439	160.551	104.818
10		629.109	140.564	14		173.782	115.723
11		549.397	214.876	15		220.795	167.927
12		638.101	190.840	16		112.241	138.922
Média		574.256	158.834	Média		166.842	131.848
Desvio		74.183	55.881	Desvio		44.647	27.943

4.3 Ensaio de Fadiga após realizar o ensaio de fadiga térmica

4.3.1 Solda Externa

Os resultados dos ensaios de fadiga, após a realização dos 200 ciclos de fadiga (vide Figura 21), estão apresentados na Tabela 24. Os dados apontam para uma perda de longevidade média de 15% (de 125 para 106 mil ciclos), além de uma maior dispersão 54% maior (de 36 para 55 mil ciclos) em comparação com os resultados obtidos no teste de fadiga aplicado nos corpos de prova sem a ciclagem térmica. O destaque foi para os conjuntos de aço inoxidável AISI 409 que apresentou uma diferença de quase 200% entre os resultados obtidos nos conjuntos fabricados com arame sólido (54 mil ciclos) em relação aos fabricados com arame tubular (150 mil ciclos).

Tabela 24 - Número máximo de ciclos em fadiga obtidos, após a execução de 200 ciclos de carregamentos térmicos (vide Gráfico 1), para os conjuntos testados (vide Fig. 14) constituídos de tubos de aço inoxidável 409 e 439 com flange de aço carbono AISI 1018.

Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame		Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame	
		Sólido	Tubular			Sólido	Tubo 439
1	AISI 409	35.068	163.231	5	AISI 439	52.797	109.597
2		34.735	122.979	6		92.271	280.182
3		115.008	213.489	7		130.248	77.034
4		30.391	99.552	8		50.566	100.290
Média		53.801	149.813	Média		81.471	141.776
Desvio		40.861	49.936	Desvio		37.741	93.282

Os resultados obtidos e apresentados na Tabela 21 e Tabela 24 estão apresentados nos gráficos de distribuição de probabilidades da Figura 42. Pode-se observar as tendências descritas anteriormente, especialmente a maior dispersão obtida nos dados após a submissão dos conjuntos de teste aos 200 ciclos de fadiga térmica.

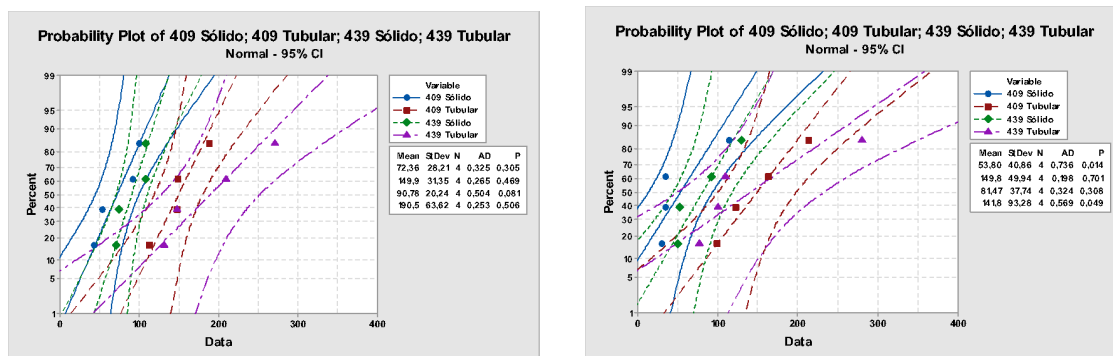


Figura 42 - Gráficos de probabilidade com os dados obtidos dos ensaios de fadiga (número de ciclos antes da falha). À esquerda: resultados obtidos sem submissão dos conjuntos testados à fadiga térmica. À direita: resultados obtidos após fadiga térmica.

4.3.2 Solda Interna

Foi observado nos resultados dos ensaios de fadiga após a realização do ensaio de fadiga térmica (200 ciclos) nas peças soldadas na parte interna que, os dados apontam para uma perda de longevidade média de 59% (de 256 para 127 mil ciclos), em comparação com os resultados obtidos no teste de fadiga aplicado nos corpos de prova sem a ciclagem térmica. O destaque foi para os conjuntos de aço inoxidável AISI 439 que apresentou uma diferença de quase 100% entre os resultados obtidos nos conjuntos fabricados com arame sólido (220 mil ciclos) em relação aos fabricados com arame tubular (107 mil ciclos). Outro ponto a salientar foi o comportamento do arame sólido, o qual foi superior ao do arame tubular. A tabela 25 apresenta os resultados de cada amostra.

Tabela 25 – Número máximo de ciclos em fadiga obtidos, após a execução de 200 ciclos de carregamentos térmicos (vide Gráfico 1), para os conjuntos testados (vide Fig. 14) constituídos de tubos de aço inoxidável 409 e 439 com flange de aço carbono AISI 1018.

Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame		Amostra	Aço do tubo	Número de ciclos obtidos com arame	
		Sólido	Tubular			Sólido	Tubo 439
1	AISI 409	113.018	109.456	5	AISI 439	224.123	66.894
2		151.327	81.345	6		246.941	120.389
3		199.373	91494	7		201.040	160.922
4		121.896	188.872	8		208.963	82.243
Média		146.404	117.792	Média		220.267	107.612
Desvio		39.924	48.791	Desvio		20.198	42.058

4.4 Ensaio de Líquido Penetrante

Todas as amostras foram aprovadas no ensaio de líquido penetrante, dado o fato que não foram encontrados defeitos na superfície dos corpos de prova.



Figura 43 - Ensaio de Líquido Penetrante.

4.5 Ensaio de Sensitização

4.5.1 Amostra Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular.

Conforme observado na figura 44, não foi identificada corrosão intergranular na amostra soldada internamente com tubo inoxidável 409 e arame tubular. Por outro lado pode-se identificar a trinca na raiz da solda.

