



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO NOGUEIRA PALHA

**Inspeção de defeitos decorrentes do processo de soldagem em chapas de aço naval
utilizando tomografia gama**

Recife

2019

RODRIGO NOGUEIRA PALHA

**Inspeção de defeitos decorrentes do processo de soldagem em chapas de aço
naval utilizando tomografia gama**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanginetti Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

P153i	Palha, Rodrigo Nogueira. Inspeção de defeitos decorrentes do processo de soldagem em chapas de aço naval utilizando tomografia gama / Rodrigo Nogueira Palha - 2019. 100folhas, Abrev. e Sigla. Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanginetti Ferreira. Coorientador: Prof. Dr. Carlos Costa Dantas Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós- Graduação de Engenharia Mecânica, 2019. Inclui Referências e Anexos. 1. Engenharia Mecânica. 2. Ensaio não destrutivo. 3. Tomografia gama. 4. Descontinuidades. 5. Aço naval. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanginetti(Orientador). II. Dantas, Carlos Costa. (Coorientador). III. Título. UFPE 621 CDD (22. ed.) BCTG/2019-165
-------	--

RODRIGO NOGUEIRA PALHA

**INSPEÇÃO DE DESCONTINUIDADES DECORRENTES DO PROCESSO DE
SOLDAGEM EM CHAPAS DE AÇO NAVAL UTILIZANDO TOMOGRAFIA
GAMA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 25/02/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Cezar Henrique Gonzalez (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

Dedico esta tese à Família, Amigos e a Comunidade Científica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram, direta e indiretamente, para a conclusão deste trabalho, em particular:

Ao Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, pela orientação neste trabalho, pela competência, dedicação, pela paciência e compreensão.

Ao Prof. Dr. Carlos Costa Dantas do corpo docente do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, pela co-orientação pela oportunidade de participar do projeto de pesquisa no Laboratório de Fluidodinâmica e Testes Não Destrutivos disponibilizando o equipamento de Tomografia Computadorizada Gama do Departamento de Energia Nuclear da UFPE para realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Enivaldo Santos Barbosa pelo apoio e incentivo no decorrer do trabalho e instrução na operação do equipamento de tomografia.

Aos amigos em especial a Paternark, Julieta, Klebson, Victor Hugo, Rogério e Afrânio alunos e ex-alunos do laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica, do Laboratório de Fluidodinâmica e Testes Não Destrutivos do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, ao Prof. Dr. Tiago Rolim e os Técnicos Rubens e Janaina pela contínua ajuda, sugestões e suporte nos experimentos.

Aos meus pais, pelo crédito e incentivo depositado ao longo de toda minha vida.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior) pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa de estudo.

RESUMO

A soldagem é um processo de fabricação industrial que demanda inspeções detalhadas e precisas para detecção de descontinuidades cada vez menores, que não são detectadas pelas tradicionais técnicas de ensaios não destrutivos, como ultrassom e partículas magnéticas que detectam descontinuidades na ordem de milímetros e ensaio por líquidos penetrantes que apesar de revelar trincas com até 1 μm , está limitada apenas às localizadas superficialmente. Contribuindo para este seguimento, a tomografia gama foi utilizada neste trabalho para avaliação das descontinuidades recorrentes do processo de soldagem em chapas de aço naval. Neste estudo, foram produzidos sete corpos de prova em chapas de aço ASTM A131-AH36 com 13,7 mm de espessura; todos soldados pelo método MAG (*Metal Active Gas*). Na qual foi fabricada uma amostra de referência, com uma solda sem descontinuidades, microscopicamente observáveis, e as outras seis com descontinuidades, diferentemente introduzidas na solda. Por microscopia ótica foi realizada a caracterização microestrutural das juntas soldadas que possibilitaram avaliar a qualidade das chapas de testes em relação à chapa de referência, corroborando posteriormente com os resultados da tomografia gama. Os corpos de prova foram analisados no tomógrafo computadorizado de raios gama e as amostras de teste comparadas com a de referência. Com os dados da tomografia foi possível evidenciar as descontinuidades presentes no cordão de solda em chapas de aço que foram investigadas e dimensionadas em uma sequência de análise. O levantamento estatístico, matriz de correlação, *cluster* hierárquico, quantificação da porosidade e simulação de Monte Carlo foram aplicados como processamento multivariado de dados nesta análise. Pelos resultados o limite mínimo de detecção obtido foi de 0,4 mm, para evidenciar uma descontinuidade; limitação esta associada ao equipamento que foi utilizado e ao modo da varredura; embora a tomografia já disponha de equipamentos com resolução superiores a 4 μm . Pela metodologia aplicada, a tomografia gama mostrou-se eficaz em detectar descontinuidades em chapas soldadas, sendo comparável a outros métodos de ensaios não destrutivos que apresentam limitações na inspeção.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo. Tomografia gama. Descontinuidades. Aço naval.

ABSTRACT

Welding is an industrial manufacturing method that demands detailed and accurate inspections for the detection of increasingly smaller discontinuities which are not detected by traditional non-destructive testing techniques such as ultrasonic and magnetic particles that detect discontinuities in the order of millimeters and testing for penetrating liquids which, despite cracking up to 1 μm , is limited only to those located superficially. Contributing to this follow-up, gamma tomography was used in this work to evaluate the recurrent discontinuities of the welding process in naval steel plates. In this study, seven specimens were produced in ASTM A131-AH36 steel sheets with 13.7 mm thickness; all welded by the MAG (Metal Active Gas) method. In which a reference sample was fabricated, with a microscopically observable unbroken weld, and the other six with discontinuities, differently introduced in the weld. Microstructural characterization of the welded joints was performed by optical microscopy, which allowed to evaluate the quality of the test plates in relation to the reference plate, later corroborating with the results of the gamma tomography. The specimens were analyzed on the computerized gamma ray tomograph and the test samples compared to the reference specimen. With the tomography data, it was possible to show the weld discontinuities in steel plates that were investigated and dimensioned in a data analysis sequence. The statistical survey, correlation matrix, hierarchical cluster, porosity quantification and Monte Carlo simulation were applied as multivariate data processing in this analysis. By the results, the minimum detection limit was 0.4 mm, to show a discontinuity; this limitation is associated with the equipment that was used and the scan mode; although the tomography already has equipment with resolution higher than 4 μm . By the applied methodology, the gamma tomography showed to be effective in detecting discontinuities in welded plates, being comparable to other methods of non-destructive tests that also present limitations, depending on the inspection.

Keywords: Nondestructive testing. Gamma tomography. Discontinuities. Naval steel.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BGO	Germanato de Bismuto
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CsI(tl)	Iodeto de Césio dopado com Tálcio
CT	<i>Computer Tomography</i>
DV	Desvio Padrão
END	Ensaio Não Destrutivo
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal Base
MC	Monte Carlo
MCNPX	<i>Monte Carlo N-Particle eXtended</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MS	Metal de Solda
NaI(Tl)	Iodeto de Sódio dopado com Tálcio
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TOFD	<i>Time Of Flight Diffraction</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
3D	Três Dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVO GERAL	12
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	SOLDAGEM GMAW	13
2.2	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	16
2.3	DETECTOR DE NaI(Tl)	22
2.4	SIMULAÇÃO.....	28
2.4.1	Método Monte Carlo	28
2.4.2	Programa MCNPX	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	SOLDAGEM DA CHAPA NAVAL.....	32
3.2	CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA	33
3.3	METALOGRAFIA.....	36
3.4	SIMULAÇÃO MCNPX	37
3.5	TOMOGRAFIA GAMA	38
3.6	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO	43
3.7	O MODELO CLUSTER HIERÁRQUICO	44
3.8	LOCALIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1	RESULTADO DA SIMULAÇÃO	48
4.2	LEITURAS TOMOGRÁFICAS	51
4.3	CÁLCULO DO VOLUME.....	52
4.4	ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA.....	53
4.4.1	Amostra 01: Chapa Soldada com Vento.....	61

4.4.2	Amostra 02: Chapa soldada sem escovar a escória entre os cordões de solda	66
4.4.3	Amostra 03: Chapa soldada com passe único.	71
4.4.4	Amostra 04: Chapa com impureza na solda	76
4.4.5	Amostra 05: Chapa soldada sem Gás de Proteção	83
4.4.6	Amostra 06: Chapa soldada manualmente	87
5	CONCLUSÃO	93
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS.....	95
	ANEXO A - SIMULAÇÃO MCNPX.....	100

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos processos de soldagem, o GMAW (Gas Metal Arc Welding), utiliza um arco elétrico como fonte de calor para fundir o metal, sendo a poça de fusão protegida por um gás inerte, ativo ou uma mistura de ambos. Este método é utilizado na união de diversas ligas metálicas, como os Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), a exemplo temos o ASTM A131 grau AH-36 bastante usando na construção naval.

Para manter a qualidade na produção e monitorar as condições de trabalho das estruturas soldadas faz-se necessário uma investigação de sua integridade. Para tal, novas técnicas de inspeção são capazes de evidenciar uma associação de descontinuidades cada vez menores produzidas pelo processo de soldagem.

Para avaliar a integridade das juntas soldadas, diversos métodos de Ensaios Não Destrutivos (END) são utilizados, dentre eles a Tomografia Computadorizada (CT) gama a qual consiste em analisar a atenuação sofrida por um feixe de radiação em relação ao volume do objeto em análise (AIRD, 1988), permitindo a aquisição de dados de acordo com a distribuição espacial de densidade.

Os sistemas tomográficos gama são baseados na transmissão utilizando fontes radioativas encapsuladas e detectores colocados nos lados opostos do objeto a ser estudado. A técnica não fornece dados em tempo real, mas uma média em relação ao tempo, possuindo alta confiabilidade (KUMAR; MOSLEMIAN; DUDUKOVIC, 1997).

1.1 JUSTIFICATIVA

Em virtude da crescente demanda industrial na fabricação de peças soldadas, em especial na construção naval, é conveniente a utilização de técnicas de inspeção para garantir qualidade dos produtos, demandando inspeções mais detalhadas e precisas para detecção de descontinuidades cada vez menores, algo que até certo ponto é limitado nas técnicas de ensaios não destrutivos, como ultrassom, partículas magnéticas e líquidos penetrantes. Assim, a presente pesquisa utilizou um método para inspecionar a integridade das peças soldadas através da Tomografia Gama Computadorizada.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar as descontinuidades decorrentes do processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*) em chapas navais utilizando a técnica de ensaio não destrutivo por tomografia gama computadorizada, onde os resultados de uma solda de referência serão comparados aos resultados de soldas com descontinuidades (defeitos) induzidas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar as chapas para realizar a soldagem de um corpo de prova de referência, sem descontinuidades e seis outros corpos de prova com descontinuidades induzidas.
- Analisar as juntas soldadas por imagens microscópicas da chapa de referência e das chapas com descontinuidades para evidenciar e dimensionar algumas descontinuidades (defeitos) como poros e trincas, principalmente.
- Realizar a simulação de Monte Carlo para garantir a viabilidade dos parâmetros validando os dados experimentais e simulados estabelecendo um limite de detecção para o ensaio no tomógrafo gama.
- Submeter as chapas soldadas ao ensaio de tomografia gama computadorizada.
- Avaliar os resultados da Tomografia gama das chapas através do diagrama tridimensional com análise estatística entre a chapa de referência e as chapas de teste; localizando e dimensionando as descontinuidades (defeitos).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A classificação da soldagem como um processo de união de metais através do aquecimento, com ou sem a aplicação de pressão ou metais de adição é normatizado pela *American Welding Society* (AWS).

2.1 SOLDAGEM GMAW

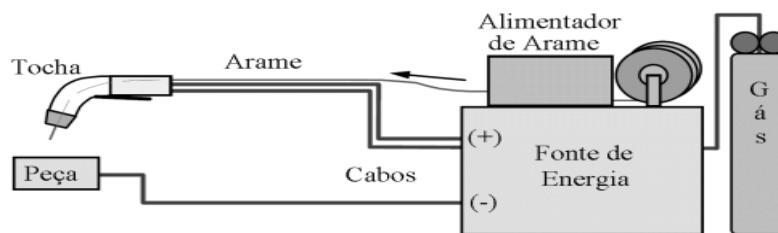
Existem diversos processos de soldagem, destacando-se os por fusão pelo intermédio da aplicação de um arco elétrico, como: Os processos com eletrodo revestido SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), arame tubular FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*), arco submerso SAW (*Submerged-Arc Welding*), com eletrodo de tungstênio GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), com eletrodo de metal GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), entre outros.

Durante a soldagem o arco elétrico forma-se com a ionização de um gás, a elevada temperatura. A energia térmica produzida é suficiente para fundir o metal de maneira localizada. Assim a soldagem a arco elétrico é caracterizada pela diferença de potencial entre a peça e o eletrodo, bem como pela corrente circulante entre estes dois polos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Algumas formas de classificação de um processo de soldagem são: Corrente contínua e polaridade direta (CC-), onde o eletrodo está ligado ao polo negativo, gerando uma menor penetração e uma maior taxa de deposição; Corrente contínua e polaridade inversa (CC+), quando o eletrodo está ligado ao polo positivo, propicia uma maior penetração e uma menor taxa de deposição; Corrente alternada (CA) usada para soldagem de materiais com camadas de óxido, alumínio e magnésio (FOGAGNOLO, 2011).

O equipamento básico do processo GMAW consiste em uma fonte de energia, a tocha de soldagem, a fonte de gás e o alimentador de arame conforme esquematizado na figura 1.

Figura 1- Esquema do processo GMAW.

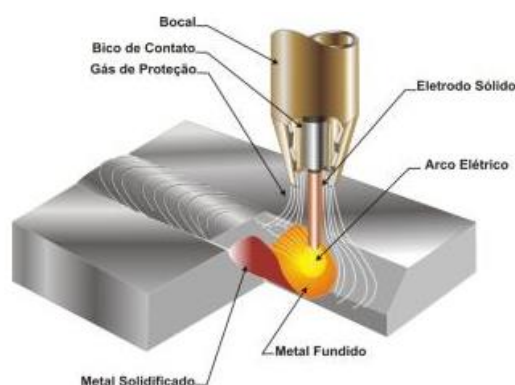


Fonte: MODENESI; MARQUES, (2006)

Os parâmetros deste processo variam com a tensão de 15 a 50 volts e a corrente entre 100 e 400 A num equipamento de pequeno porte (GOLDAK, 2010). A velocidade de alimentação do arame pode variar de 1 a 20 m/min com ajuste automático do comprimento do arco que repercute sobre a corrente (MODENESI; MARQUES, 2012).

O processo GMAW estabelece um arco elétrico entre a peça e um consumível na forma de arame de maneira contínua (LANCASTER, 1984). Assim tanto o metal como a poça de fusão são protegidos por um fluxo de gás, como mostra a figura 2.

Figura 2- Esquema de uma soldagem MIG/MAG.



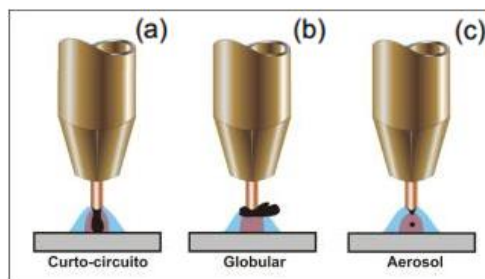
Fonte: MILER (2014)

Os gases inertes como Argônio e Hélio, quando usados puros, classificam o processo como MIG (*Metal Inert Gas*), utilizado na soldagem de metais e ligas não ferrosas. Quando são usados gases ativos como o dióxido de carbono ou misturas deste com Argônio e Oxigênio o processo é denominado MAG (*Metal Active Gas*) (MODENESI; MARQUES, 2006). Pequenas quantidades de gases ativos são utilizadas para aços ligados. (WAINER; BRANDÍ; MELO, 2004).

Existem três principais modos de transferência de metal no processo GMAW como mostra a figura 3. No modo de curto-circuito (a) a transferência ocorre através do

contato entre a gota na ponta do eletrodo e a poça de fusão. Condição de corrente baixa. No Globular (b), similar à transferência por curto circuito, este tipo de transferência é caracterizado por gotas aproximadamente esféricas formadas na extremidade do eletrodo (BARROS, 2015). Mas diferentemente da transferência por curto circuito, às gotas desprendem do eletrodo antes de alcançarem a poça de fusão. Já o aerossol (c), neste caso assemelha-se a transferência globular, no entanto os glóbulos possuem um diâmetro inferior ao diâmetro do eletrodo, ocorre com correntes elevadas (WAINER; BRANDÍ; MELO, 2004).

Figura 3- Tipos de transferência de metal. (a) Curto-Circuito (b) Globular (c) Aerossol.



Fonte: MILER (2014)

Deve haver bastante cuidado durante o processo de soldagem para evitar descontinuidades e garantir uma solda de qualidade. Os principais defeitos presentes em soldas são: Porosidade, quando ocorre entrada de gases durante a solidificação da poça de fusão, levando a bolhas de gás aprisionadas para dentro do metal solidificado. Esta descontinuidade pode ocorrer de maneira uniformemente distribuída, em grupos, alinhada, ou de forma vermicular (linhas de vazios). Também pode ocorrer falta de fusão com a ausência de continuidade metálica entre o metal depositado e o metal existente (seja ele o metal de base ou de algum passe anterior). Suas principais causas são o aquecimento inadequado do metal de base ou a presença de óxidos, os quais impedem a passagem da corrente e formação do arco elétrico. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Outro tipo de descontinuidade é a falta de penetração onde ocorre o preenchimento ou fusão ineficaz da raiz da solda que pode induzir trincas produzidas por tensões residuais. A presença de trincas acarreta a incapacidade do material em suportar as tensões para as quais foi projetada. Atuam como concentradoras de tensão e

podem levar a uma fratura frágil da junta. Também tem as mordeduras que acontecem quando o material na margem do cordão ou na base funde sem a ocorrência de preenchimento, provocando uma redução na área útil e concentrações de tensões, além de reduzir a resistência à fadiga. Uma descontinuidade bastante comum é a inclusão de escória presentes entre passes. Esta descontinuidade atua como concentrador de tensão e facilita a formação de trincas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). A inclusão de escória pode ser evitada escovando-se o cordão depositado ou limpando a superfície entre um cordão de solda e outro.

Chapas soldadas, de modo geral, ficam sujeitos a esses vários tipos descontinuidades decorrentes do processo de soldagem, além de cargas, tanto mecânicas como elétricas, quando permanecem em uso (CHEN, 2017). Além disso, também estão sujeitas a diferentes níveis de agressões devido às intempéries, como chuva, radiação solar, variação de temperatura, além de erosão, umidade, corrosão, entre outros.