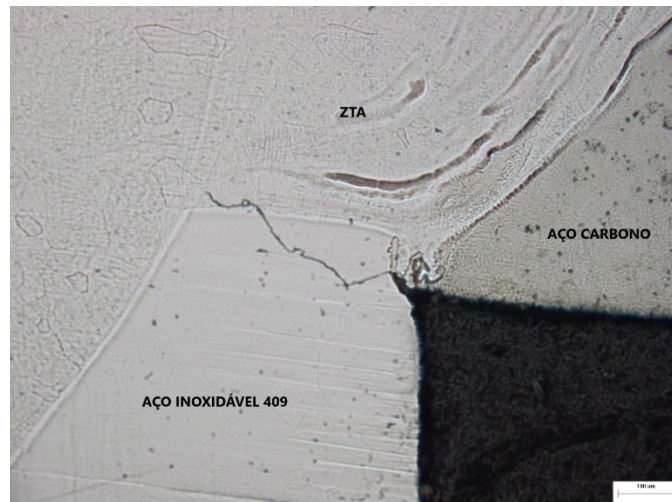


Figura 44 - Amostra Solda Interna, Tubo 409 e Arame Tubular.

4.5.2 Amostra Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular.

Na figura 45 pode ser observado que não foi identificada corrosão intergranular na amostra soldada externamente com tubo inoxidável 409 e arame tubular.

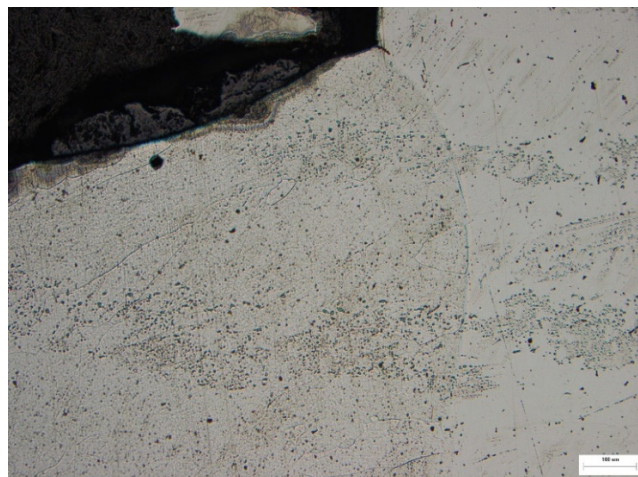


Figura 45 - Amostra Solda Externa, Tubo 409 e Arame Tubular.

4.5.3 Amostra Solda Interna, Tubo 439 e Arame Tubular.

Conforme observado na figura 46, foi identificada corrosão intergranular na amostra soldada internamente com tubo inoxidável 439 e arame tubular.

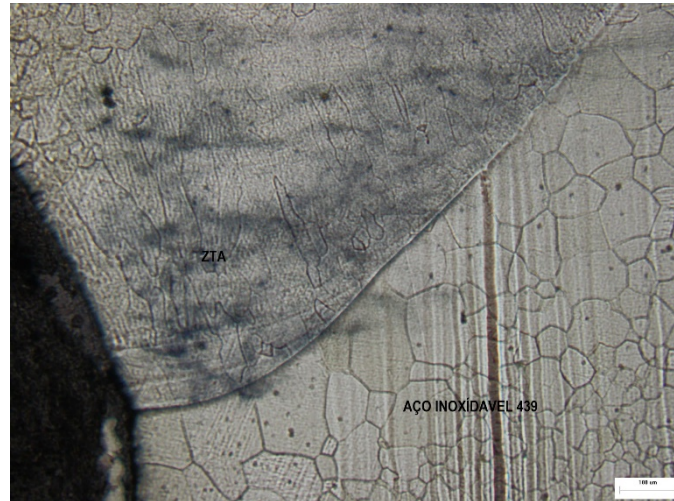


Figura 46 - Amostra Solda Interna, Tubo 439 e Arame Tubular.

4.5.4 Amostra Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido.

Na figura 47 não foi identificada corrosão intergranular na amostra soldada internamente com tubo inoxidável 409 e arame sólido.

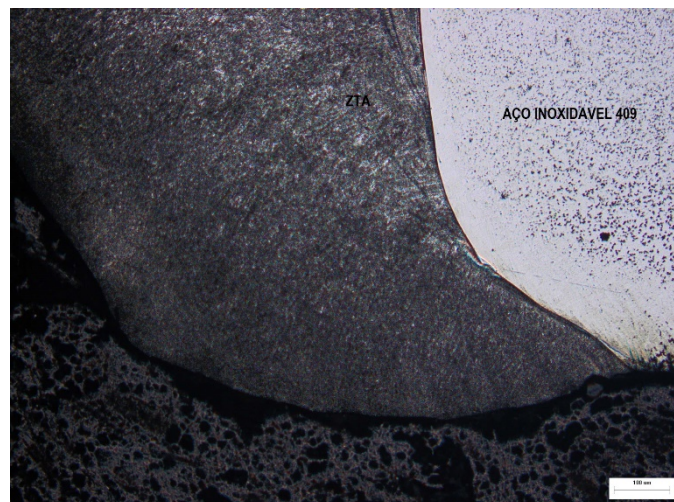


Figura 47 - Amostra Solda Interna, Tubo 409 e Arame Sólido.

4.5.5 Amostra Solda Externa, Tubo 409 e Arame Sólido.

Conforme observado na figura 48, não foi identificada corrosão intergranular na amostra soldada externamente com tubo inoxidável 409 e arame sólido.

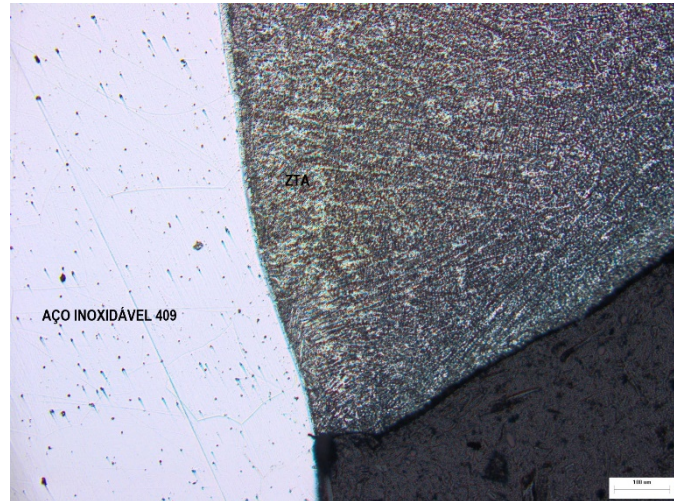


Figura 48 - Amostra Solda Externa, Tubo 409 e Arame Sólido.

4.5.6 Amostra Solda Externa, Tubo 439 e Arame Sólido.

Na figura 49 foi identificada corrosão intergranular na amostra soldada externamente com tubo inoxidável 439 e arame sólido. Adicionalmente, ficou evidente a trinca no pé da solda.

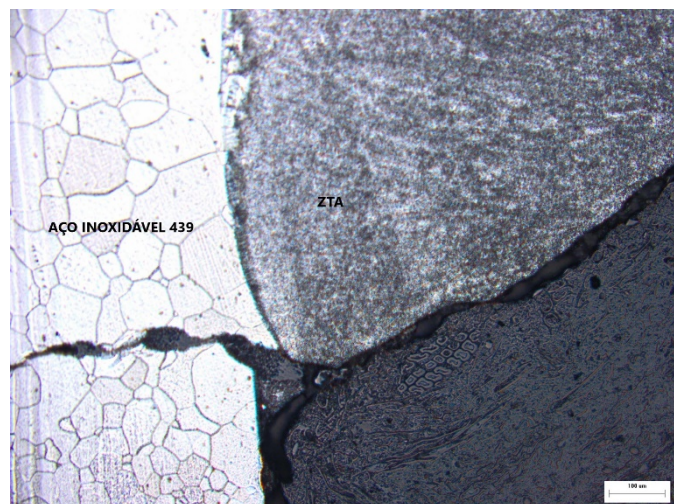


Figura 49 - Amostra Solda Externa, Tubo 439 e Arame Sólido.

4.5.7 Amostra Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido.

Foi identificado na figura 50 a corrosão intergranular na amostra soldada internamente com tubo inoxidável 439 e arame sólido.

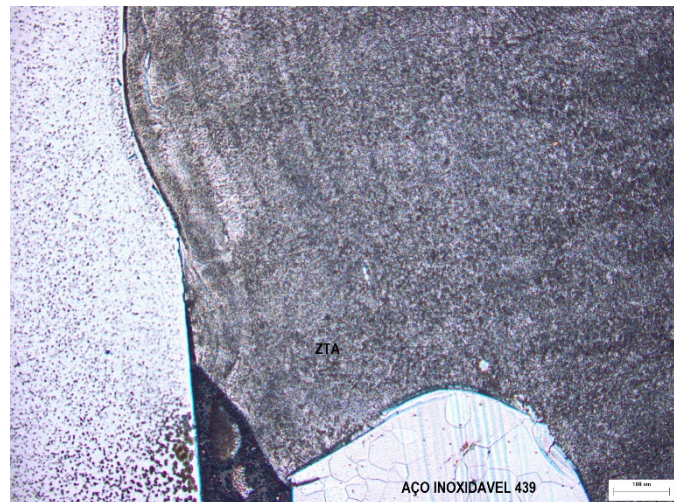


Figura 50 - Amostra Solda Interna, Tubo 439 e Arame Sólido.

4.5.8 Amostra Solda Externa, Tubo 439 e Arame Tubular.

A corrosão intergranular foi identificada na amostra soldada externamente com tubo inoxidável 439 e arame tubular, conforme observado na figura 51. Inclusive pode-se identificar uma pequena trinca no pé da solda.

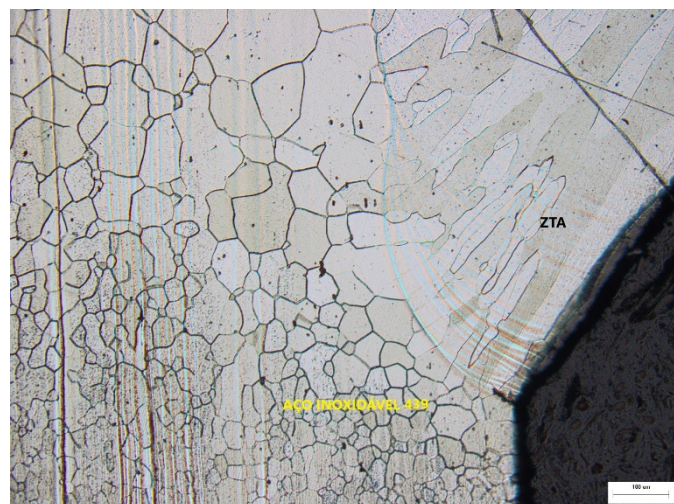


Figura 51 - Amostra Solda Externa, Tubo 439 e Arame Tubular.

4.6 Ensaio de Microdureza

Os resultados obtidos no ensaio de microdureza, realizado nas amostras com o arame de solda tubular, identificam que não tiveram alterações significantes nas

propriedades dos tubos, seja ele um aço inoxidável 409 ou aço inoxidável 439. As figuras 52 e 53 apresentam o detalhamento do comportamento em cada amostra.