Pelo exposto, pode-se concluir que a inspeção da solda é fundamental para a garantia da qualidade da soldagem e integridade do material. A técnica de ensaios não destrutivos é bem empregada para este fim (DROUBI, 2017). Há vários tipos de procedimento de inspeção não destrutiva, tais como: Inspeção visual, partículas magnéticas, ultrassom, líquidos penetrantes, raios-X, gamagrafia e tomografia computadorizada (CT).

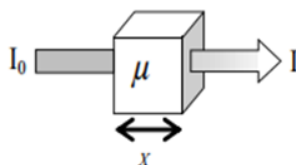
2.2 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

O termo tomografia vem do grego *τομος*, tomos, corte ou fatia e *γραφειν* “*graphein*” que significa escrever. As medidas são realizadas através de detectores constituídos de cristais de cintilação e os feixes de radiação são definidos por colimações no detector e/ou fonte emissora. (OLIVEIRA, 2011). O princípio da tomografia computadorizada consiste na análise da atenuação sofrida por um feixe de radiação ao atravessar o objeto de análise. A resposta de vários feixes com diferentes orientações em relação ao volume estudado é que permite a aquisição dos dados de acordo com a distribuição espacial de densidade (AIRD, 1988). Os dados obtidos por esta técnica podem ser utilizados também para propósitos de reconstrução de imagens, controle de uma planta, para funções de alarme, ou para monitorar o balanço de massa global ou parcial de um sistema (SCHIEWE; TUZLA, 1999).

Sob o aspecto físico, a radiação interage com a matéria por meio do efeito fotoelétrico, efeito Compton, e produção de pares. Todas estas interações dependem da energia do fóton incidente, da espessura e número atômico do material absorvedor (KAK; SLANEY, 2001). Existem vários tipos de radiação ionizante: partículas elementares, radiação eletromagnética e núcleos complexos. Os raios X e gama são radiações eletromagnéticas ionizantes de maior interesse para aplicação em tomografia, pois devido ao seu caráter ondulatório, ausência de carga e massa de repouso, pode penetrar no material percorrendo grandes espessuras antes de sofrer uma interação (MALARVEL, 2017).

Ao atravessar um material, figura 4, a intensidade da radiação sofre uma queda exponencial descrita pela relação de Beer-Lambert (MOURA, et al. 2015), Equação 1:

Figura 4- Desenho esquemático da atenuação da radiação com a matéria.



Fonte: (OLIVEIRA, 2011)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

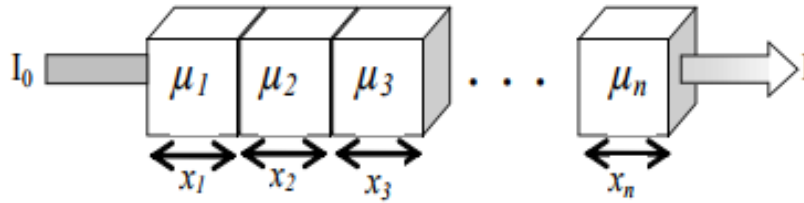
Na qual “I” é a intensidade final da radiação, “I₀” a intensidade inicial da radiação, “μ” o coeficiente de atenuação linear e “x” é a espessura do material. O coeficiente linear de atenuação (cm⁻¹) é específico de cada material. Muitas vezes, substitui-se o termo μ por μ_m, onde μ_m é o coeficiente de atenuação mássico (cm²/g) e ρ é a densidade (g/cm³). O coeficiente de atenuação mássico independe de estado físico. Pode ser encontrado dividindo o coeficiente de atenuação linear pela densidade do material, Equação 2 (SALVADOR, 2008).

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} [cm^2/g] \quad (2)$$

Devido à natureza do fenômeno de desintegração radioativa, a equação de Beer-Lambert representa a probabilidade de que um fóton atravessasse um objeto sem interagir com o meio, que no campo da tomografia é conhecida como projeção.

Quando o feixe percorre uma região com mais de um coeficiente de atenuação, como mostrado na figura 5, a relação de Beer-Lambert é expressa pela Equação 3.

Figura 5- Atenuação da radiação por diferentes coeficientes de atenuação.



Fonte: (OLIVEIRA, 2011)

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots + \mu_n x_n)} \Leftrightarrow \sum_{n=1}^N \mu_n \cdot X_n = \ln \frac{I_0}{I} \quad (3)$$

De maneira geral, a soma na Equação 3 torna-se uma integral e “x” torna-se o elemento de linha dx, onde o coeficiente de atenuação é função da trajetória, mostrado na Equação 4.

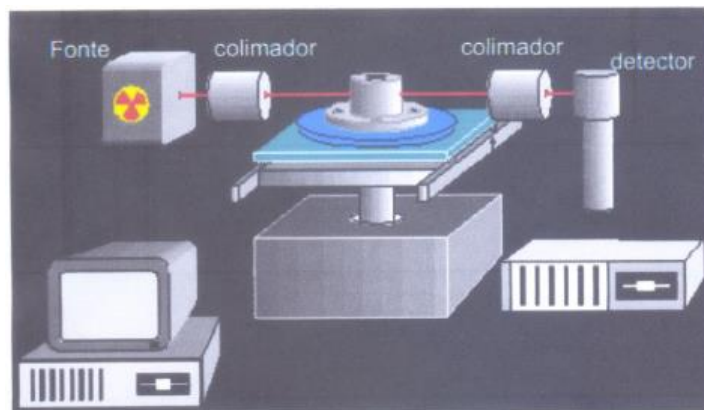
$$\int_{linha} \mu(x) \cdot dx = \ln \frac{I_0}{I} \quad (4)$$

A tomografia computadorizada gama por transmissão consiste na passagem de um feixe de raios gama através de um meio heterogêneo sofrendo atenuação da radiação incidente. A medida desta atenuação representa a integral de linha da distribuição dos coeficientes de atenuação através do caminho percorrido pelo feixe. A medição de vários feixes com diferentes orientações, tanto angulares (vistas) como espaciais (projeções) em relação ao objeto estudado, seguida de um processamento de dados e reconstrução de imagem, fornece a distribuição espacial dos coeficientes de atenuação do material em análise.

Assim, a reconstrução tomográfica consiste em determinar a distribuição de densidades dentro do plano que é definido pelo movimento de rotação e translação. Os tomógrafos são basicamente constituídos por uma fonte emissora de radiação, um sistema de detecção de dados e um sistema computacional responsável pelo controle de

aquisição de dados e pela reconstrução, processamento, armazenamento e registro dos dados (SPRAWLS, 1995), conforme mostra figura 6. No centro da figura está localizada a mesa onde é posicionado o objeto para análise.

Figura 6- Esquema de um tomógrafo mostrando seus componentes.



Fonte: PALHA (2014)

O movimento da mesa com o objeto de análise pode ser rotacional ou translacional, para formar as projeções. Cada varredura corresponde a um conjunto de caminhos onde o feixe atravessa o objeto a partir de uma determinada direção. As visualizações são também chamadas de projeções ou perfis, enquanto cada projeção individual é referida como um frame. Um detector recolhe milhões de medições por varredura, cada uma com precisão e quantificada precisamente a uma linha específica através do objeto de interesse. As imagens scaneadas são passadas para o algoritmo de reconstrução e depois para o processamento. (STANLEY, 1986).

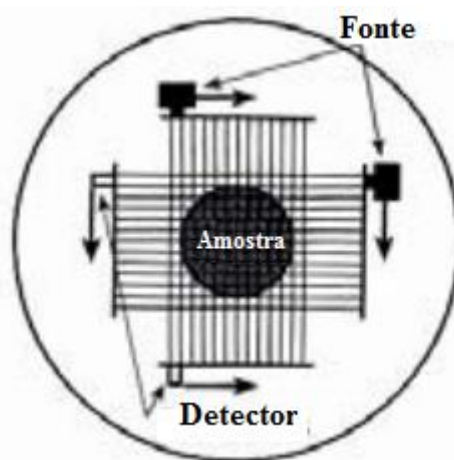
O design do hardware para o sistema de digitalização está relacionado à geração de tomógrafo. O termo geração de CT refere-se à disposição geométrica da combinação de detectores, a fonte de radiação e o método adotado para adquirir os dados para o número necessário de projeções. Em princípio, envolve a rotação do dispositivo fonte-detector de forma sincronizada em relação ao objeto investigado.

Existem quatro formas de design comumente usadas. As diferentes variações do conceito básico têm base na geração de CT desenvolvida na história (DENNIS, 1989).

A característica essencial da geometria de um tomógrafo de primeira geração tem uma única fonte e um único detector. A fonte e o detector são fixados em conjunto ou com posições relativas que são constantes e toda a fonte e unidade de detecção feita para percorrer a amostra de teste, mostrado na figura 7. Uma única passagem produz

uma série de medidas de atenuação, lembrando de que cada medida de atenuação é uma vista e que a série em toda a amostra de teste é uma varredura, gerando assim uma única varredura. A característica mais importante desta varredura é que forma uma série de feixes paralelos. Se o objeto de teste for girado por um ângulo θ a outro, nesse percurso é feito outra varredura dos dados de atenuação, mas deslocada pela rotação angular θ . Toda a amostra de teste pode ser varrida se o procedimento for repetido “n” vezes em que $n = 180^\circ \cdot \theta^{-1}$ em teoria. Na prática, de 360° em vez de 180° . (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002).

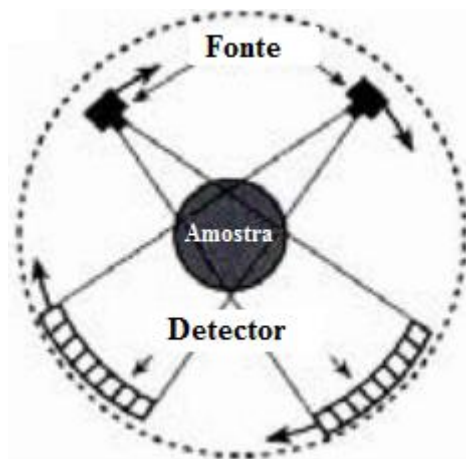
Figura 7- Tomógrafo de primeira geração.



Fonte: IAEA (2008)

A geometria de segunda geração usa o mesmo princípio que a geometria de primeira geração. A diferença é que, em vez de ter apenas um único detector, há tipicamente um banco de detectores dispostos para receber um feixe da fonte em forma de leque, como mostra a figura 8. O feixe em leque é colimado para que a varredura esteja no plano de interesse. Assim, o detector adquire os mesmos dados em uma única varredura. O próximo detector pode ser colocado de modo que seu centro visto a partir do ponto focal da fonte seja deslocado pelo ângulo θ do detector. Simultaneamente com o primeiro percurso, esse próximo detector reúne informações idênticas que, em uma configuração de primeira geração, seriam coletadas sequencialmente em uma segunda varredura. De fato, a geometria de segunda geração permite que todas as visualizações no ângulo do feixe sejam obtidas no mesmo percurso. Isto permite que os dados sejam adquiridos de mais de um ângulo durante uma translação. As rotações continuam até que 180° ou 360° graus forem cobertos. (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002).

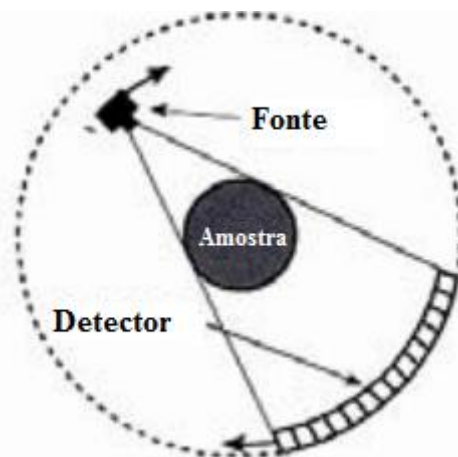
Figura 8- Tomógrafo de segunda geração.



Fonte: IAEA (2008)

A geometria de terceira geração usa uma única fonte e um grande banco de detectores que abrangem o objeto de teste visto da fonte, figura 9. Os detectores fornecem uma visão única simultaneamente de uma série de medidas em forma de leque em vez de medidas de raios paralelos. Ao girar continuamente a amostra de teste e adquirir os dados, com muitas visualizações adquiridas para ser reconstruído. Na terceira geração, cada detector não verá todo o objeto. Assim, uma má calibração do detector provoca artefatos de anel na imagem. (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002).

Figura 9- Tomógrafo de terceira geração.

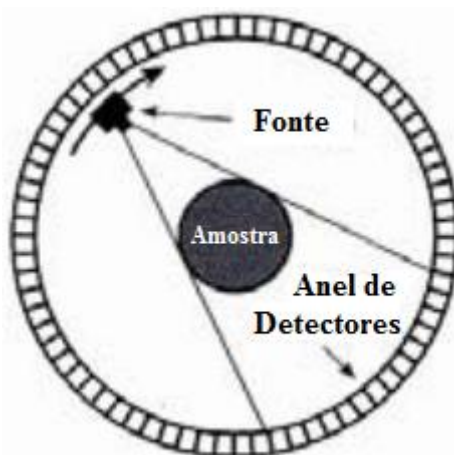


Fonte: IAEA (2008)

A geometria do tomógrafo da quarta geração usa uma única fonte móvel e um banco de detectores estacionários configurados em um anel circular, figura 10. À medida que a fonte gira dentro do anel do detector, uma única varredura pode ser feita

ao mesmo tempo. Em vez disso, os dados de exibição são construídos a partir de posições simultâneas da fonte em relação a um único detector. Como a geometria da terceira geração, esta configuração de quarta geração usa uma estrutura de exibição de feixe em leque. O principal motivo para usar a geometria da quarta geração é que cada visualização é feita com um único detector, isso apresenta uma vantagem em relação à geometria de segunda e terceira geração, onde a busca de mudanças em sinais de pequena escala é frequentemente subjugada com os problemas de normalização do detector. (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002).

Figura 10- Tomógrafo de quarta geração.



Fonte: IAEA (2008)

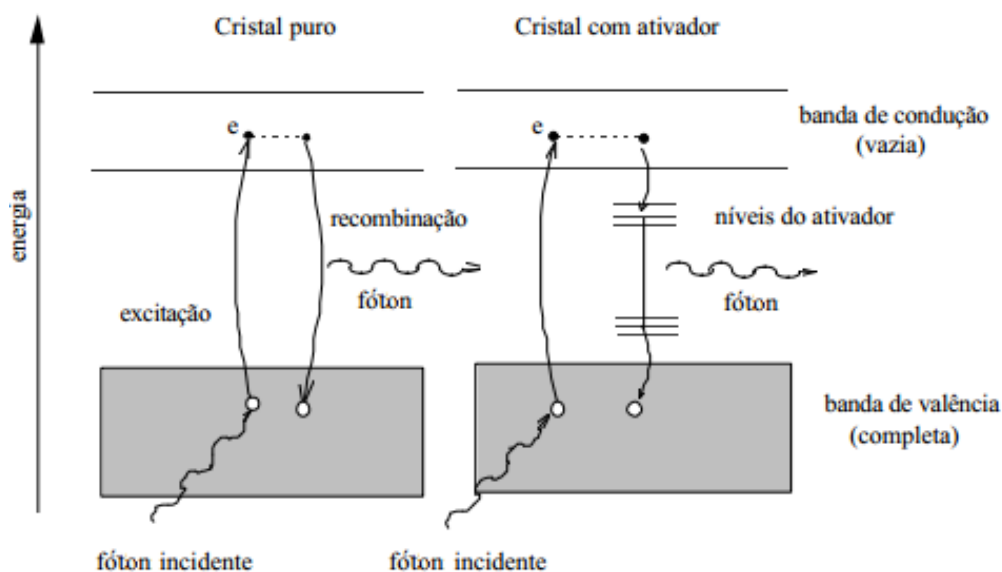
As formas mais úteis para a tomografia computadorizada industrial são de segunda geração e terceira geração. Ambas as técnicas utilizam um feixe colimado em leque ou em cone de raios-X ou gama e matriz unidimensional de detectores. (IAEA, 2008)

2.3 DETECTOR DE NaI(Tl)

Durante a década de 1950 começaram a ser desenvolvidos detectores de cintilação de elevada eficiência, grande rapidez de resposta, da ordem dos nanossegundos e com uma razoável resolução em energia baseados em cristais inorgânicos. Um passo fundamental no desenvolvimento deste tipo de detectores foi à criação de tubos fotomultiplicadores capazes de ampliar e detectarem sinais luminosos muito fracos, um número pequeno de fótons e de os converterem em sinais elétricos. De fato, já eram conhecidos materiais cintiladores há muitos anos, mas a impossibilidade de

converter o sinal luminoso num sinal elétrico tinha até então impedido a sua utilização na detecção de radiações nucleares (GREEN; SINCEBAUGH, 2001). O iodeto de sódio é um material que se pode apresentar na forma cristalina e que ao absorver radiações ionizantes emite fótons de cintilação. Este é o tipo de detector de estado sólido mais utilizado devido a sua alta eficiência de detecção (VEERA, 2001). Na figura 11 está esquematizada a situação de absorção de um fóton de energia (DOCPLAYER, 2017).

Figura 11- Esquema de cintilação de um fóton.

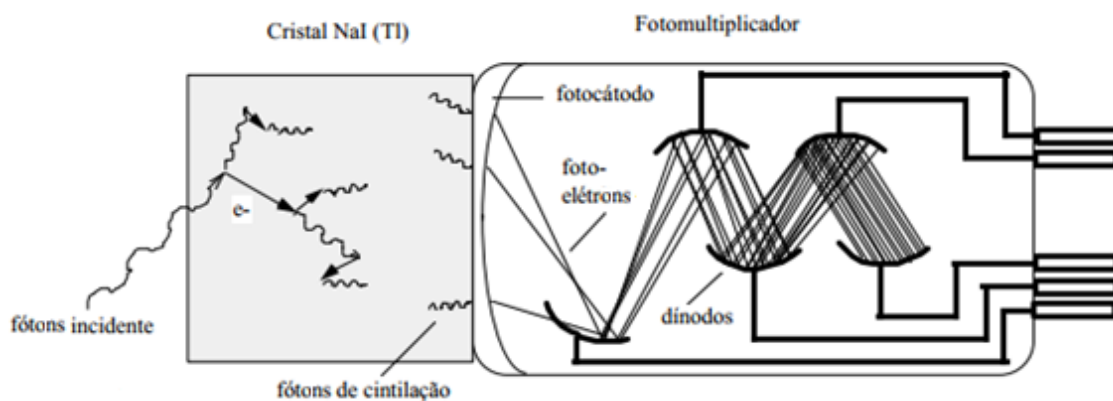


Fonte: DOCPLAYER (2017)

Num cristal puro, a energia da radiação incidente absorvida é cedida aos elétrons da banda de valência, sendo estes excitados para a banda de condução, que inicialmente se encontra vazia. Quando os elétrons da banda de condução decaem emitem um fóton. Este fóton de cintilação tem uma energia que é proporcional à energia perdida pelo elétron quando transitou da banda de condução para a banda de valência. Por esse motivo pode ser absorvido por um elétron da banda de valência, que passará para a banda de condução. O resultado prático deste processo é o de que por o cristal ser opaco à sua radiação de cintilação, é pequena a quantidade de luz que sai. Para contornar esta situação utiliza-se pequenas quantidades de um material, chamado ativador, no caso o Iodeto de Sódio dopado com Tálcio, NaI(Tl), cujo papel é o de criar níveis de energia ligeiramente acima da banda de valência e ligeiramente abaixo da banda de condução. Normalmente estes níveis de energia encontram-se vazios, mas quando um elétron é excitado para a banda de condução, pode agora decair em primeiro lugar para um dos

níveis abaixo da banda de condução. Em seguida o elétron pode decair para os níveis acima da banda de valência emitindo o fóton de cintilação e finalmente regressando à banda de valência. Agora o fóton de cintilação não possui energia suficiente para fazer a transição de um elétron da banda de valência para a de condução, não podendo ser absorvido por esse processo. O cristal é transparente para estes fótons, que assim conseguem atravessá-lo chegando à fotomultiplicadora, como mostra na figura 12. No caso do NaI(Tl) o comprimento de onda dos fótons emitidos situa-se numa banda com o máximo nos 410 nm (DOCPLAYER, 2017).

Figura 12- Esquema de um detector de com cristal de NaI(Tl) acoplado a uma fotomultiplicadora.



Fonte: DOCPLAYER (2017)

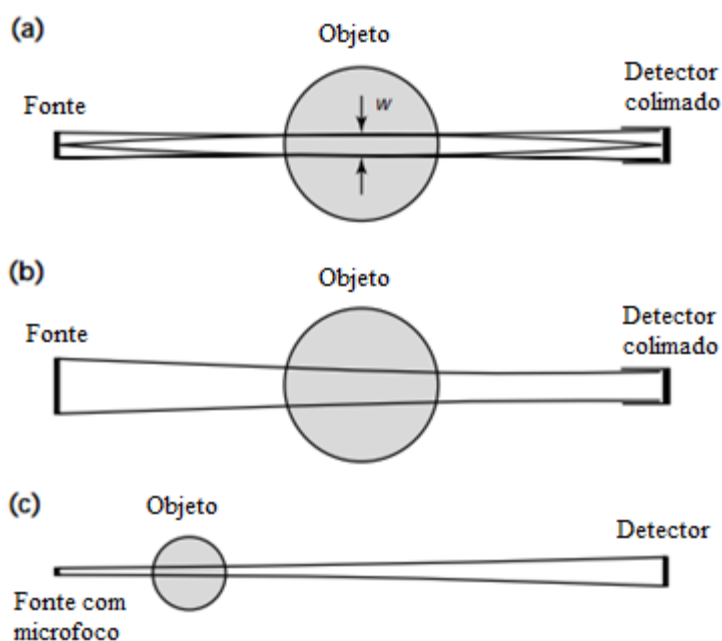
Na fotomultiplicadora o fóton de cintilação é absorvido pelo fotocátodo que é constituído por um material fotossensível depositado no interior da ampola de vidro. Do fotocátodo são libertados elétrons por efeito fotoelétrico. Por ação de um campo eléctrico estes fotoelétrons são focalizados numa placa metálica, o primeiro dínodo. Por cada fotoeletron que atinge o dínodo vários elétrons são libertados sendo acelerados para o dínodo subsequente, por um campo eléctrico. Em cada estágio existe assim uma amplificação da corrente eletrônica. A utilização de vários andares, em geral de 10 a 12, permite obter ganhos da ordem de 10^6 a 10^8 . Na saída do fotomultiplicador o sinal em corrente é convertido num sinal em tensão através do uso de uma resistência de valor elevado, da ordem de 1MW podendo o valor do sinal obtido ser por volta das dezenas de volts (DOCPLAYER, 2017).

Embora o detector de NaI(Tl) seja um dos detectores sólidos mais "antigos", e apresente uma resolução em energia limitada, tem a seu favor vários atrativos, para

além dos já referidos relativamente aos detectores de cintilação em geral. É um detector razoavelmente barato, de manutenção fácil, é robusto e fácil de usar, não requerendo instalações de frio ou vácuo. Sendo um detector compacto e relativamente denso, apresenta também uma eficiência superior à maioria dos outros detectores de radiação gama, sendo por isso indicado para trabalhar com fontes radioativas não muito intensas (DOCPLAYER, 2017).

A resolução básica de um sistema de tomografia computadorizada é determinada pela largura efetiva do feixe de raios-X ou gama no objeto. O feixe efetivo é em função das dimensões da fonte, do detector e da posição do objeto em relação a elas. A resolução vertical do volume da fatia será determinada pela espessura efetiva da fatia da abertura do colimador (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002). A figura 13 mostra a configuração de uma fonte e detector para a resolução horizontal de uma fatia na tomografia computadorizada através de um objeto.

Figura 13- Exemplos de configurações de fonte-objeto-detector e largura efetiva do feixe (w):
(a) fonte e detector com abertura de tamanho equivalente; (b) fonte maior que o detector; (c) fonte menor do que o detector.



Fonte: BOSSI; IDDINGS; WHEELER (2002)

Na figura 13a, uma fonte e detector de abertura com tamanho equivalente têm um objeto localizado a meio caminho entre eles. Com esta configuração, a largura efetiva do feixe é minimizada no centro. Nas bordas do objeto, a largura efetiva do feixe

será ligeiramente maior e a resolução será diminuída. Quando as aberturas da fonte e do detector diferem em tamanho, como mostrado na figura 13b, a melhor resolução será fora do centro. Neste caso, a rotação do sistema tomográfico, seja de 180 ou 360 graus, pode fazer diferença na resolução de detalhes em ambos os lados do objeto. (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002)

A figura 13c mostra o caso de uma fonte muito pequena, de microfocos, e um detector maior. Por usar ampliação da projeção, pode ser possível obter uma resolução muito maior do objeto. A resolução pode ser estimada tomando uma média do tamanho efetivo do feixe em milímetro, multiplicando por dois e invertendo, para obter valores de resolução em pares de linhas por 1 mm. (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002)

O número N de pontos de dados necessários para alcançar a maior resolução a partir de uma geometria específica do scanner pode ser estimado a partir da largura efetiva do feixe, como demonstra a Equação 5. Se o campo de visão, círculo de reconstrução, tiver um diâmetro D , o número de pontos de dados em cada projeção através do objeto deve ser:

$$N = \frac{2D}{w} \quad (5)$$

Onde w é a largura efetiva do feixe. Isso permite duas amostras por largura do feixe. O número de projeções vistas v , é estimado permitindo que um fóton atravessasse cada largura do feixe sobre o raio externo do campo de visão, mostrado na Equação 6:

$$v = \frac{\pi D}{w} \quad (6)$$

O número total de projeções utilizados para a aquisição de dados tomográficos será $2\pi D^2 \cdot w^{-2}$. Com isso, os fabricantes de tomógrafos computadorizados podem variar seus equipamentos estabelecendo o número de projeções e pontos de dados por projeção. A espessura da fatia é a terceira dimensão que define o volume de inspeção. O operador normalmente selecionará esse valor. Aumentar a espessura da fatia permitirá mais fótons para melhores estatísticas de imagem ou maior velocidade de digitalização (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002).

No entanto, aumentará a inclinação da mancha das bordas, penumbra, em objetos e diminuirá a sensibilidade para detalhes que podem ser mais finos do que a espessura da fatia. O estreitamento da fatia fornece uma maior sensibilidade aos detalhes nas variações axiais no objeto, mas ao custo do tempo de varredura e aumento do ruído estatístico (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002).

A sensibilidade ao contraste em imagens tomográficas é inerentemente alta porque cada elemento de volume reconstruído é composto de raios retroprojetados de muitas orientações sobre o objeto. A Equação 7 mostra uma estimativa da relação sinal-ruído (SNR) em um elemento de voxel em uma função de várias características do sistema tomográfico para uma reconstrução de objeto um cilíndrico:

$$SNR = 0.665\mu w^{1.5} \sqrt{\frac{vnt}{\Delta p}} e^{(-2\pi R)} \quad (7)$$

Nesta equação, μ é o coeficiente de atenuação linear, w é a largura do feixe de radiação, v é o número de visualizações, n é a taxa de intensidade do fóton no detector, t é o tempo de integração dos detectores, Δp é o espaçamento do feixe e R é o raio do objeto. A Equação 8 mostra a relação de contraste, que será dada por:

$$\text{Relação de Contraste} = \frac{6}{\sqrt{SNR \times Z}} \quad (8)$$

Onde Z é o número de pixels sobre os quais o contraste é observado. Os sistemas de tomografia computadorizada geralmente fornecem medições de sensibilidade ao contraste na faixa de 0,1 a 1,0 por cento. O que as equações acima mostram é que a relação sinal-ruído melhora com aumentos das características do sistema tomográfico, a largura do feixe de radiação, número de visualizações, a intensidade do feixe e o tempo de integração. A relação sinal-ruído também será melhorada diminuindo o espaçamento dos raios e o diâmetro do objeto. Essas características do sistema tomográfico refletem no compromisso de aperfeiçoar os sistemas de tomografia computadorizada (BOSSI; IDDINGS; WHEELER, 2002).

Tempos de varredura mais rápidos, uma ótima resolução, sensibilidade de alto contraste e objeto com tamanhos maiores, são mutuamente exclusivos, exigindo

comprometimento no desenvolvimento do design dos sistemas tomográficos computadorizados.

Devido à alta relação sinal-ruído em qualquer voxel, a tomografia computadorizada pode detectar características abaixo do limite de resolução da imagem. Para características que são maiores do que um único voxel, a sensibilidade do contraste melhora pela raiz quadrada do número de pixels que compõem essa característica. Para uma característica menor que um pixel, a densidade aparente é calculada com base no voxel da imagem, portanto, o sinal para voxel dessa imagem é reduzido. Isso é chamado de efeito de volume parcial. Embora o sinal seja reduzido pelo efeito de volume parcial, a característica ainda pode ser detectada. Este é um ponto significativo sobre a aplicação da tomografia computadorizada porque, muitas vezes, voxels de imagens relativamente grandes, em comparação com descontinuidades muito pequenas, podem ser usados. As características muito pequenas ainda são detectadas, mas não necessariamente resolvidas (DENNIS, 1989).

2.4 SIMULAÇÃO

Com o desenvolvimento industrial e das pesquisas, tornou-se necessário a utilização de ferramentas de tomada de decisão, como os simuladores, que permitissem a redução de custos e aumento na qualidade dos processos. Os programas de simulação utilizam um modelo de processo analítico, algoritmos eficientes para representações do rastreamento e dispersão dos raios, para isso utilizam o método Monte Carlo (JAENISCH; BELLON; EWERT, 2008). O método de Monte Carlo é a técnica numérica regularmente mais usada na abordagem de problemas utilizando simulação da interação da radiação com a matéria.

2.4.1 Método Monte Carlo

O método de Monte Carlo pode ser usado para replicar teoricamente um processo estatístico, tais como a interação de partículas nucleares com materiais e é particularmente útil para os problemas complexos que não podem ser modelados por códigos de computador que usam métodos determinísticos. Os eventos probabilísticos individuais que compreendem um processo são simulados sequencialmente. As

distribuições de probabilidade que regem estes eventos são mostrados estatisticamente para descrever o fenômeno total. Em geral, a simulação digital é executada em um computador, porque o número de ensaios necessários para descrever adequadamente o fenômeno é muito grande. O processo de amostragem estatística baseia-se na seleção de números aleatórios, análogos a um jogo de dados em um cassino, daí o nome "Monte Carlo". Constitui, na verdade, seguir cada uma das muitas partículas a partir de uma fonte pelo longo de sua vida até sua morte em alguma categoria final como escape, absorção, etc. Distribuições de probabilidade são amostragens aleatórias usando dados de transporte para determinar o resultado em cada etapa dessa vida útil (RSICC, 2011).

A ideia básica é seguir o caminho das partículas individuais por amostragem aleatória pela lei de probabilidade que descreve o comportamento da partícula real. A fim de reduzir o ruído estatístico para um nível aceitável e com precisão se correlacionam com os resultados experimentais, o número de fótons deve geralmente ser grande, conduzindo assim a uma pesada carga computacional (HUGONNARD; GLIÈRE, 1999).

2.4.2 Programa MCNPX

O MCNPX é um código de computador livre porém restrito, que modela a interação da radiação com a matéria utilizando o método de Monte Carlo, e simula quase todas as partículas e energias. A data de lançamento oficial do MCNPX 2.7.0 foi em abril de 2011. O MCNPX começou em 1994 como um projeto de código-fusão de MCNP 4B e LAHET 2.8. Em 2002, o MCNPX foi atualizado para MCNP 4C, convertidos em Fortran 90, reforçada com 12 novos recursos e liberado para o público como a versão 2.4.0. O lançamento da versão 2.7.0 inclui muitas características novas descritas no "MCNPX Extensões Versão 2.7.0" (RSICC, 2011).

O MCNP tem sido considerado como uma potente ferramenta para simulação, com bibliotecas para nêutrons, prótons, elétrons, prótons, interações foto-nucleares (RSICC, 2011) e transporte em três dimensões através de uma geometria complexa em qualquer material além de ser utilizado em uma variedade de aplicações. As contagens de malha e radiografia foram incluídas em 2 e 3 dimensões para fins de formação de imagens. O MCNPX é um código de transporte de radiação Monte Carlo para N-Partículas que amplia as capacidades do MCNP4C. Tal como acontece com MCNP,

MCNPX utiliza tabelas de dados nucleares para transporte de nêutrons, fótons e elétrons. Ao contrário MCNP, o MCNPX também usa tabelas de dados nucleares para transporte de prótons e modelos físicos para o transporte de 30 tipos de partículas adicionais, por exemplo: deutérios, alfas, píons, múons, entre outras, (WATERS, 2002) e para modelos físicos de transporte de nêutrons quando os dados tabelados não estão disponíveis ou quando os dados estão acima da faixa da energia (20 a 150 MeV), no MCNPX pode misturar e combinar tabelas de dados e modelos físicos ao longo de um problema. Por exemplo, o MCNPX pode modelar transporte de nêutrons em um detector de partículas de germanato de bismuto (BGO) usando tabelas de dados do bismuto e do oxigênio, e usa modelos físicos do germânio (HENDRICKS, 2003).

Os códigos para simulação com o MCNPX são escritos em um arquivo no formato .txt. Esses códigos expressão a geometria do sistema considerado, tal como um feixe gama, por exemplo de 0,662 MeV, proveniente da fonte de Cs137, que incide sobre uma placa de aço. Um código em MCNPX possui a forma geral: Cartão de Células; Cartão de Superfícies; Cartão de Dados.

No cartão células, cada célula corresponde à determinada região do espaço e é definida com seu respectivo número de célula, número do material, densidade do material, lista de operadores e sinais que especificam as superfícies que delimitam a célula. No cartão de superfície, informam-se os elementos geométricos utilizados na simulação, tais como: plano, esfera, cilindro, cone, elipsoide, hiperboloide, parabolóide, elíptico etc. O último, o cartão de dados, chamado cartão de dados é onde definimos o tipo de radiação, materiais constitutivos das superfícies, especificações da fonte, forma de registro e número de histórias (MCNPX, 2005).

As grandezas físicas requeridas pelo usuário são impressas no arquivo saída, acompanhadas do valor R, que é o desvio padrão (DV) S_x da média sobre a média $\bar{x}$, como pode ser observado na equação 9:

$$R = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (9)$$

Como o desvio padrão da média é proporcional a $1/\sqrt{N}$, R também é proporcional a esta quantidade. Dessa forma, pode-se diminuir o valor de R aumentando o valor de N, a quantidade de histórias da simulação. Esse erro relativo pode ser utilizado para construir um intervalo de confiança em torno da média. De acordo com o

teorema do limite central, quando N se aproxima do infinito, existe 68% de chance de o verdadeiro valor estar no intervalo $\bar{x}$ ($1 \pm R$), 95% de estar em $\bar{x}$ ($1 \pm 2R$) e 99,73% de estar no intervalo $\bar{x}$ ($1 \pm 3R$). Esses intervalos de confiança referem-se à precisão da simulação de Monte Carlo e, não, a um desvio em relação ao valor experimental (GUEDES, 2016).

Dessa forma, pode-se interpretar a qualidade do resultado gerado pela simulação, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1- Avaliação da qualidade da simulação de acordo com R .

R	Qualidade do Resultado
0,5 a 1	Desprezível
0,2 a 0,5	Pouco significativo
0,1 a 0,2	Questionável
< 0,1	Geralmente confiável
< 0,05	Confiável

Fonte: GUEDES (2016)

Ao executar os arquivos correspondentes ao procedimento de varredura, o código de Monte Carlo retorna, para cada arquivo de entrada, três arquivos de saída nos formatos (.txto), (.txtr) e (.txtm). Os arquivos de saída revelam o que aconteceu em toda simulação e os resultados requeridos pelo usuário. Dessa forma, para recuperar esses resultados, o programador precisaria abrir cada um dos arquivos e retirá-los para análise. (GUEDES, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, método de ensaio não destrutivo por tomografia gama será utilizado na inspeção de solda um aço naval.

3.1 SOLDAGEM DA CHAPA NAVAL

Para o experimento foram soldadas sete chapas de metal base (MB) do Aço ASTM A-131 AH 36 com 13,7 mm de espessura e dimensões de 100 mm por 150 mm, chanfradas com ângulo de Bisel de 25°. A composição deste Aço pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2- Composição química do aço A131 grau AH 36.

Espec.	C	Mn	Si	P	S	Outros
AH 36	0.18	0.9-1.60	0.1-0.5	0.04	0.04	1.23

Fonte: BENAIFER (2017)

As chapas foram soldadas pelo processo MAG, utilizando arame de solda tipo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, que tem a composição mostrada na Tabela 3.

Tabela 3- Composição química do arame de solda AWS ER70S-6.