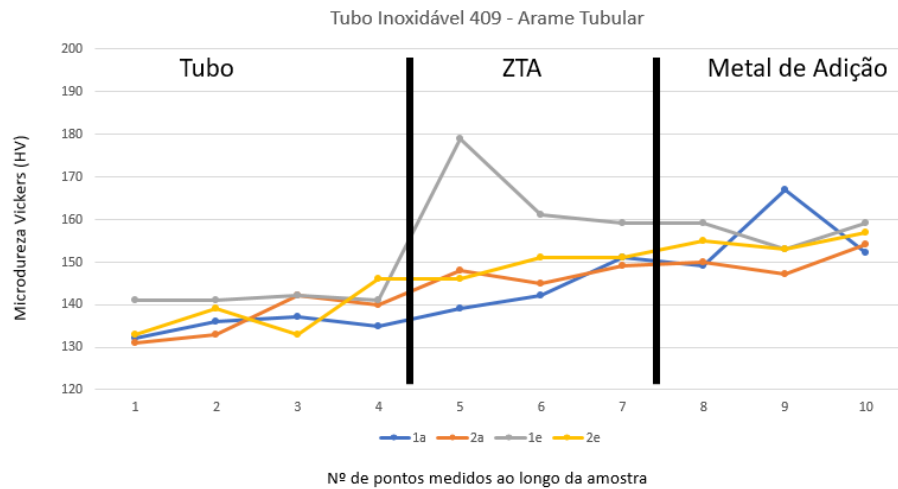


Figura 52 – Amostra de Tubo inoxidável 409 com a utilização de arame tubular.

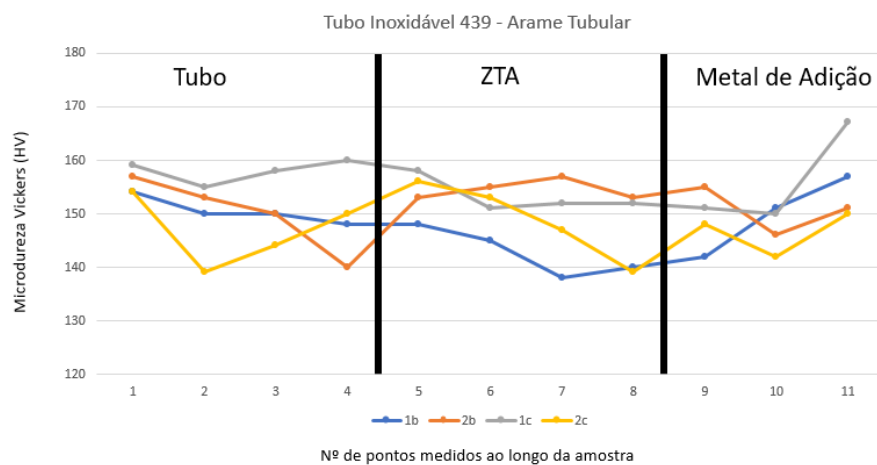


Figura 53 – Amostra de Tubo inoxidável 439 com a utilização de arame tubular.

Por outro lado, ao utilizar o arame de solda sólido como metal de adição, os foram obtidos resultados que impactaram diretamente as propriedades do material, conforme pode ser observado nas figuras 54 e 55.

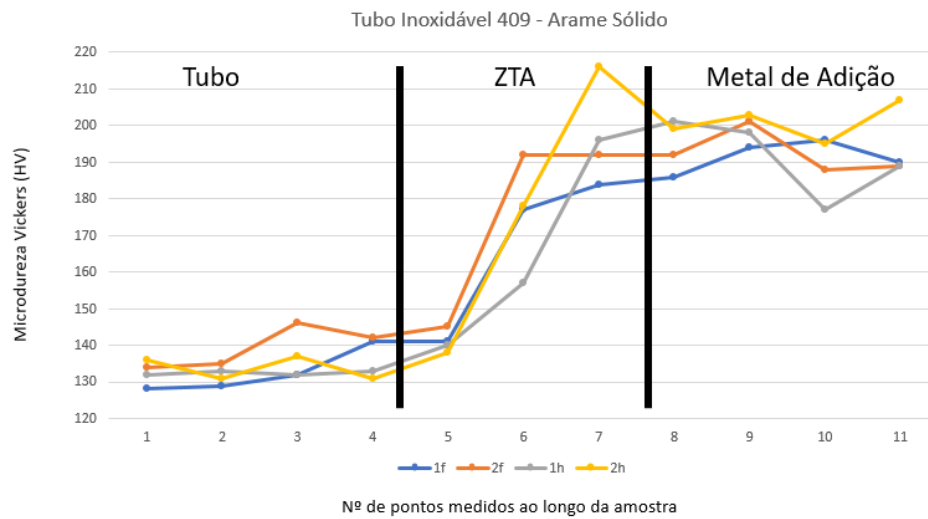


Figura 54 – Amostra de Tubo inoxidável 409 com a utilização de arame sólido.

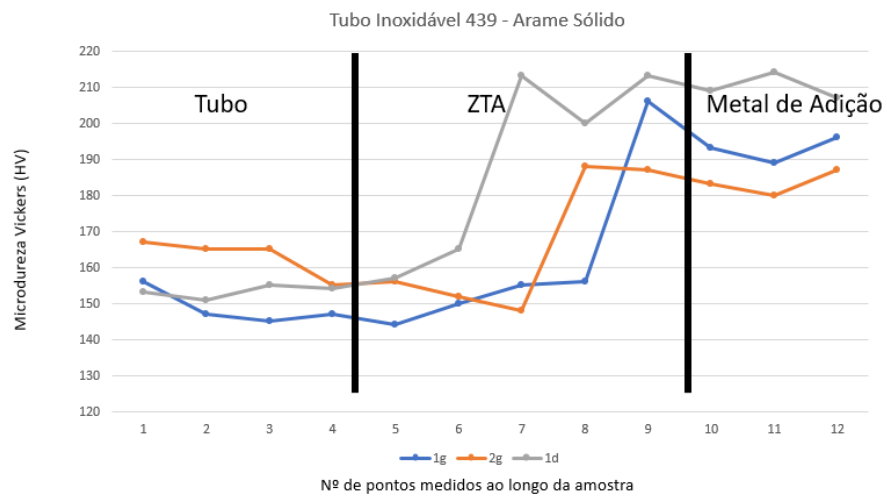


Figura 55 – Amostra de Tubo inoxidável 439 com a utilização de arame sólido.