Espec.	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
ER70S-6	0.06-0.15	0.8-1.15	1.4-1.85	0.035	0.025	0.5	0.15	0.15	0.15	0.03

Fonte: GERDAU (2017)

Para realizar a soldagem das chapas, os seguintes parâmetros listados na Tabela 4 foram adotados. A soldagem foi realizada de forma semiautomática utilizando um sistema para movimentar a tocha na velocidade requerida e como gás de proteção foi utilizada a mistura Ar -25% CO₂.

Tabela 4- Parâmetros utilizados na soldagem.

Parâmetros	Corrente	Tensão	Velocidade de soldagem	Vazão do Gás	Velocidade do arame	Altura da tocha
Valor	140 A	22 V	6 mm/s	18 L/min	6 m/min	8 mm

Fonte: Autor (2018)

As chapas foram confeccionadas de forma que pudesse ser feito um estudo comparativo de qualidade da solda. Uma chapa foi soldada levando em conta todos os parâmetros citados, figura 14, e tomando todos os cuidados necessários para ser feita uma solda sem descontinuidades, para ser usada como solda de referência. Nas outras chapas foram propositalmente produzidas diferentes tipos de descontinuidades, comumente encontrados em soldas decorrentes de algum erro durante o processo de soldagem. Uma avaliação microestrutural, foi realizada uma comparação da resposta do tomógrafo nas chapas com descontinuidades em relação à chapa de referência.

Figura 14- Processo de soldagem e a junta soldada.



Fonte: Autor (2017)

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA

As descontinuidades foram introduzidas com a finalidade de simular problemas recorrentes na indústria naval que alteram significativamente a qualidade da solda. As chapas de teste com os tipos de descontinuidades (defeitos) mais frequentes neste tipo de indústria são apresentados abaixo:

- Chapa 00 – Solda de Referência. Esta chapa foi soldada com todos os cuidados necessários para não fugir dos parâmetros de soldagem estabelecidos.
- Chapa 01 – Solda feita em condições de vento. Esta chapa foi soldada com um fluxo de ar, com velocidade de 4,5 m/s, apontado para o arco elétrico, simulando condições de soldagem sob influência do vento, o que cria descontinuidades como porosidade e falta de fusão. Em estaleiros navais, é comum a soldagem de chapas ao ar livre durante a construção de navios, a exemplo dos encontrados no Nordeste do Brasil onde é registrada a média anual com ventos de 2,3 a 4,5 m/s segundo dados da carta eólica produzida para região.
- Chapa 02 – Sem escovar a escória entre os cordões de solda. A chapa soldada sem escovação da escória entre os cordões apresenta um filme de escória vítrea depositada após cada passe. Esta escória vítrea tende a se acumular e, após sucessivos passes, faz surgir descontinuidades prejudiciais ao cordão solda.
- Chapa 03 – Preenchida com um único cordão. Esta solda foi feita preenchendo-se todo o chanfro com um único cordão de solda manualmente, algo não indicado por frequentemente propiciar o surgimento de grandes descontinuidades, comparado ao método de vários passes automatizados.
- Chapa 04 – Adição de contaminantes entre os cordões de solda. Nesta amostra, foi adicionado entre os cordões de solda partículas de vidro, numa metade da chapa identificada como Chapa 04V e, na outra metade, fragmentos de alumínio, identificada como Chapa 04A. Estes contaminantes simulam a má especificação do eletrodo (caso do vidro) ou a baixa dissolução do eletrodo com o metal de base (caso do alumínio), quando é utilizada uma soldagem com corrente abaixo da especificada.
- Chapa 05 – Solda feita com falha do gás de proteção. O gás de proteção, além de contribuir para formação da escória, também é responsável por manter a estabilidade do arco elétrico, evitando a formação de bolhas e a oxidação da poça de fusão. Uma eventual falha ou falta deste gás durante a soldagem poderá produzir grandes descontinuidades gerando um alto índice de retrabalho na indústria.
- Chapa 06 – Solda feita totalmente manual por pessoa inexperiente em soldagem. Esta chapa foi soldada para observar a influência na qualidade da soldagem manual feita por uma pessoa sem experiência. Este problema comum na indústria naval é devido, principalmente, a rotatividade de pessoal. Um

profissional iniciante, com pouca experiência, sempre acaba produzindo soldas com descontinuidades que conduzem ao retrabalho, diminuindo o índice de produtividade na empresa.

Após a fabricação de todos os corpos de prova, foi retirado os ressalto das soldas. Isto porque na construção naval, os ressalto das juntas soldadas são retirados, normalmente com esmeril, para deixar a superfície da chapa plana. Como mostra a figura 15.

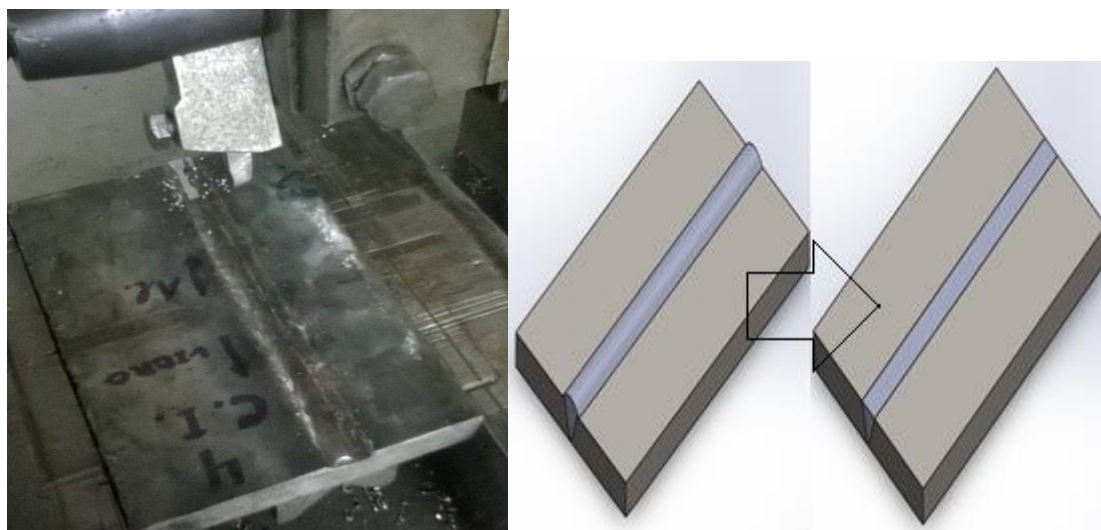
Figura 15- Esmerilhamento do ressalto da solda.



Fonte: NWN (2017)

Para este processo, foi utilizada uma plaina limadora. Desta forma foi possível garantir uma retirada do ressalto sem comprometer a integridade da solda, conforme mostra a figura 16. O esmeril foi utilizado posteriormente para fazer o acabamento.

Figura 16- Aplainamento da solda, antes e depois.



Fonte: Autor (2017)

Com esse tipo de processo nos atemos às descontinuidades mais internas decorrentes do processo de soldagem, minimizando a variação de espessura criada pelo ressalto durante a tomografia.

3.3 METALOGRAFIA

A estrutura de cada junta soldada foi observada através de uma caracterização microestrutural feita após uma preparação metalográfica tradicional. Podendo assim observar a qualidade de cada solda pelas imagens microscópicas.

Neste tipo de ensaio, para cada corpo de prova foram retiradas amostras com cortes transversais do cordão de solda, para análises. Os corpos de provas preparados para análise microscópica foram retificados para garantir o paralelismo, com isso uma melhor qualidade de imagem e foram lixados, polidos e atacados quimicamente, como segue:

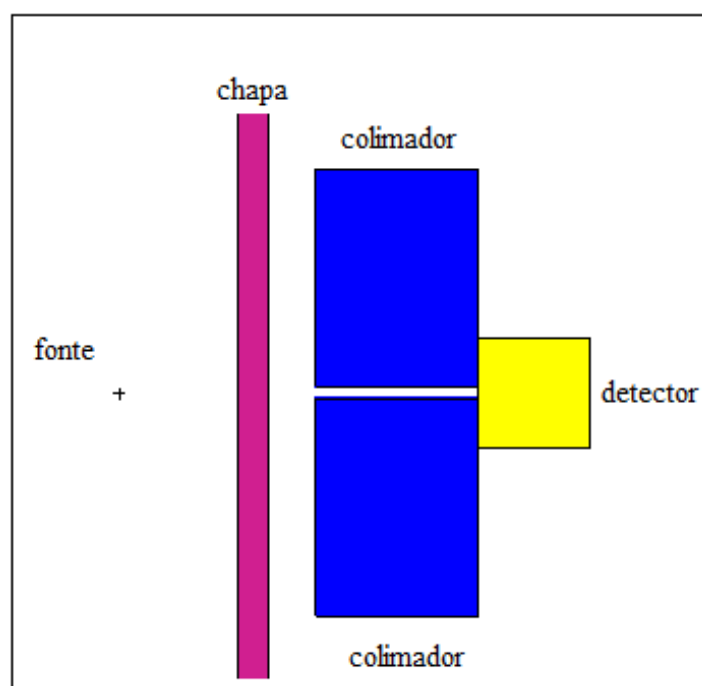
- Lixamento: foram utilizadas lixas de diferentes granulometrias na seguinte ordem: 220, 320, 400, 600 e 1000 *mesh*;
- Polimento: Após o lixamento as amostras foram polidas usando pasta diamantada de 1 μm ;
- Ataque químico: Com as amostras devidamente polidas, foi realizado o ataque químico com o reagente Nital 5%, 5 ml de ácido nítrico para 100 ml de álcool etílico.

As análises microscópicas foram realizadas com magnificação de 50 e 100 vezes.

3.4 SIMULAÇÃO MCNPX

A simulação da chapa foi realizada utilizando os mesmos parâmetros do experimento descrito na Seção 3.5 e *script* no MCNPX como mostra no Anexo I. A figura 17 mostra o esquema da simulação, realizado com 10^6 histórias. Os resultados da simulação servem para provar que parâmetros estabelecidos no experimento fornecem dados favoráveis para realização do ensaio e análise das medidas nas chapas soldadas. Para estabelecer o limite de detecção de uma descontinuidade, foi realizada simulação de descontinuidades em formato de esferas de ar, vazios, com diferentes diâmetros e comparado com o resultado experimental. Os diâmetros das descontinuidades simuladas foram: 0 mm (sem defeito), 0,001 mm, 0,01 mm, 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, e 3 mm.

Figura 17- Esquema da simulação.



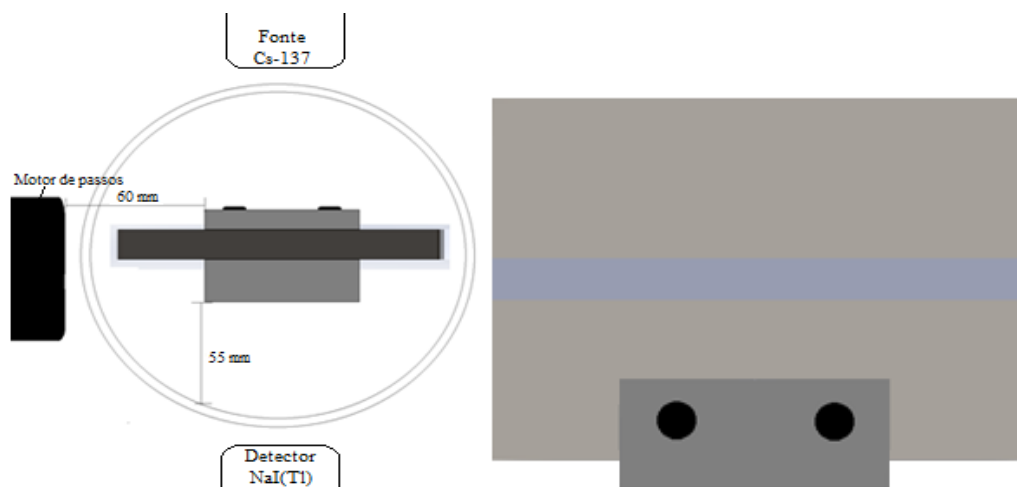
Fonte: Autor (2017)

3.5 TOMOGRAFIA GAMA

O ensaio foi realizado em um tomógrafo gama de primeira geração no Departamento de Energia Nuclear da UFPE. O tomógrafo é composto por uma fonte de Césio-137, com atividade da ordem de 200 mCi, que emite raios gama com energia de 0,662 MeV, acoplado a um detector de Iodeto de Sódio dopado com Tálcio, NaI(Tl) colimado com 5,5 mm de abertura. A distância fonte detector foi de 33,9 cm.

No tomógrafo gama a chapa foi fixada no suporte, no centro da mesa, que deu 99 passos, cada passo com 1 mm e 10 s de contagem. A chapa foi devidamente colocada, sempre com o centro da chapa, posicionada no centro do suporte, como mostra a figura 18. Foi feito movimento horizontal para varrer o cordão de solda e o metal base. Com uma altura na vertical variando de 3 mm em 3 mm para cada varredura.

Figura 18- Esquema do posicionamento para tomografia com a solda horizontal.



Fonte: Autor (2017)

Os resultados obtidos no tomógrafo são em forma de números de contagens, para cada ponto de leitura. Eles serão os dados do experimento utilizados para analisar as amostras. Maiores contagens correspondem a menores espessuras de material em relação a referência, o que levantará a suspeita de uma descontinuidade neste local.

Para o cálculo da densidade radiométrica, ρ_m foi utilizada a Equação 10 (BARTOLOMEW; CASAGRANDE, 1957) baseada na Equação 1 (DANTAS et al., 2008), foi realizado por Oliveira (2017) e está mostrado na Tabela 5, junto com os

valores do coeficiente de atenuação linear, densidade radiométrica e coeficiente de atenuação mássico, do metal base e da solda para o Aço A131 AH 36 e solda com eletrodo ER70S-6, em que μ_m (m^2 / kg), é o coeficiente de atenuação mássico, D é o diâmetro do tubo, no caso de chapas a sua espessura, I_v e I_f são as intensidades com um tubo vazio e em condição de fluxo, respectivamente. Esta equação pode ser adotada substituindo, I_v por I_0 e I_f por I referentes da Equação 1.

$$\rho_m = \frac{1}{\mu_m D} \ln \frac{I_v}{I_f} \quad (10)$$

Tabela 5- Características do metal base e da solda.

	$\mu(cm^{-1})$	$\rho(g/cm^3)$	$\mu_{m,exp}(cm^2/g)$	$\mu_{m,nist}$ $xcom(cm^2/g)$
Metal Base	0,569	7,745	0,07420	0,07346
Solda	0,579	7,899	0,07309	0,07330

Fonte: OLIVEIRA (2017)

Através da Tabela 5 e utilizando a Equação 10 tem-se: Coeficiente de atenuação linear mássico do MB: $\mu_m = 0,0742$ e da Solda: $\mu_m = 0,07309$. Dessa forma bate com os resultados de referência do NIST XCOM e o experimento de Oliveira (2017).

A densidade gravimétrica foi calculada pela Equação 11:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (11)$$

Onde “ ρ ” é a densidade gravimétrica, “ m ” a massa e “ V ” o volume. O volume foi medido usinando as amostras em formato de paralelepípedo com arestas alinhadas por uma fresadora para garantir que fiquem no esquadro e mensuradas com um micrometro. Em seguida foram pesadas, utilizando uma balança de precisão Analítica ATY 224 do fabricante Shimadzu, com capacidade de 220g e precisão de 0,1 mg. Com esses valores foi calculada a densidade, ρ , de cada amostra.

Com o tomógrafo foi feito a leitura do “ I_0 ”, que é a intensidade de radiação medida no tomógrafo sem corpo de prova. Para isto foram realizadas dez medições com duração de 10 s cada, e depois tirada uma média dos valores.

Com os resultados dos valores de densidade e coeficientes de atenuação obtidos, pode-se calcular o volume. Lembrando que volume do feixe de radiação que atravessa o material e chega ao detector tem formato cilíndrico com 5,5 mm de diâmetro, desta

forma, foi calculado, utilizando a Equação 12, o volume “V” de material que o feixe atravessa com raio “r” pela espessura “h”, onde h é obtido pela Equação 16:

$$V = \pi r^2 h \quad (12)$$

Assim é possível calcular o volume que engloba toda uma varredura tomográfica. Segundo Alyassin (1994) em seu trabalho, realizou tomografia com raios-X em esferas de madeira e calculou o volume delas segunda a Equação 13.

$$Volume = k_x \sum (x_i n_{xi} \Delta a_i) + k_y \sum (y_i n_{yi} \Delta a_i) + k_z \sum (z_i n_{zi} \Delta a_i) \quad (13)$$

Onde x, y e z são coordenadas. k_x , k_y e k_z coeficientes que a soma é igual a um. Δa área da superfície. Assim para calcular o volume de uma simples espessura de um corte tomográfico Δz , para $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$ simplificando na Equação 14:

$$Volume = k_x \sum_i^m x_i n_{xi} \Delta a_i + k_y \sum_i^m y_i n_{yi} \Delta a_i \quad (14)$$

Em que “m” é o número de pontos no corte tomográfico, a soma de k_x e k_y igual a um. Dessa forma $(x_i n_{xi} \Delta a_i)$ se aproxima o volume diferencial do elemento de comprimento “x” e secção de área $(n_{xi} \Delta a_i)$.

Tomando como base a Equação 14 para calcular o volume, lembrando que o experimento foi realizado com leitura em apenas um plano e não em três dimensões como a equação sugere e lembrando que o feixe de radiação atravessa a chapa em formato cilíndrico, o volume foi calculado utilizando a área da superfície de cada leitura pelo seu comprimento h_i , subtraindo pela sobreposição das leituras, como mostra a Equação 15.

$$Volume = \pi r^2 \cdot h_1 + (\sum_{i=1}^{98} \pi r^2 \cdot h_{i+1} - 0,091415 \cdot h_i - |h_i - h_{i+1}|) \quad (15)$$

Onde “r” é o raio do feixe gama 2,75 mm sempre constante. 0,091415 mm² é a área da superfície de cada sobreposição dos cilindros. “h” a altura em cada passo da leitura que foi calculado pela Equação 1 de Beer-Lambert como mostra a Equação 16:

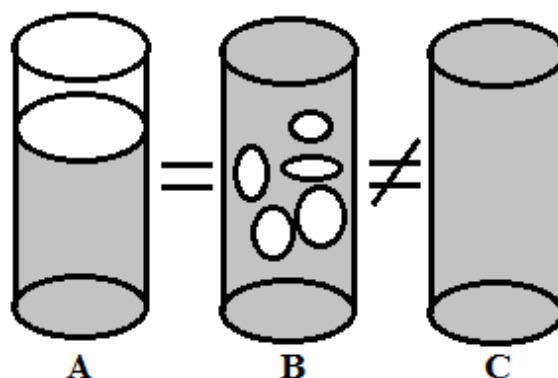
$$h = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (16)$$

Calculando o erro percentual entre o volume calculado “vc” e o de referência “vr” como mostra a Equação 17. O limite de erro estabelecido foi de 5%. (ALYASSIN,1994).

$$Erro(\%) = \frac{vc - vr}{vc} \cdot 100 \quad (17)$$

Considerando que uma descontinuidade representa um espaço vazio decorrente da falta de material que preencheria a solda dentro do volume de um feixe de radiação, em formato cilíndrico que atravessa o material, podemos considerar que o tamanho da descontinuidade corresponde a uma espessura menor de material. Como mostra a figura 19.

Figura 19- No esquema é mostrado em A e B diferentes formates de descontinuidades com o mesmo volume que um feixe gama atravessa e em C temos um exemplo esquemático de uma leitura sem descontinuidade.



Fonte: Autor (2018)

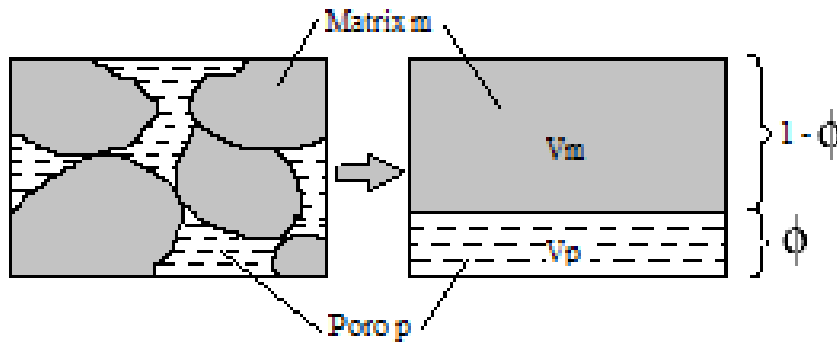
Através do resultado foi calculado o volume aparente de material, V_c , para cada leitura “I”, através da Equação 12. A Equação 16 foi utilizada para encontrar a espessura.

Logo o volume da descontinuidade, V_d , dentro em cada leitura “I” é dado subtraindo o volume total da leitura com material totalmente preenchido, V_t que o feixe atravessa, do volume de material aparente, formando a Equação 18.

$$V_d = V_t - V_c \quad (18)$$

Este método se aproxima bastante do trabalhado descrito por SCHON (2015) para calcular o percentual de porosidade em rochas. Onde descreveu que a porosidade total é a relação entre o volume poroso e volume total da rocha, figura 20.

Figura 20- Definição de porosidade.



Fonte: SCHON (2015)

Logo, através da Equação 19, utilizada por Schon (2015), é possível calcular o percentual de porosidade:

$$\phi = \left(\frac{v_p}{v_t} \right) \cdot 100 \quad (19)$$

Em que, ϕ é a porosidade, v_p o volume da parte porosa e v_t o volume total da amostra. No entanto, pelo método utilizando transmissão gama, é possível estimar a porosidade relacionando o valor de densidade da amostra (PIRES, 2002), expressa pela Equação 20:

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho} \right) \cdot 100 \quad (20)$$

Onde ρ_m é a densidade radiométrica da transmissão gama do material, obtida pela Equação 10. ρ a densidade do material utilizado no experimento fornecido pela literatura, a exemplo do NIST XCOM. A porosidade também foi calculada com ρ obtido pela Equação 11. Critério de aceitação de porosidade aplicável a estruturas metálicas de aço carbono segundo Norma AWS D1.1 não devem exceder 1 mm a cada 100 mm de material.

3.6 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

Para quantificar a correlação dos valores entre a solda de referência e cada solda com descontinuidade, observando a homogeneidade entre elas, foi calculado o coeficiente de correlação. Atribuindo o coeficiente de correlação de Pearson, (MOURA, et al. 2015), Equação 21 dado por:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (21)$$

Em que x_i e y_i são as variáveis consideradas, com médias dadas respectivamente por $\bar{x}$ e $\bar{y}$. Essa grandeza é uma medida do grau de associação linear entre as variáveis x e y . Interpretando a variável $(x_i - \bar{x})$, como um vetor, pode-se escrever o coeficiente de correlação dado pela Equação 21, como o cosseno do ângulo entre cada par de variável (MOURA, et al. 2015), como mostra a Equação 22:

$$\cos \alpha = \frac{x^T y}{|x||y|} \quad (22)$$

Pode-se avaliar a distância ou os erros entre os dados simulados, experimentais e analíticos através da raiz quadrada do erro quadrático médio, mostrado na Equação 23:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (T_{i,j} - E_{i,j})^2}. \quad (23)$$

Em que $T_{i,j}$ e $E_{i,j}$ são matrizes de tamanho N_1 linhas e N_2 colunas. Essa métrica é recomendada pela agência internacional de energia atômica para comparação dos erros associados ao coeficiente de atenuação linear (IAEA, 2008). Assim valores próximos de 1 ou -1 indicam uma boa correlação, mais homogênea. Quanto mais a correlação for ficando afastados de 1 ou -1, mais heterogeneia fica e pior é a correlação dos valores.

3.7 O MODELO CLUSTER HIERÁRQUICO

No atual ambiente de processamento de dados, as instalações instrumentais combinam algoritmos computacionais e modelos estatísticos multivariados para obter resultados eficazes (KAUFMAN; ROUSSEEUW, 2005).

Uma quantidade grande de algoritmos e programas de computador tem sido desenvolvidos, com o intuito de organizar dados por *clusters* (KAUFMAN; ROUSSEEUW, 2005).

Existem diversas abordagens de *clustering*, tais como: probabilística, otimização, particionais e hierárquica (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999). Cada uma utiliza uma maneira diferente para a identificação e representação dos *clusters*. Para reduzir a quantidade de variáveis nos conjuntos de dados espectrais, as abordagens de múltiplas variáveis, como análise de agrupamento hierárquico são extremamente úteis (BANAS *et al.*, 2013).

A interação do fóton em medidas de transmissão fornece informações volumétricas da amostra. Neste trabalho foi empregada a clusterização hierárquica para avaliar a descontinuidade da solda em um método de agrupamento espectral. É possível projetar o modelo para localizar as descontinuidades, que é intrínseco ao processamento de dados. Para determinado conjunto de dados, algumas métricas podem ser testadas pelo coeficiente de correlação cofenética, (SARALI; DOGAN; DOGAN, 2013). Esse coeficiente é utilizado para verificar a concordância do padrão de agrupamento em relação as suas dissimilaridades.

No entanto, duas técnicas principais de *clustering*: particionais, as quais constroem uma partição dos dados; e os *clustering* hierárquicos, nas quais os dados não são divididos em um número específico de classes. Em vez disso, o agrupamento é realizado em uma série de etapas que podem começar com todos os n indivíduos, em um único *cluster* ou cada elemento em *clusters* individuais. Essa forma de agrupamento hierárquico pode ser dividida em métodos aglomerativos, que consiste em uma série de sucessivas fusões, nas quais cada elemento está inicialmente em n *clusters* individuais, ou métodos divisivos, assim chamados, que separam todos os elementos inicialmente em um único *cluster*, em *clusters* individuais.

Nesse caso, são utilizados algoritmos de aprendizado para descobrir padrões nos dados a partir de alguma caracterização de regularidade. Um algoritmo de agrupamento recebe um conjunto de vetores e os agrupa com base em um critério ou em alguma outra

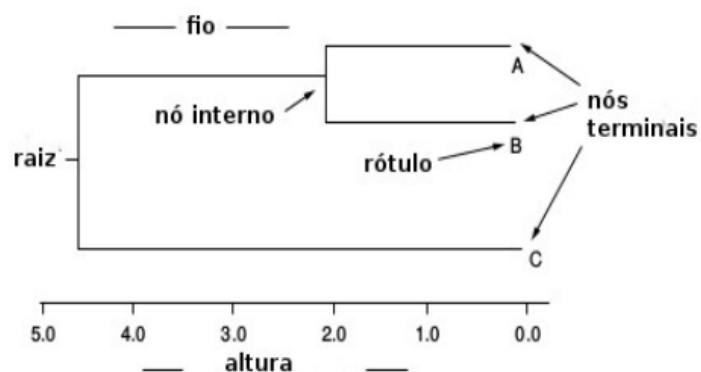
regra de otimização (DALTON; BALLARIN; BRUN, 2009). Assim, a tarefa consiste em agrupar uma coleção de exemplos segundo alguma medida de similaridade de modo que, exemplos pertencentes ao mesmo *cluster* devem ser mais similares entre si e menos similares aos exemplos pertencentes a *clusters* diferentes (EVERITT, 1993). Como a utilização do limiar em efeito *clustering*, os dados em dois grupos com base na medida de intensidade unidimensional (ROSENFELD; SCHNEIDER; HUANG, 1969; DUNN; JANOS; ROSENFELD, 1974).

Neste trabalho, os agrupamentos foram obtidos por meio de um algoritmo de *clustering* hierárquico, o qual representa os *clusters* em uma estrutura conhecida como dendrograma. O dendrograma hierárquico traça os resultados da função de ligação. Uma varredura computadorizada de raios gama é um sistema adequado para gerar dados para uma investigação de descontinuidade de solda.

Todo o processo de clusterização pode ser visualizado por meio de um dendrograma. A figura 21 é um esquema que mostra algumas terminologias. Dendrograma são diagramas de árvore que são uma representação gráfica de um agrupamento hierárquico de um conjunto de dados. Eles são frequentemente usados em biologia computacional para ilustrar o agrupamento de genes ou amostras. A hierarquia é parametrizada pela distância de agrupamento “d” e o dendrograma mostra como os *clusters* mudam à medida que “d” muda. Para “d” suficientemente pequeno, cada *cluster* contém apenas um ponto. À medida que “d” aumenta, pares de *clusters* são mesclados em *clusters* maiores. Para “d” suficientemente grande, existe apenas um *cluster* (ESPINOZA, 2011).

Os nós terminais ou nós internos do dendrograma são os *clusters*. As alturas são as distâncias onde os objetos tornaram-se um único *cluster*. Os nomes dados aos objetos nos nós terminais são seus rótulos. A altura desde um nó interno a raiz, o ponto mais alto do dendrograma, é denominada fio (OLIVEIRA, 2017).

Figura 21- Partes de um dendrograma.



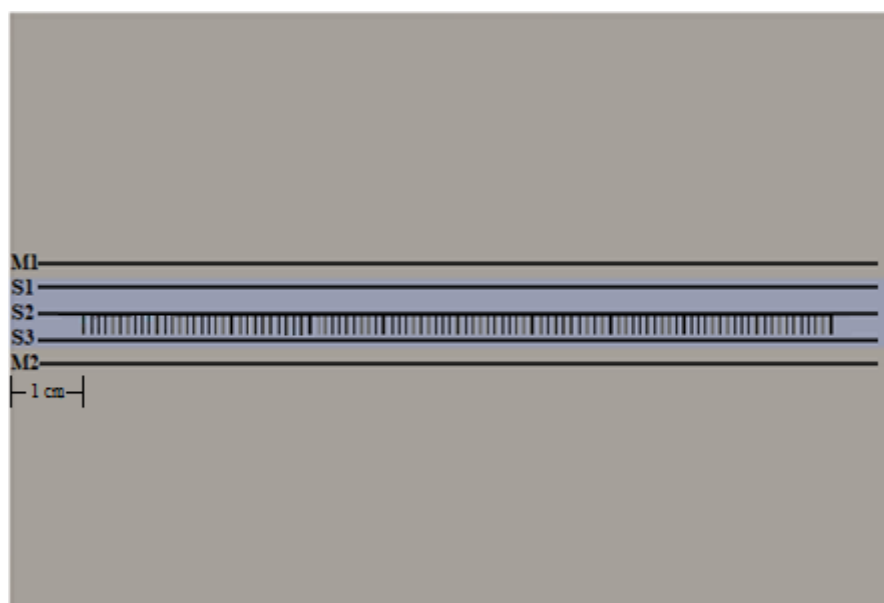
Fonte: EVERITT *et al.*(2011)

A função dendrograma é usada para calcular e exibir a hierarquia de *clusters*. Avaliações de tubos soldados utilizando o coeficiente de correlação de Pearson e dendrograma foram realizadas em Moura *et al.* (2015). No trabalho citado, algumas estratégias foram adotadas com o objetivo de localizar as discontinuidades encontrados em tubos soldados. Pode-se citar, entre estas técnicas, a tentativa de detectar perturbações aleatórias e determinísticas introduzidas na matriz de dados.

3.8 LOCALIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

Com a detecção das discontinuidades, é necessário localizá-los na solda. Além da análise *clusters* para localizar a solda com discontinuidade. De forma geral conhecendo o passo e a dimensão do seu deslocamento que uma leitura foi realizada na altura da varredura tomográfica, o local onde ocorreu um pico de contagem correspondente a uma espessura de material ou porosidade, já descrito anteriormente, onde é uma possível localização de uma discontinuidade na solda. Na figura 22 está um desenho esquemático dos corpos de prova. As linhas M1, S1, S2, S3 e M2 correspondem as alturas de todas as varreduras realizada, com 3 mm de distancia entre elas. A régua no centro da imagem corresponde a cada passo realizado com 1 mm de distancia um do outro, iniciado sempre a 1 cm do início da chapa. Dessa forma, o número do passo onde apresento maior contagem na varredura, corresponde ao local da chapa onde a discontinuidade está localizada.

Figura 22- Localizando as descontinuidades.



Fonte: Autor (2018)

Porém é de suma importância que durante a realização da tomografia o posicionamento da amostra no tomógrafo esteja ajustado de forma a não alterar as medidas de distancia da peça em relação ao leitor e fonte, durante todo o ensaio da peça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

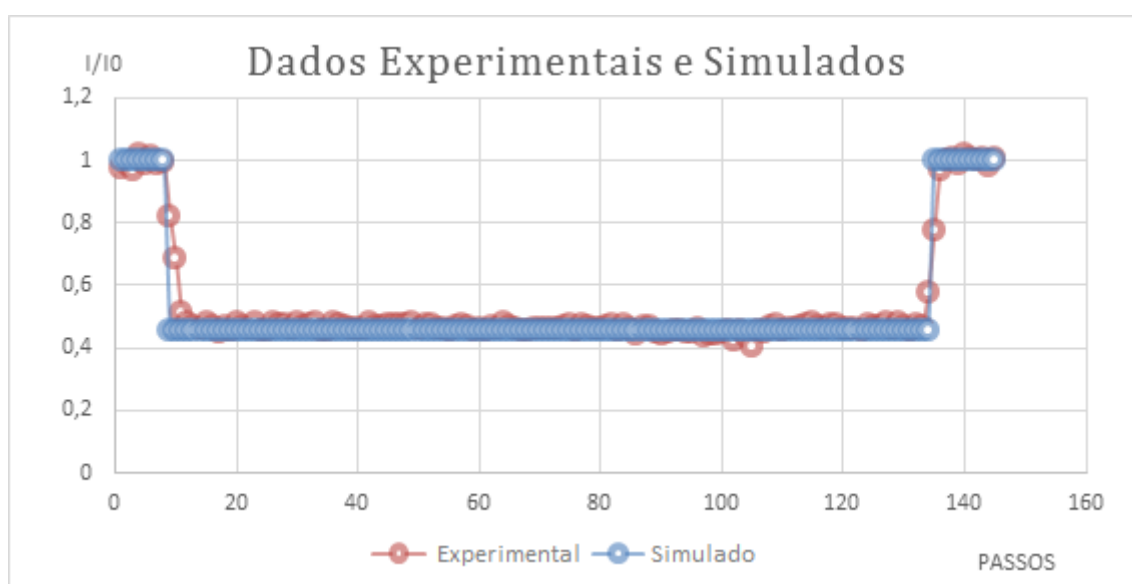
Pelos resultados obtidos, a densidade gravimétrica, calculada pela Equação 11 do MB é 7,7462 g/cm³. Pela Equação 10, a densidade radiométrica do metal base foi 7,7409 g/cm³. Resultado bem próximo do fornecido pelo NIST XCOM que foi de 7,745 g/cm³.

As medidas da densidade gravimétrica da solda foram encontrados resultados de 7,8035 g/cm³ e a radiométrica de 7,885 g/cm³, aproximadas segundo o NIST XCOM a densidade da solda é de 7,89 g/cm³.

4.1 RESULTADO DA SIMULAÇÃO

Pelos resultados da simulação é possível observar na figura 23 os gráficos da intensidade relativa I/I_0 da radiação gama, em função dos passos, através da chapa de referência, que mostra a concordância entre simulação do MCNPX e as medidas experimentais da tomografia gama indicando que os parâmetros adotados no experimento fornecem medidas adequadas para realizar a inspeção da chapa soldada. O resultado da simulação na chapa foi coerente com os resultados obtidos por Oliveira (2017) que simulou um ensaio com tomografia gama em tubos de aço soldados, de mesmos materiais, Aço A131 AH 36 e solda com eletrodo ER70S-6.

Figura 23- Simulação e Resultados Experimentais chapa soldada.