5 DISCUSSÃO

A tecnologia da soldagem vem evoluindo de maneira em que os processos e metais de adição estão se tornando cada vez mais adequados e produtivos. Neste caso, o arame tubular AISI 439Ti apresenta características metalúrgicas e processuais bastante vantajosas e bem reconhecidas na literatura (GONÇALVES, 2016). Tais características foram observadas neste trabalho. Além disso, outro fator vantajoso, que não citado anteriormente, foi a velocidade de soldagem de consumível que é mais rápida em comparação com o arame sólido.

A posição do sistema de exaustão expõe suas partes a frequentes vibrações e batidas que exigem que os materiais usados no processamento das peças sejam rígidos e flexíveis (ANIEKAN, 2016).

A literatura (ANIEKAN, 2016), aponta que, em condições normais de operação do escapamento, as amostras soldadas externamente com tubo de aço inoxidável AISI 409 utilizando o metal de adição arame tubular, apresentaram melhores resultados em relação a fadiga quando comparado com as outras condições de soldagem, seja elas, tubo de aço inoxidável AISI 409 e metal de adição arame sólido, tubo de aço inoxidável AISI 439 e metal de adição arame sólido, tubo de aço inoxidável AISI 439 e metal de adição arame tubular. Vale salientar que, é uma prática da indústria automobilística a utilização da solda externa.

Os melhores resultados utilizando o arame tubular AISI 439Ti, justifica-se, pois conforme RABBI, 2009, o elemento titânio no aço AISI 439Ti promove refino de grão, o que ajuda no ganho de tenacidade e especialmente na maior resistência à iniciação de trincas (iniciação) de fadiga. Além disso, o uso do arame tubular evita os respingos na região da solda, que são ponto notórios de iniciação de trincas por fadiga, que leva ao material a apresentar menor vida em fadiga.

Ademais, SILVA (2018) argumenta que, com a ausência do elemento níquel e manganês, em relação ao consumível sólido, permite ao material entrar menos no campo austenítico, evitando a formação de microestruturas indesejáveis durante o processo de soldagem, destacando-se para a possibilidade de geração de fases martensítica frágeis nos contornos de grão austeníticos remanescentes durante o resfriamento rápido da junta soldada. Esses mesmos resultados foram identificados neste estudo.

Outro a se destacar, de acordo com ESAB (2018) é que a utilização do metal

de adição AISI 439Ti é que o mesmo produz baixíssimo nível de respingos e se adapta bem a juntas com gaps pronunciados devido a geometria do cordão de solda. Tais características podem ser observadas na figura 56.



Figura 56 – Junta soldada com arame tubular AISI 439Ti.

Por outro lado, ao avaliar a condição de soldagem interna, considerando a combinação da amostra soldada com tubo de aço inoxidável AISI 409 e metal de adição arame sólido, obtivemos melhores resultados quando comparados com as outras condições de soldagem.

Não foram encontrados estudos que avaliaram a condição de soldagem interna, tal qual foi avaliada como uma das opções utilizadas neste trabalho.

A Tabela 26 apresenta os dados compilados dos resultados dos ensaios de fadiga, apresentados nas Tabelas 22 a 25. As variáveis empregadas foram substituídas por valores discretos, cada qual representando o peso de importância da contribuição destes parâmetros nos resultados obtidos. Após esta substituição, foram avaliados os resultados da soma da contribuição destas variáveis discretas em relação ao resultado das vidas em fadiga obtidos dos resultados dos ensaios realizados.

Tabela 26 – Resultados gerais compilados a partir dos dados obtidos dos ensaios de fadiga.

Posição solda	Aço	Consumível	Fadiga térmica	Média do Nº ciclos (mil)	Desvio do Nº ciclos (mil)	Coef. Variação
Externa	409	Sólido	Sim	53,8	40,86	76%
			Não	72,36	28,21	39%
	409	Tubular	Sim	149,8	49,94	33%
			Não	149,9	31,35	21%
	439	Sólido	Sim	81,47	37,74	46%
			Não	90,78	20,24	22%
Interna	409	Tubular	Sim	141,8	93,28	66%
			Não	190,5	63,62	33%
	409	Sólido	Sim	146,3	38,72	26%
			Não	574	74,35	13%
	409	Tubular	Sim	117,5	49,05	42%
			Não	159	55,93	35%
	439	Sólido	Sim	220,3	20,22	9%
			Não	167	44,82	27%
	439	Tubular	Sim	107,5	42,07	39%
			Não	132	27,87	21%

Obs.: Valores em vermelho considerados *outliers*.

Com isso, buscou-se a melhor combinação de resultados que levasse a uma regressão matemática com o maior coeficiente de determinação (R^2) entre a soma da participação destas variáveis e o resultado final obtido. O resultado obtido está apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Pesos atribuídos para as variáveis avaliadas nos ensaios de fadiga.

Posição de soldagem		Tipo de consumível		Tipo de aço (AISI)		Realização de Fadiga Térmica	
Variável	Peso	Variável	Peso	Variável	Peso	Variável	Peso
Externa	2	Sólido	1	409	1	Sim	1
Interna	4	Tubular	2	439	2	Não	2

A Tabela 28 e o gráfico da Figura 56 apresentam os resultados obtidos da correlação entre as variáveis discretas, representando os fatores de peso das variáveis empregadas nos ensaios de fadiga. Nesta avaliação, foram considerados dois dados como *outliers*, entre os resultados obtidos, conforme indicados tanto na Tabela 28, quanto no gráfico da Figura 57. A ocorrência de tais *outliers* é devido a passíveis erros humanos cometidos ao medir ou ao registrar os dados.