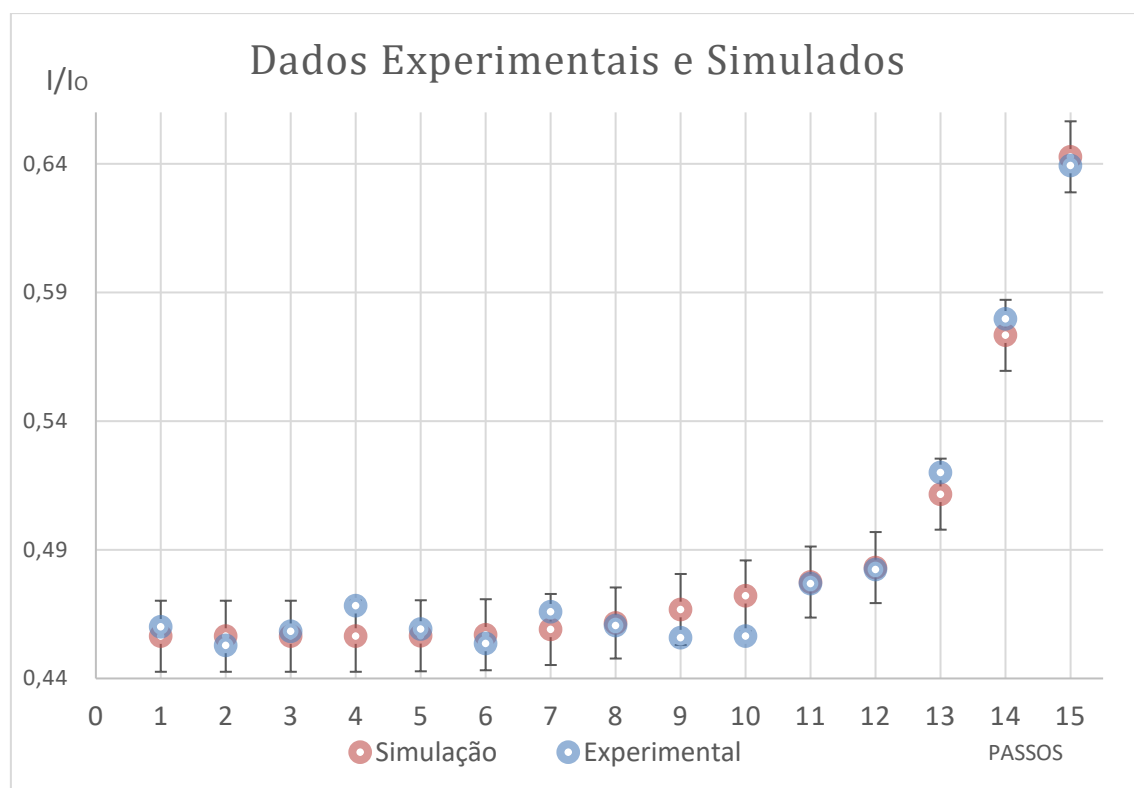
Fonte: Autor (2018)

No gráfico da figura 24 temos uma comparação entre descontinuidades experimentais e simuladas, com dimensões mostradas na Tabela 6. Nos passos de 1, 2, 3, e 4 a simulação foi comparada com regiões onde não existiam descontinuidades. Nos passos 5, 6, 7, 8, 9 e 10 foi simulado descontinuidades com 0,001 mm, 0,01 mm, 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, e 0,3 mm, respectivamente, porém com essas dimensões não foi possível diferenciar o que é ou não uma descontinuidade.

A partir do passo 11, com uma descontinuidade de 0,4 mm passou a ser possível evidenciá-la, sendo este o limite de detecção encontrado no experimento. Oliveira (2017) obteve espessura limite de 0,25 mm em solda de tubos.

Ainda na figura 24, nos passos 12, 13, 14 e 15 foram simuladas descontinuidades com 0,5 mm, 1 mm, 2 mm e 3 mm, onde as intensidades encontram-se próximas e dentro do erro dos resultados experimentais. O intervalo dos resultados da simulação teve uma variação de 0,17 apresentando um percentual de erro de 4,6%. Esta simulação apresentou qualidade do resultado com confiabilidade 0,0024, considerado confiável de acordo com a Tabela 1, Secção 2.4.2.

Figura 24- Gráfico mostrando descontinuidades experimentais e simuladas.



Fonte: Autor (2019)

Tabela 6- Valores do Experimento e Simulação.

Descontinuidade mm	Simulação I/I ₀	Experimento I/I ₀
0	0,4564	0,4601
0	0,4564	0,4528
0	0,4564	0,4582
0	0,4564	0,4683
0,001	0,4565	0,4591
0,01	0,4570	0,4535
0,05	0,4590	0,4659
0,1	0,4615	0,4605
0,2	0,4668	0,4558
0,3	0,4720	0,4564
0,4	0,4774	0,4769
0,5	0,4831	0,4822
1	0,5116	0,5200
2	0,5733	0,5797
3	0,6427	0,6392

Fonte: Autor (2018)

Baseados nos resultados da simulação e do experimento as descontinuidades foram detectadas com o mínimo de 0,4 mm, conforme evidenciado no gráfico da figura 24. Moura *et al.*(2015) em seu trabalho com tomografia gamma com fonte de Cs-137 detectou a menor descontinuidade com 0,3 mm; embora tenha utilizado uma configuração diferente da utilizada neste trabalho. Porém atualmente já existam equipamentos tomográficos que atingem resoluções espaciais menores que 4 µm, chamados microtomógrafos (NETO *et al.*,2011).

Adams (2017) utilizou *phantom* em tomografia gama com fonte de Co-60 e detector cintilador de CsI(Tl) determinou resolução espacial de cerca de 1,3 a 2,5 mm.

Mariscotti *et al.*(2009) em um trabalho com inspeção de corrosão em varão de aço em concreto armado usando gamagrafia com fonte de Ir-192 e filme *image plate*, encontrou defeito com um mínimo de 2 mm de espessura.

Utilizando ultrassom com a técnica de TOFD (*time of flight diffraction*) para inspecionar solda, Carvalho *et al.*(2008) tiveram um limite de detecção entre 1 e 2 mm.

Apesar de existirem filmes radiográficos com resolução de até 50 μm (0,05 mm), utilizando gamagrafia com fonte de Co-60 e radiografia, Carvalho *et al.*(2008) não conseguiram detectar as discontinuidades na solda do seu trabalho pois, apesar da sensibilidade do filme, a sobreposição de estruturas e uma limitação devido ao posicionamento da falha em relação ao modo de aquisição da radiografia ou gamagrafia, mascarou as discontinuidades. Segundo Morgan *et al.*(2003), este tipo de defeito não pode ser detectado por técnica de radiografia/gamagrafia.

Segundo Andreucci (2013) o método de ensaio por líquidos penetrantes, atualmente é capaz de revelar discontinuidades extremamente finas, da ordem de 1 μm de abertura, porém, esta análise limita-se apenas na superfície da peça.

Andreucci (2014) mostrou que o diâmetro mínimo de uma discontinuidade detectável com ultrassom na frequência de 4 MHz em peças de aço é de 0,75 mm. Mas este tipo de ensaio apresenta limitação na inspeção de chapas finas, menores que 5 mm de espessura.

O Código ASME Sec. VIII Div.1 estabelece que em ensaios com partículas magnéticas só são consideradas relevantes detecção de discontinuidades acima de 1,5 mm. Uma grande limitação desta técnica é que a trinca precisa estar perpendicular às linhas do campo magnético para serem detectadas.

4.2 LEITURAS TOMOGRÁFICAS

Com o tomógrafo foi feito a leitura do I_0 , que é a intensidade de radiação medida no tomógrafo sem corpo de prova. Na Tabela 7 temos dez leituras do I_0 , com uma média de 14026 contagens.

Tabela 7- Leitura sem o corpo de prova, valores do I_0 .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14065	14113	13997	13861	14223	13961	13901	13931	14093	14115

Fonte: Autor (2018)

4.3 CÁLCULO DO VOLUME

A Tabela 8 mostra os valores do volume de cada varredura correspondente a região da solda e do metal base, calculado pela Equação 15. Leituras nas regiões do MB, chamadas de M1 e M2 e na região da Solda chamadas de S1, S2 e S3 correspondente a cada corpo de prova.

Tabela 8- Resultado do volume para cada varredura.

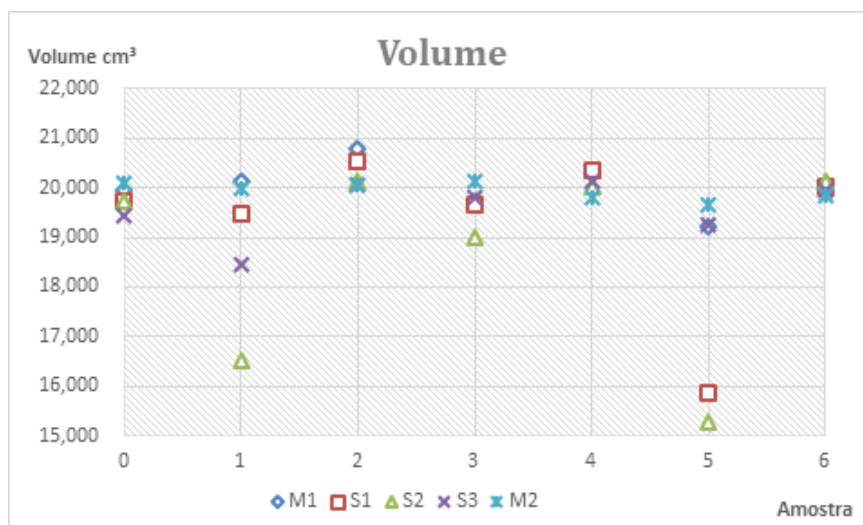
Cm ³	M1	S1	S2	S3	M2
Chapa00	19,936	19,719	19,723	19,444	20,085
Chapa01	20,130	19,469	16,531	18,459	19,988
Chapa02	20,788	20,518	20,123	20,071	20,049
Chapa03	19,725	19,649	18,992	19,815	20,128
Chapa04	20,289	20,349	20,018	20,122	19,795
Chapa05	19,235	15,847	15,264	19,263	19,664
Chapa06	20,004	20,018	20,142	19,953	19,839

Fonte: Autor (2018)

Pelo volume da varredura em cada amostra, é possível observar que os volumes de solda em duas amostras é muito baixo, o que será explicado posteriormente. Uma leitura da chapa de referência varreu 19,782 cm³ enquanto a chapa 01 obteve 18,153 cm³ e a chapa 05 apresentou 16,791 cm³ de material, devido à grande quantidade de descontinuidades.

O metal base apresentou um erro percentual de 0,12% e a solda de referência de 1,6%. Alyassin (1994) obteve erro com o cálculo do volume em seu experimento de 1,82% na tomografia com raios-X em esferas de madeira. Dentro do limite de erro de 5% estabelecido em seu trabalho. Os volumes das soldas das chapas 01 e 05 apresentaram 9% e 15,83% de erro, respectivamente, muito fora do limite, indicando a presença de muitas descontinuidades. A figura 25 mostra graficamente o volume da varredura em cada amostra.

Figura 25- Gráfico do volume de varredura.



Fonte: Autor (2018)

4.4 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA

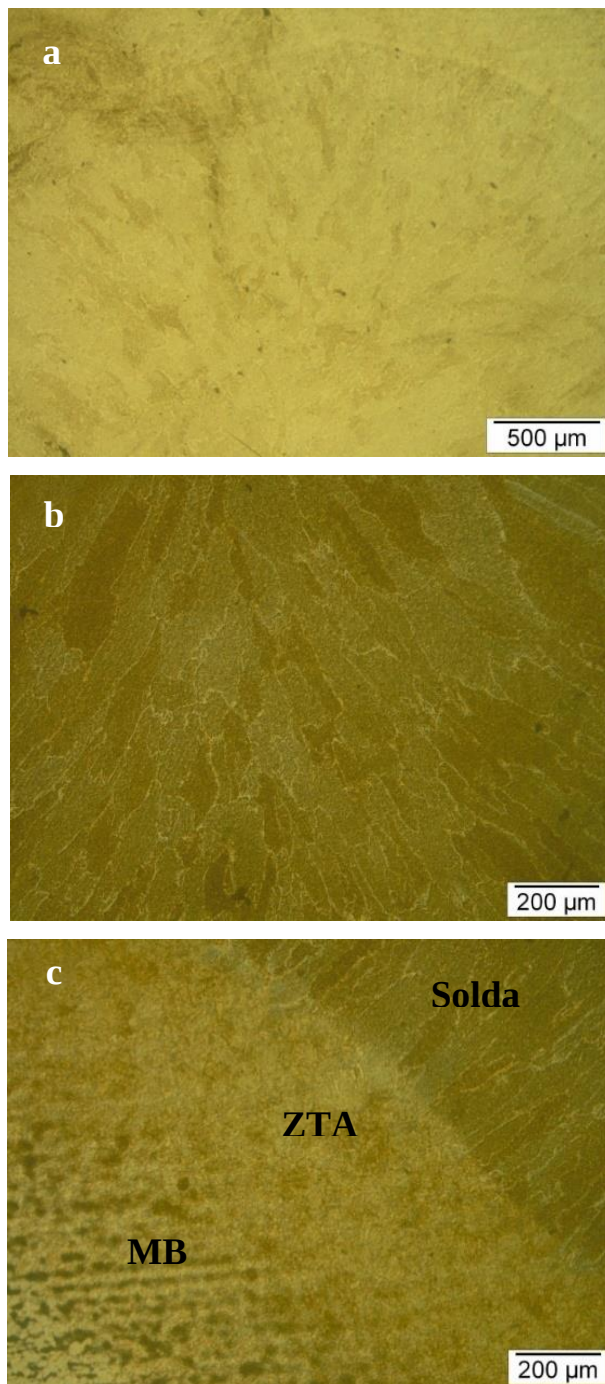
De forma geral, primeiramente foram observadas as imagens da microscopia, para confirmar a qualidade da chapa de referência e comprovar a existência de descontinuidades nas demais amostras. Posteriormente com o ensaio tomográfico e pelos dados coletados foi traçado um gráfico 3D para cada amostra do experimento. Nestes gráficos é possível observar o comportamento dos dados obtidos na tomografia e comparar com a solda de referência, possibilitando observar as descontinuidades que aparecem em forma de picos de contagens. A partir daí foi possível fazer, análise de *cluster* dos resultados, o coeficiente de correlação, o cálculo do volume e fazer uma análise estatística para poder definir uma estimativa da dimensão e localização das descontinuidades.

Amostra 00: Chapa de Referência

A alta qualidade da solda de referência é possível ser vista pelas imagens microscópicas mostradas na figura 26. Não foram encontrados poros, trincas ou alguma descontinuidade em sua estrutura. Fica demonstrado que esta solda serviu perfeitamente como referência neste trabalho. Na figura 26a é possível observar que na área do cordão de solda não há nenhuma descontinuidade. Na figura 26b é mostrado o passe de raiz da solda, onde ver-se o efeito da epitaxia no crescimento colunar dos grãos na região fundida, sem qualquer descontinuidade aparente. Na figura 26c observam-se as três

zonas da junta soldada: metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de solda (MS). Pela microestrutura das três regiões adjacentes, fica evidenciada a qualidade da solda.

Figura 26- Imagens microscópicas da solda de referência.

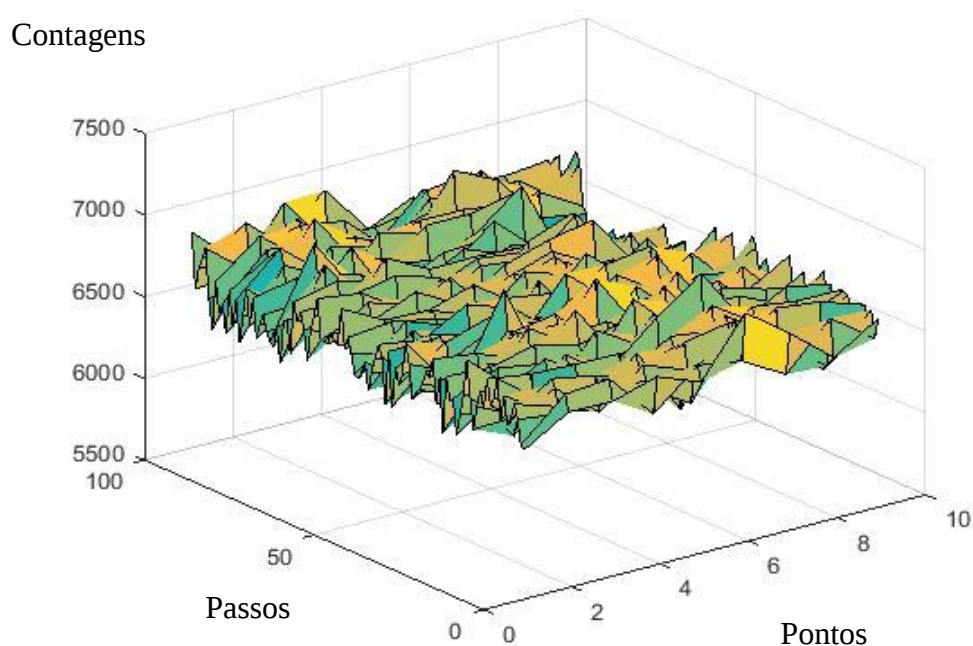


Fonte: Autor (2017)

A figura 27 mostra a resposta das medidas tomográficas da chapa com a solda de referência. Pode-se observar que não há uma grande variação de sinal. Apenas uma flutuação devido ao ruído, tendo uma média de 6568,45 contagens para todas as

medidas. Como a densidade da solda e do metal base são bem próximas, mostrado na Tabela 5, não é possível diferenciar no gráfico a solda do metal base, devido à ótima qualidade da solda de referência, o que indica que esta é de fato uma solda sem descontinuidades.

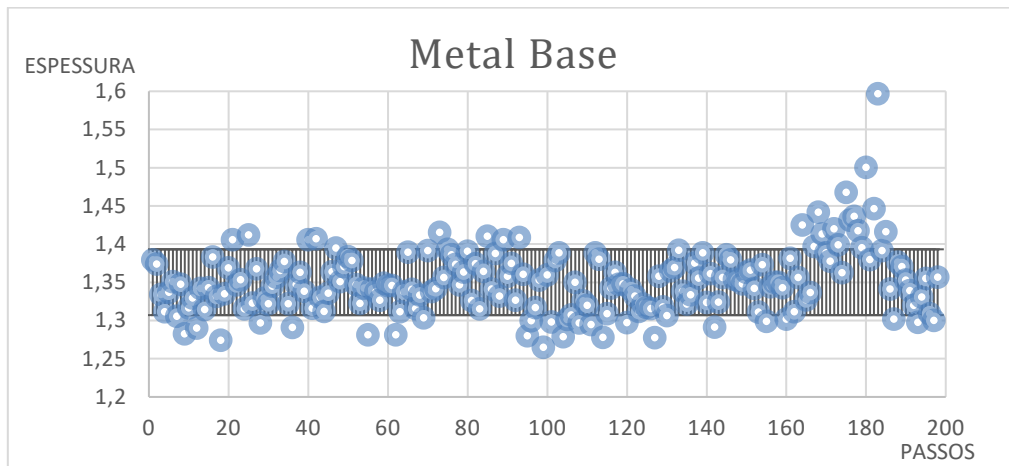
Figura 27- Gráfico 3D da tomografia da chapa com a solda de referência.



Fonte: Autor (2018)

Utilizando a equação 1 (Beer-Lambert) para calcular a espessura de cada medida foi possível estimar estatisticamente que pontos de leitura são consideradas descontinuidades por estarem fora do erro das leituras de cada região, metal e solda. No gráfico da figura 28 é possível observar que a média das leituras mostrou uma espessura de 1,35 cm com desvio padrão (DV) de 0,043 cm na região do MB. Os pontos acima do desvio padrão concentrados entre os passos 164 e 183 no gráfico, é devido a um ressalto existente nesta região da chapa.

Figura 28- Gráficos das espessuras na região do MB.



Fonte: Autor (2018)

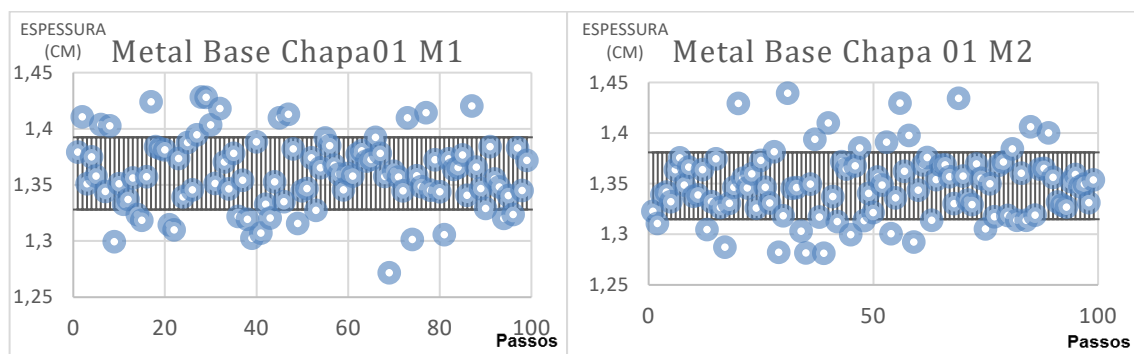
Os gráficos da figura 29 mostram leituras nas regiões do MB das Chapas de teste. Em todas as amostras, o MB apresentou valores próximos a chapa de referência que foi de 1,35 cm com DV de 0,043, mostrado na tabela 9.

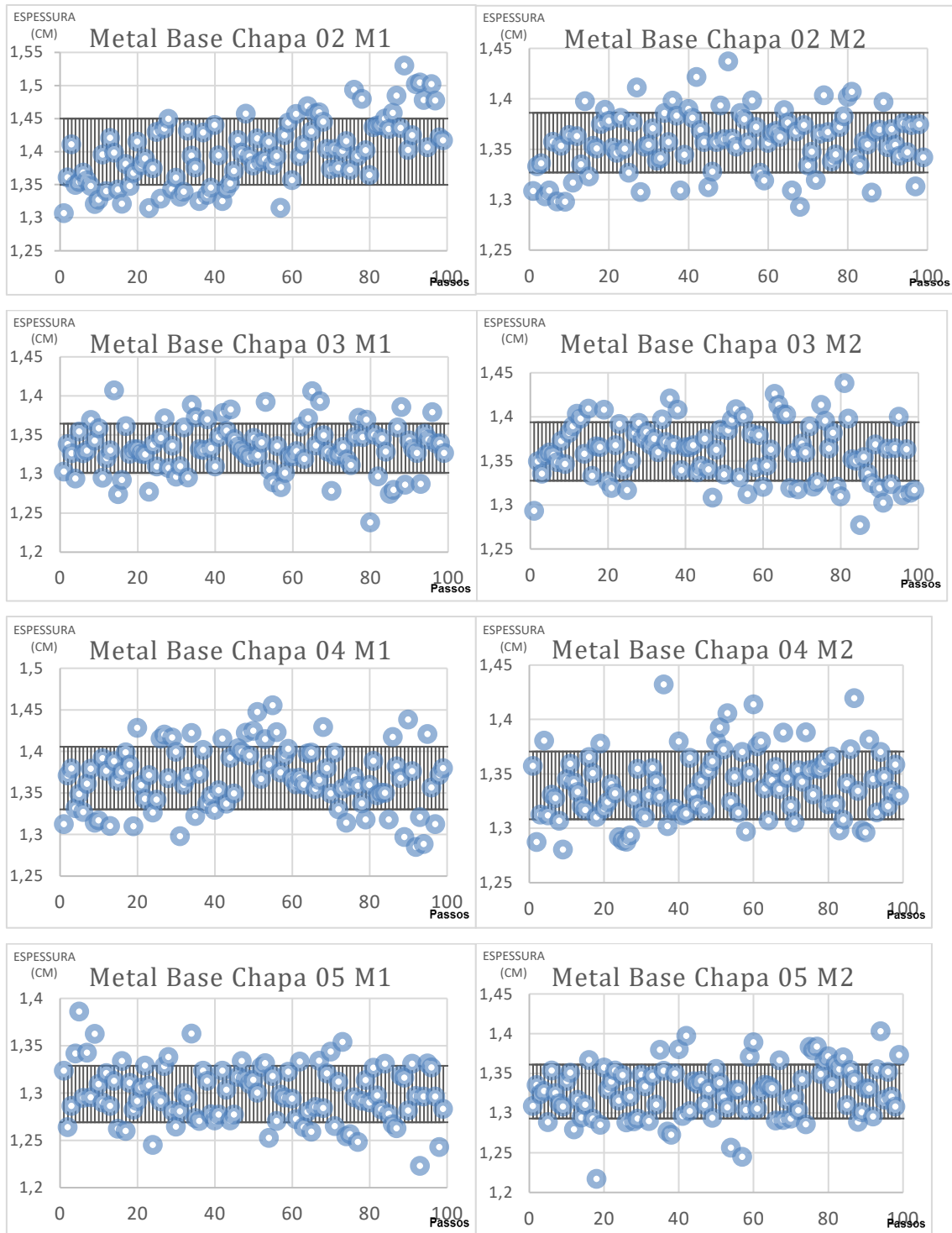
Tabela 9- Médias e desvios padrão das espessuras do Metal Base nas chapas testes.

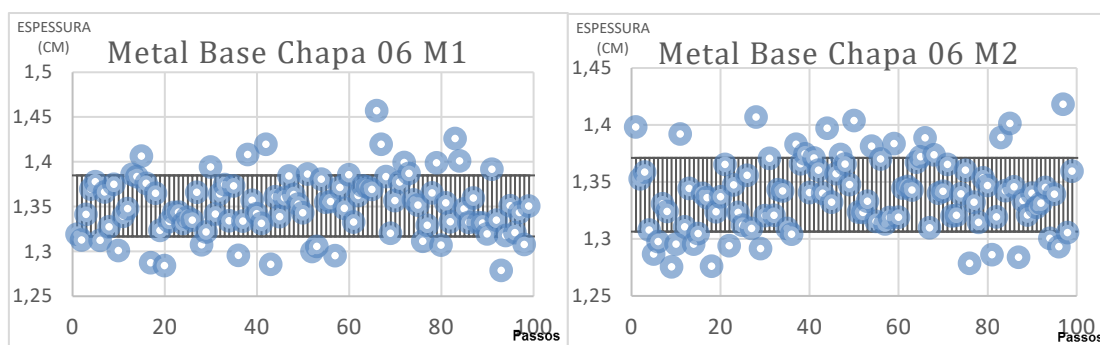
	M1	DV1	M2	DV2
Chapa 01	1,36	0,032	1,35	0,033
Chapa 02	1,39	0,050	1,35	0,029
Chapa 03	1,33	0,031	1,36	0,033
Chapa 04	1,37	0,037	1,34	0,031
Chapa 05	1,30	0,029	1,33	0,034
Chapa 06	1,35	0,034	1,34	0,032

Fonte: Autor (2018)

Figura 29- Gráficos das espessuras na região M1 e M2 do MB.



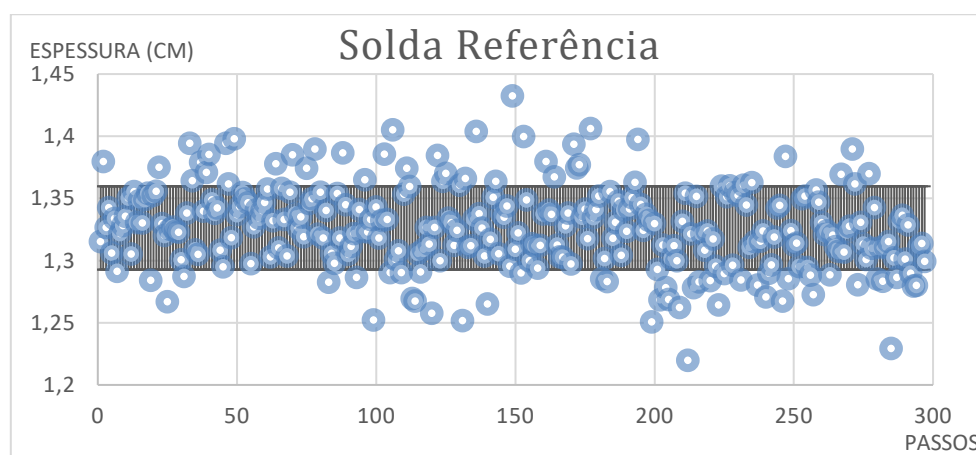




Fonte: Autor (2018)

A região da solda é mostrada no gráfico da figura 30, nela foi encontrada uma média de espessura de 1,326 cm com desvio padrão de 0,033 cm. Como não foram encontradas descontinuidades nesta solda segundo a microscopia, podemos estabelecer, pela análise estatística, que as áreas com espessura abaixo de 1,29 cm, são regiões com a existência de descontinuidade. Os valores de espessura acima de 1,36 cm foram devido ao ruído do sinal nas leituras tomográficas.

Figura 30- Gráficos das espessuras na região da Solda.

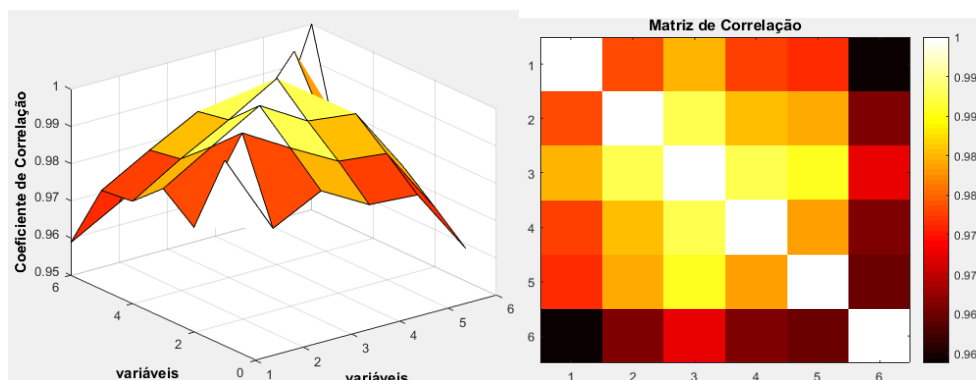


Fonte: Autor (2018)

Através da matriz do coeficiente de correlação, na figura 31, é possível observar uma correlação que varia de 1 a 0,96 entre na chapa de referência mostrada na barra de cores. Os valores de correlação observado por OLIVEIRA *et al.* (2016) mostrou que em seus experimentos feitos com tubos de aço, A-131 AH36, soldados, a correlação do metal base foi entre 1 e 0,94. Já Moura *et al.* (2015) obteve correlação de 1 a 0,99. Na análise de *clusters* hierárquico, nos dendrogramas da figura 32 temos o gráfico da distância versus número de *clusters*, que corresponde ao metal base. O valor da altura

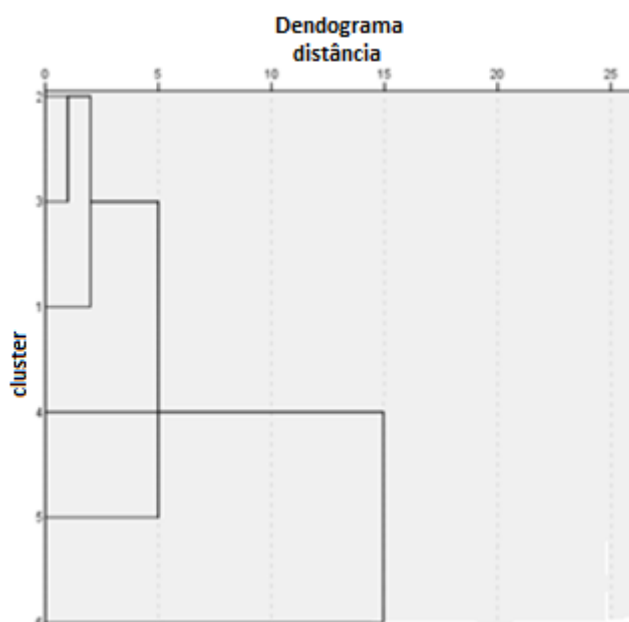
mostra quanto os dados se afastam e são classificados em outro grupo por terem maior diferença. Como o MB é bem homogêneo não há grande altura distanciando os *clusters*.

Figura 31- Coeficiente de correlação do Metal Base.



Fonte: Autor (2018)

Figura 32- Dendrograma do Metal Base.



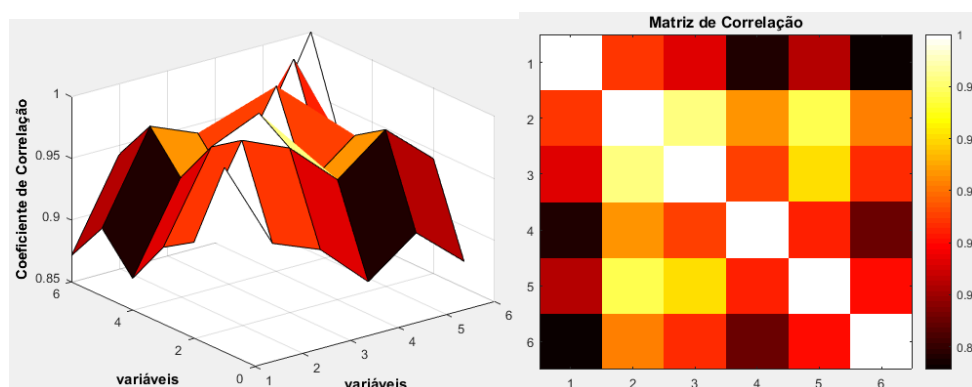
Fonte: Autor (2018)

Com a análise dimensional mostrada até o momento, partimos agora em quantificar a porosidade, sabendo que materiais metálicos apresentam porosidade, desde sua fabricação, os resultados da porosidade, ϕ , calculado segundo Pires(2002) pela Equação 20, para o metal base de ϕ foi 0,053% pelas medidas com a densidade de referência e 0,068% pela densidade calculada com a Equação 11. Para a região na solda de referência, ou seja, sem descontinuidade, pelo método utilizado por Pires(2002), ϕ

foi 0,177% calculado pelas medidas de densidade de referência e 0,192% pela medida de densidade calculada pela Equação 11.

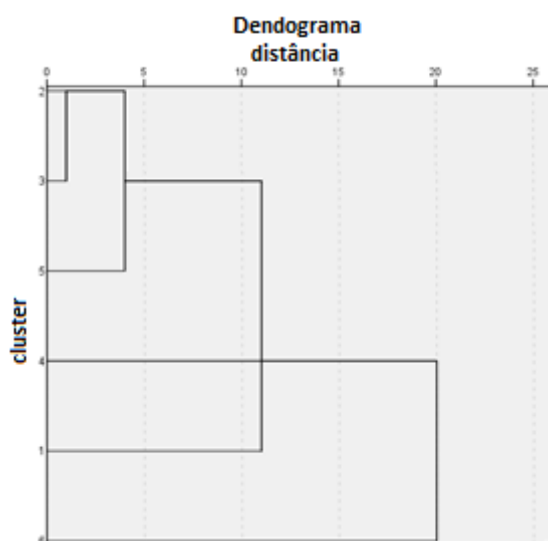
Na solda de referência a matriz de correlação ficou entre 1 e 0,85, figura 33, uma vez que a solda não é uma estrutura tão uniforme como o MB. OLIVEIRA *et al.* (2016) obteve uma correlação da sua solda de referência entre 1 a 0,75 e Moura *et al.* (2015) obteve correlação de 1 a 0,85. Na análise de *clusters* hierárquico, o dendrograma da figura 34 corresponde a solda de referência. A alturas são maiores que do MB isso porque a solda não é tão homogênea quanto o metal de base. Porém comparado a uma solda com descontinuidade o resultado é evidente como será visto posteriormente em cada amostra.

Figura 33- Coeficiente de correlação da Solda de Referência.



Fonte: Autor (2018)

Figura 34- Dendrograma da Solda de Referência.

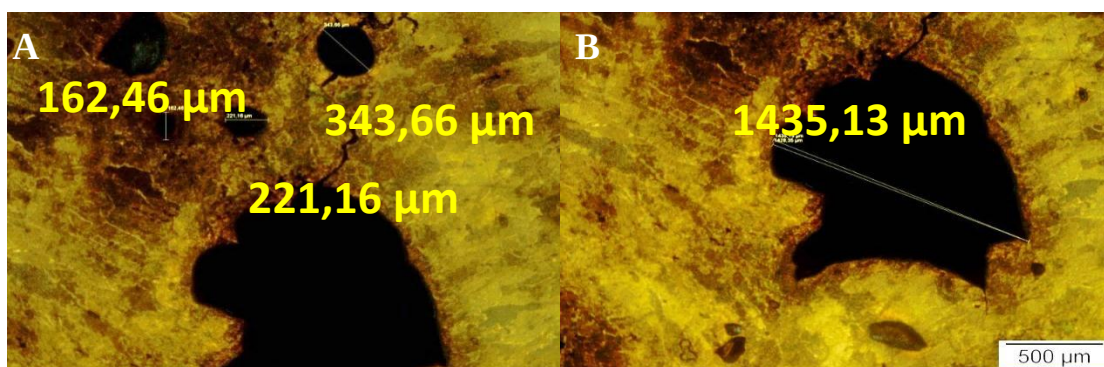


Fonte: Autor (2018)

4.4.1 Amostra 01: Chapa Soldada com Vento

Pelas imagens microscópicas da chapa soldada com vento como descrito na secção 3.2, é possível observa-se a presença de diversas discontinuidades, como poros e inclusões predominantes por toda região da solda e também a presença de trincas. Na figura 35a foi possível medir discontinuidades com 162,46 μm , 221,16 μm e com 343,65 μm de diâmetro. A figura 35b mostra uma discontinuidade maior com 1435,13 μm de diâmetro.