Tabela 28 – Melhor associação entre fatores de peso atribuídos às variáveis empregadas e os resultados obtidos dos ensaios de fadiga ($R^2 = 0,9134$).

Posição solda	Aço	Consumível	Fadiga térmica	Combinação das variáveis	Média do Nº ciclos (mil)	Coef. Variação
2	1	1	1	5	53,8	76%
		2	2	6	72,36	39%
			1	6	149,8	33%
			2	8	149,9	21%
			1	6	81,47	46%
	2	1	2	7	90,78	22%
		2	1	7	141,8	66%
			2	7	190,5	33%
			1	7	146,3	26%
			2	8	574	13%
4	1	2	1	8	117,5	42%
		2	2	10	159	35%
			1	8	220,3	9%
	2	1	2	9	167	27%
		2	1	9	107,5	39%
			2	10	132	21%
			2	10	132	21%

Obs.: Valores em vermelho considerados *outliers*.

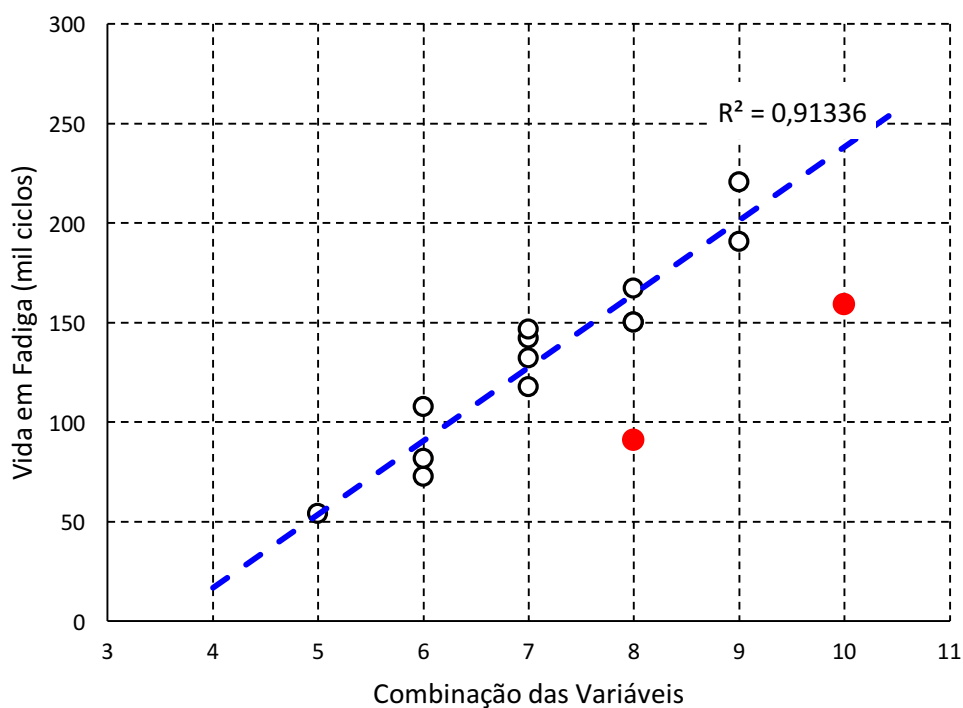


Figura 57 – Avaliação integrada dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga, considerando cada uma das variáveis associada com um fator de peso (1, 2 ou 4).

Os dados apresentados na Tabela 27 indicam a relevância da posição de soldagem em relação às demais variáveis, especialmente na soldagem interna. Apesar desta última posição não ser adotada como prática no setor, foi a que apresentou melhores resultados. Quanto às demais variáveis, os pesos maiores (dois) para os parâmetros consumível tubular, aço AISI 439 e não submissão à fadiga térmica indicam que esta é a melhor combinação de condições. Por outro lado, com pesos menores (um), estão o uso de consumível sólido, aço AISI 409 e ocorrência de fadiga térmica.

Fadiga térmica

Após a realização dos ensaios de fadiga térmica, conclui-se que a junta soldada externamente com tubo de aço inoxidável AISI 409 utilizando o arame tubular como metal de adição, apresentaram melhores resultados e justificam a sua respectiva utilização pelos fabricantes de escapamento. Dado o fato de terem sido ensaiados em condições similares a condições de uso dos escapamentos. Adicionalmente, como é de conhecimento de mercado, o aço inoxidável AISI 409 apresenta valores inferiores aos do aço inoxidável AISI 439.

Microdureza

Após analisar os resultados de dureza na ZTA, região onde se apresentaram as trincas das juntas soldadas, tanto nas amostras soldadas utilizando o metal de adição arame sólido e arame tubular, não foi detectado variações que pudessem indicar uma menor resistência a fadiga nesta região. No entanto, nas análises dimensionais dos cordões de solda, foi verificado a menor penetração na junta soldada nas amostras que utilizaram o arame sólido como metal de adição. Considerando assim a causa de possíveis redução de resistência a fadiga nesta região.

Não foram encontrados estudos que avaliaram a microdureza dos materiais utilizados neste trabalho.

Corrosão

A corrosão intergranular se dá na utilização nos dois metais de adição (arame tubular e sólido). Inclusive, independente do arame tubular ter um aporte menor de calor quando utilizado em um processo de soldagem, mesmo assim apresentou-se a sensitização nas amostras analisadas. Dado o fato que o estabilizador (Titânio) é igual para os aços inoxidáveis AISI 409 e 439, esse deve ser fator principal da sensitização na ZTA. A solda influencia muito mais o aço inoxidável AISI 439 do que o aço inoxidável AISI 409, dado o fato que o % de Carbono e Cromo é superior no aço inoxidável AISI 439. Vale salientar que se avaliarmos apenas as propriedades do tubo, naturalmente o aço inoxidável AISI 439 se comportará melhor, porém faz-se necessário a avaliação da junta soldada porque a aplicação do escapamento necessita de juntas soldadas.

O aço inoxidável AISI 439 mesmo sendo um aço mais nobre e que possui características superiores ao aço inoxidável AISI 409, quando numa união soldada, independente do arame de solda utilizado, apresentou corrosão intergranular na ZTA do tubo em todas as amostras avaliadas. Por consequência este (ZTA) foi o local onde foram identificadas as falhas de fadiga.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com o estudo de LAKSHMINARAYANAN (2012), que identificou que a exposição à temperatura faixa entre 500°C e 900°C leva à precipitação de carbonetos ricos em Cr diretamente associados à sensibilização em aços inoxidáveis. Desde a formação de carbonetos ricos em Cr acompanha a difusão de átomos de Cr para os limites de grãos, o menor tempo de exposição às temperaturas de sensibilização reduz a quantidade de carbonetos ricos em Cr formados os limites dos grãos.

Adicionalmente, os resultados obtidos por KOTECKI (2003) também foram identificados neste estudo (conforme figura 58), ou seja, como a maior parte do carbono é encontrada perto dos limites de grão, a formação de carboneto de cromo remove um pouco de cromo da solução perto dos limites do grão, reduzindo assim a resistência à corrosão dessas áreas locais.

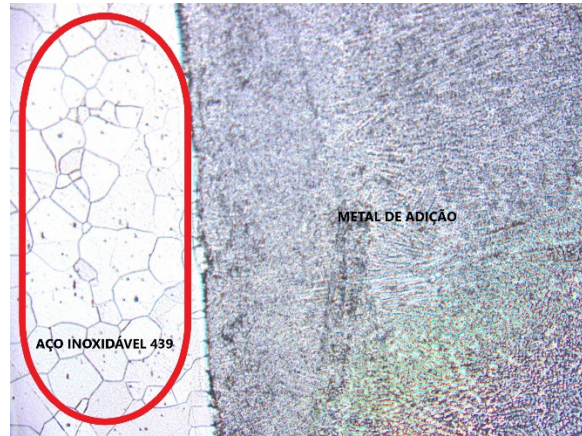


Figura 58 – Corrosão intergranular.

MODENESI (2001) destaca que o aço inoxidável AISI 409, em geral, pode ser soldado de maneira a se obter propriedades adequadas. Por outro lado, os aços AISI 430, 442 e 446 (com teores de cromo mais elevados) apresentam maior sensibilidade a problemas de fragilização durante a soldagem, por consequência a incidência de corrosão intergranular. Tais afirmações foram identificadas neste estudo, como podemos observar nas figuras 46, 49, 50 e 51, onde os corpos de prova foram produzidos com de aço inoxidável 439 e todos apresentaram corrosão intergranular.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram a maior eficiência do tubo de aço inoxidável AISI 409 comparado ao tubo de aço inoxidável 439 em todas as condições de uso avaliadas. Em relação a utilização dos metais de adição, foram obtidos resultados distintos entre a soldagem interna e soldagem externa.

Em todos os ensaios realizados com as amostras soldadas externamente, o arame tubular apresentou um comportamento superior ao do arame sólido, justificando sua utilização como melhor opção para metal de adição. Vale salientar que as juntas obtidas com o arame tubular apresentaram uma durabilidade maior que a junta de arame sólido, tanto na avaliação de fadiga, como na fadiga térmica. Outro benefício apresentado pela utilização do arame tubular, foi a velocidade de operação, sendo aproximadamente cerca de 60% superior em relação ao arame sólido.

Por outro lado, os resultados obtidos nos ensaios realizados com as amostras soldadas internamente, foram opostos às amostras soldadas externamente. Isto é, o arame sólido apresentou um comportamento melhor nos testes de fadiga e fadiga térmica, justificando sua utilização como melhor opção para metal de adição. Porém conforme informado previamente, tal geometria de soldagem não é praticada industrialmente, dado o fato que O método de soldagem externa é a prática mais utilizada pela indústria automobilística de soldagem de tudo de aço inoxidável e flange.

Com isso, a recomendação final desse estudo, para as empresas do setor automotivo, que utilizam os materiais avaliados, é que as mesmas utilizem a combinação do tubo de aço inoxidável 409 com o metal de adição arame tubular soldados externamente, como melhor opção de combinação na produção de escapamentos de veículos leves.

6.1 Trabalhos futuros

A literatura a respeito da soldagem de tubulações para sistema de escapamento poderá ser enriquecida através de alguns desenvolvimentos aqui sugeridos. Considerar diferentes diâmetros, bem como, diferentes espessuras de tubos para avaliar a aplicação de diferentes metais de adição pode colaborar diretamente para estender essa pesquisa para avaliação de veículos de grande porte.

A análise do estado e distribuição de tensões nos conjuntos de testes empregados durante os ensaios empregados, são oportunidades que podem contribuir para expandir o conhecimento desses materiais.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam vantagens técnicas no uso de arames tubulares, que possuem, entretanto, um custo mais elevado. Porém há um potencial ganho em produtividade também associado que pode compensar o custo adicional deste consumível. Portanto, a avaliação integrada do benefício financeiro, considerando os custos diretos na aquisição do consumível, dos equipamentos e sua manutenção associados ao ganho de produtividade torna-se uma excelente oportunidade para o desenvolvimento de estudos futuros.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANIEKAN, E. I.; EJIROGHENE, K. O; GOBIR, A. **Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software**. International Journal of Engineering Technologies – IJET. pág 50–60. junho de 2016.
- ASKELAND, D. R. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- ASTM A370-11a, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.
- ASTM A763-14, Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Ferritic Stainless Steels, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016
- CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. Arcelor Mittal Inox Brasil. 2008
- CESAR NETO, B. V. **Comparação de junta soldada aço carbono/ aço inox utilizando como metal de adição aço carbono e aço inox**. São Paulo, UNESP (2015). 67 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, 2015. Site: <http://hdl.handle.net/11449/124222> acesso: 12/09/2017.
- CHIU, H. **Creep Behavior of 409L and 436 Ferritic Stainless Steels Applied for Automotive Exhaust System**. Mechanics and Materials, v. 302. pág 252-257. fevereiro de 2013.
- CRESPO, A. A.; **Estatística fácil**. 19ª ed. Atual – São Paulo: Saraiva, 2009
- CUNHA, H. M. **Caracterização de juntas soldadas de aços carbono inoxidáveis utilizando arame AWS E309L T1-1**. Ilha Solteira, UNESP (2016). 122 p. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado – Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista
- ESAB – **Catálogo de Produtos ESAB Segmento Transporte**. Site: <http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-automotivo-preview.pdf> acesso: 20/10/2018
- EWM - **Manual Metais de Adição de Solda**. 4ª ed. 2015. Site: https://www.ewm-group.com/downloads/262168/WM_0924_22_PB.PDF . acessado em 02/04/2018
- FERREIRA, F. L. T. **Breve Histórico da Soldagem**. In: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Soldagem. São Paulo: SENAI-SP, pág 14-21. 2013
- FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JR, J. A. **Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial**. Opin. Publica vol.16 no.1 Campinas June 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-62762010000100007>
- GONÇALVES, G. F. **Análise da sensibilidade de juntas soldadas em aço inoxidável**

ferrítico com solda de arame tubular monoestabilizado e biestabilizado ao nióbio e titânio. Trabalho de IC - Engenharia Mecânica – Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2016.

KIM J. K.; et al. **Intergranular corrosion of Ti-stabilized 11 wt% Cr ferritic stainless steel for automotive exhaust systems.** Corrosion Science. Elsevier. pág 2716-2723. julho de 2009

KHORRAMI, M. S.; et al. **Study on Microstructure and Mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints.** Materials Science & Engineering. Iran: Elsevier. pág 35–45. abril de 2014

KOTECKI, D; ARMAO, F; **Stainless Steel: Welding Guide.** The Lincoln Electric Company. 2003

LAKSHMINARAYANAN, A. K.; BALASUBRAMANIAN, V. **Sensitization resistance of friction stir welded AISI 409 M grade ferritic stainless steel joints.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology. pág. 961–967. 2012

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada.** São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia.** 4. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B.; **Metalurgia da Soldagem.** Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MODENESI P. **Soldagem I - Descontinuidades e Inspeção em juntas soldadas** - Belo Horizonte: UFMG, 2001.

MORAIS, W.A.; SAMPAIO, G.G. **Adequação do Processo de Fabricação de Juntas Aluminotérmicas para Trilhos Ferroviários** – Revisão. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 70º Congresso da ABM; 2015; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2015

MORGANTI, M. P. S.; **Estudo da influência do espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame 1,2mm.** São Caetano do Sul. Trabalho de conclusão de curso (Especialização – Engenharia de Soldagem). p 54. Escola de Engenharia Mauá, 2013.

BERG, A. E.; SIKSTROM, F.; **Barriers for industrial implementation of in-process monitoring of weld penetration for quality control.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 91. 2017

OLIVEIRA, L. A.; CORREA, E. O.; VALERIANO, L. C.; et al. **Susceptibilidade à Corrosão sob Tensão da junta Dissimilar de Aço Inoxidável AISI 310 e Aço Inoxidável Duplex 2304 com o Metal de Adição E309L.** 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, 2015.

RABBI, M.S.; **Fadiga dos Metais.** Módulo 4, Cap.2 p. 415-438. In: MORAIS, W.A.;

MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; Metalurgia física e mecânica aplicada. 2a Edição. São Paulo: ABM, 2009.

SANTACREU, P.; **Thermomechanical fatigue of stainless steels for automotive exhaust**. Revue de Métallurgie. pág 37 – 42. janeiro de 2006.

SILVA, F. J. G. **Tecnologia da Soldadura: Uma abordagem Técnico-didática**. Porto: Anduriña, 2014.

SILVA, F. L. **Comportamento em Corrosão Sob Tensão de uma Junta Soldada de Aço Inoxidável Ferrítico ABNT 439 Soldado com Adição de Aço Inoxidável Austenítico ABNT 309 em Meios Contendo Cloretos**. Minas Gerais: UFOP. 2017. 57 p. Tese (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Minas Gerais, 2017.

SILVA, F. S.; Castilho, J.; Moraes, W.; **A. Desempenho em fadiga de uma junta soldada dissimilar de aço carbono e aço inoxidável 409 obtida através de arame de solda tubular e sólido**. Unisanta Science and Technology. pág 14-17. julho de 2018.

SINGH, M. K.; **Application of Steel in Automotive Industry**. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. pág 246-253. julho de 2016.

SOUZA, G. R. P.; BARROS, J. R.; CRUZ, K. L.; et al; Análise do potencial uso do processo FCAW-S na soldagem de fundações profundas. 71º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 16º ENEMET. Rio de Janeiro. setembro de 2016.

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Soldagem**. São Paulo: SENAI-SP, 2013.

SWEENEY, D. J.; et al.; **Estatística aplicada à administração e economia**. 3ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016

ZANETIC, S. T.; ALONSO-FALLEIROS, N.; **Determinação do Grau de Sensitização de Aços Inoxidáveis Austeníticos pelo Método DL-EPR**. Site: https://www.researchgate.net/publication/268010575_DETERMINACAO_DO_GRAU_DE_SENSITIZACAO_DE_ACOS_INOXIDAVEIS_AUSTENITICOS_PELO_METODO_DL-EPR/related . acessado:03/04/2017.

YASIR, M.; et al.; **A New Testing Method for Lifetime Prediction of Automotive Exhaust Silencers**. International Journal of Corrosion. pág 1-5. março 2011.