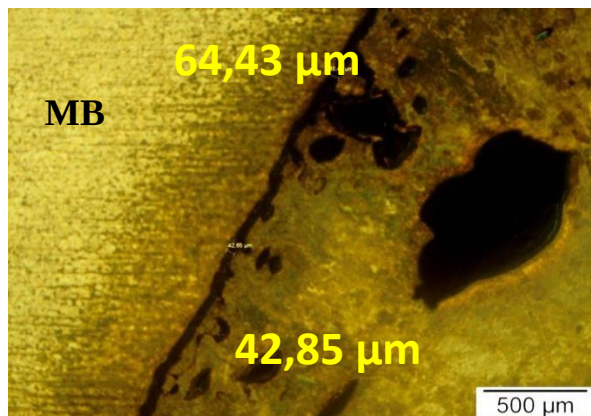
Figura 35- Imagens microscópicas da chapa soldada com vento mostrando discontinuidades como poros e trincas localizados na região da solda.



Fonte: Autor (2017)

Também pode-se observar que não houve fusão suficiente do metal de solda (MS), que não foi capaz de diluir parte da superfície do metal base (MB); gerando como resultado um descontinuidade (trinca) ao longo de toda interface (MB/MS), com espessuras que variam de 42,85 μm a 60,46 μm como mostra na figura 36.

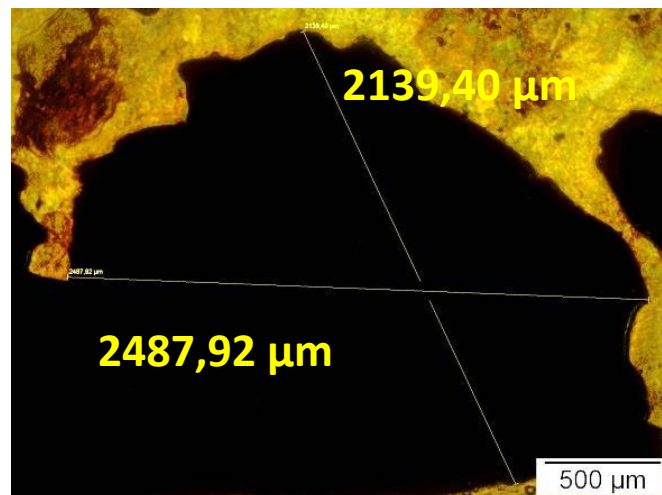
Figura 36- Imagens microscópicas da chapa soldada com vento mostrando trinca e falta de fusão, localizados entre o MB e o cordão de solda.



Fonte: Autor (2017)

Na figura 37 foi encontrada um vazio com espessura de 2487,92 μm e 2130,40 μm . Isso mostra a grande quantidade de material que faltou para preencher a solda.

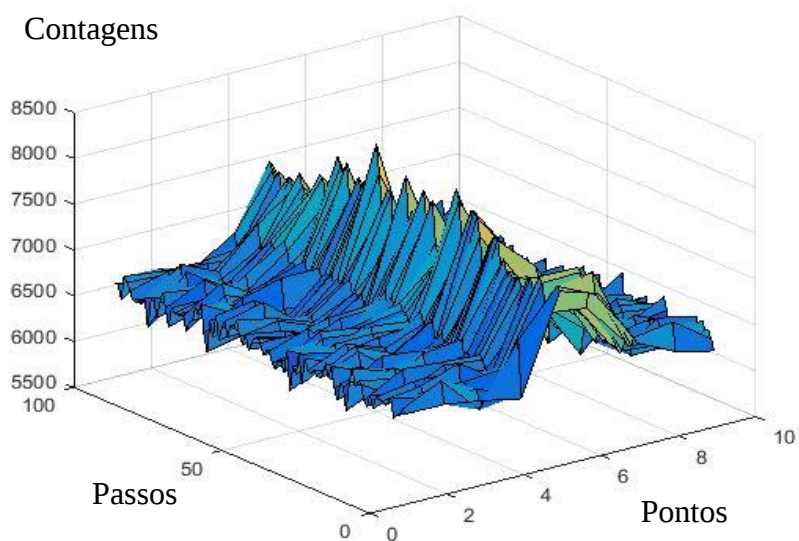
Figura 37- Imagens microscópicas da chapa soldada com vento mostrando um grande poro onde faltou material de preenchimento localizado na região da solda.



Fonte: Autor (2017)

As discontinuidades existentes na solda da chapa01 formam picos de contagens e são mostrados no diagrama 3D na figura 38. Diferentemente da solda de referência é possível observar nitidamente que a região da solda é bem evidente devido a grande quantidade de discontinuidades existentes, fazendo assim o número de contagens no detector serem maior, chegando a 8131 um valor bastante alto em relação à média da solda de referência que foi de 6568,45 contagens.

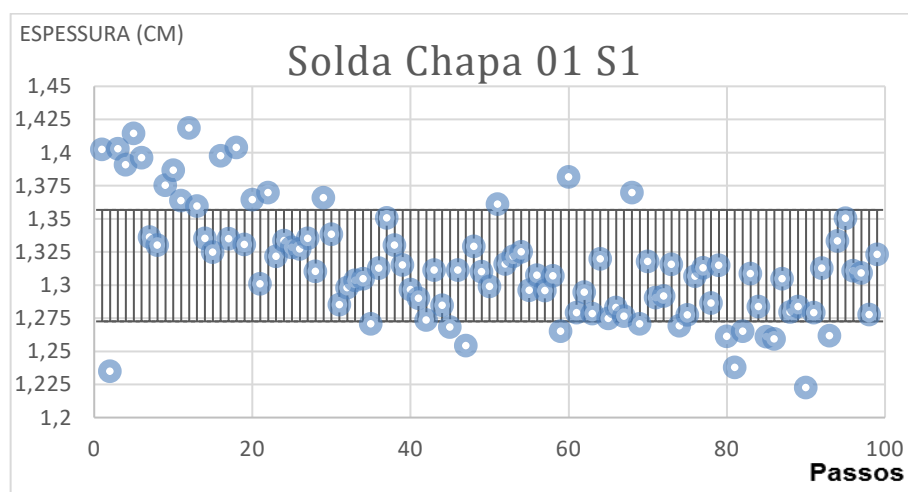
Figura 38- Gráfico 3D da tomografia da chapa soldada com vento.



Fonte: Autor (2018)

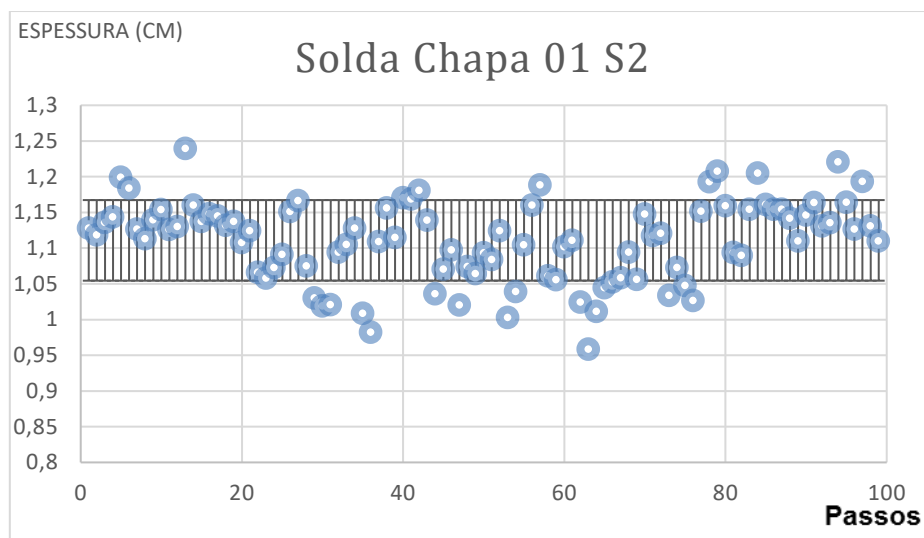
Os gráficos da solda, figuras 39 a 41, apresentaram média de espessura em S1 de 1,314 cm e DV 0,042 cm, S2 com 1,110 cm e 0,056 cm e em S3 de 1,243 cm com DV de 0,053 cm. Como vários pontos estão com menos de 1,29 cm, isso significa que esta solda está totalmente com descontinuidades, com regiões com 0,95 cm de espessura de material, apresentando erro de 10,73%. As imagens microscópicas mostram que existem bastantes descontinuidades e falta de material de adição no cordão de solda.

Figura 39- Gráficos das espessuras na região S1 da Solda



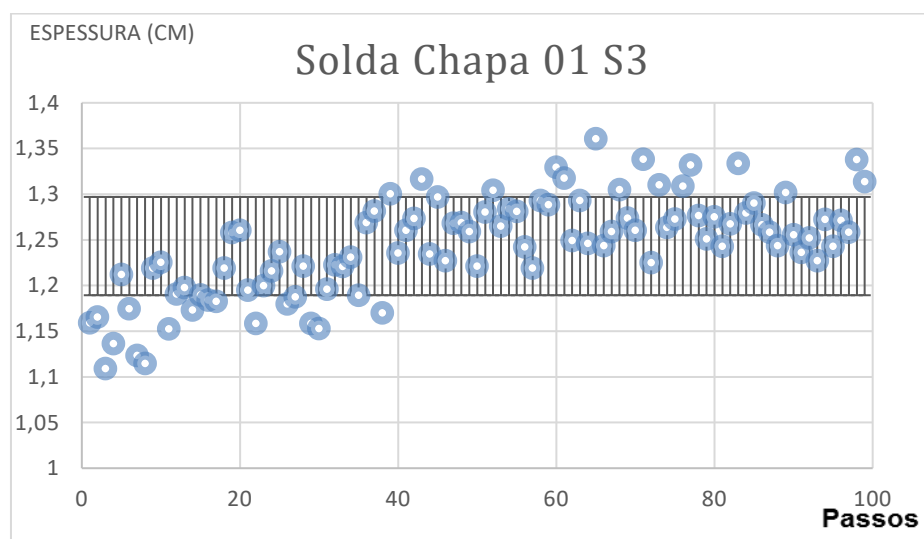
Fonte: Autor (2018)

Figura 40- Gráficos das espessuras na região S2 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

Figura 41- Gráficos das espessuras na região S3 da Solda.

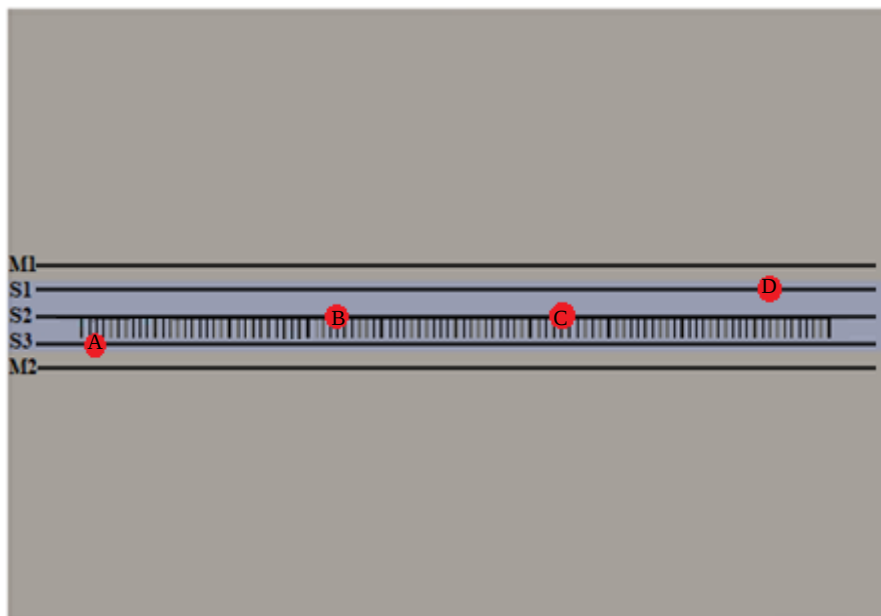


Fonte: Autor (2018)

A figura 42 mostra a localização de quatro das maiores discontinuidades da Chapa 01 como foi visto nos gráficos das figuras 39 a 41, cada traço da régua corresponde ao local do passo na varredura correspondente. Uma discontinuidade contendo 1,108 cm de material no passo 3 na varredura da altura S3, mostrado pelo ponto A. No ponto B, correspondente a leitura no passo 36 e altura S2 a espessura de

material foi 0,9823 cm. O ponto C localizado na varredura S2 e passo 63 foi detectado uma descontinuidade com espessura de material de 0,958 cm e no ponto D na altura S1 no passo 90, a espessura de material foi 1,222 cm.

Figura 42- Localização de algumas descontinuidades na chapa 01.

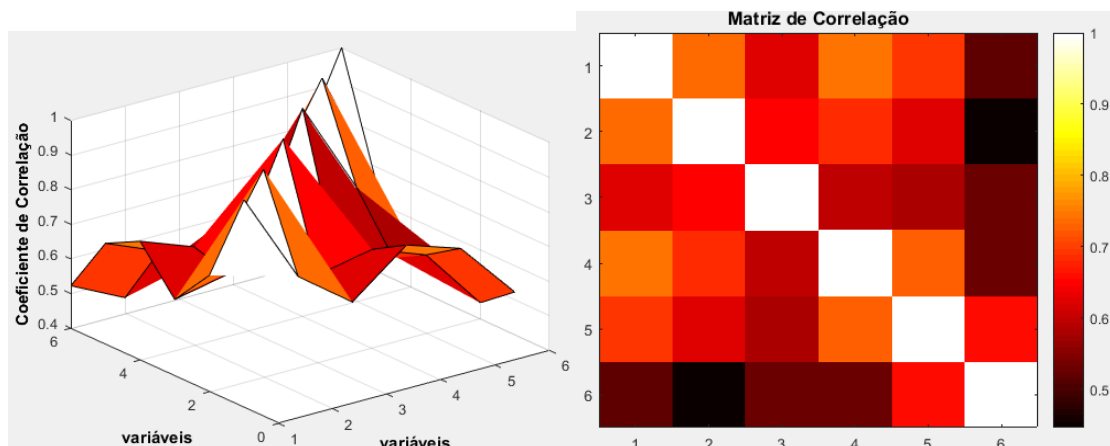


Fonte: Autor (2018)

Na chapa 01 onde foi encontrado regiões com espessura de material com 0,958 cm devido a grande quantidade de porosidade, neste ponto pelo método de Pires(2002) , Equação 20, utilizando a densidade de referência foi encontrada uma porosidade de 32,87 % e pela densidade calculada pela Equação 11 a ϕ foi 29,611 %.

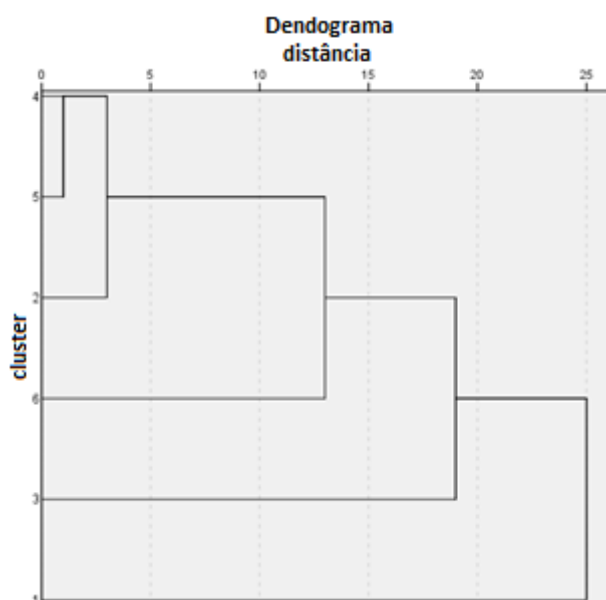
Através do coeficiente de correlação e sua matriz, na figura 43, é possível observar uma correlação que varia de 1 a valores mínimos próximos de 0,45 na solda da chapa 01, isso é um indicativo da existência de descontinuidades na amostra. OLIVEIRA *et al.* (2016) mostrou que em seus experimentos que a correlação da solda com descontinuidade foi entre 1 a 0,65 e Moura *et al.*(2015) obteve uma correlação entre 1 e 0,6, possivelmente devido a existência de descontinuidades comparado aos valores de referência. O dendrograma solda 01, apresenta separação dos *clusters*, se afastando as regiões, mostrado na figura 44. Comparando com a chapa de referência a altura do *cluster* 6 só está a uma distância de 15 dos demais *clusters*, já nesta solda a altura do *cluster* 1 chega a 25 de diferente dos outros *clusters*, local de bastante descontinuidades no cordão de solda.

Figura 43- Coeficiente de correlação da solda 01.



Fonte: Autor (2018)

Figura 44- Dendrograma da solda 01.

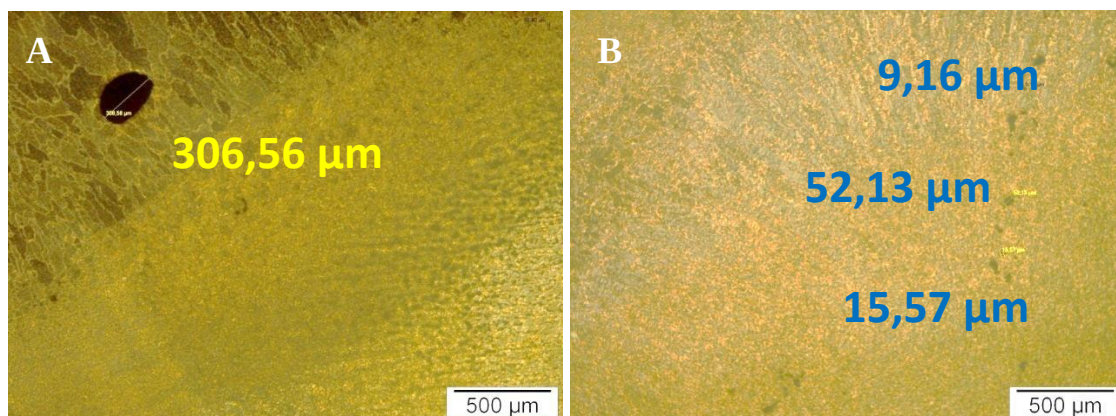


Fonte: Autor (2018)

4.4.2 Amostra 02: Chapa soldada sem escovar a escória entre os cordões de solda

Pelas imagens microscópicas da Chapa 02, foram encontradas descontinuidades com diâmetro de 1303,28 μm como mostra na figura 45a. Já na figura 45b foram encontrados micro poros com diâmetros de 9,16 μm , 15,57 μm até 52,13 μm .

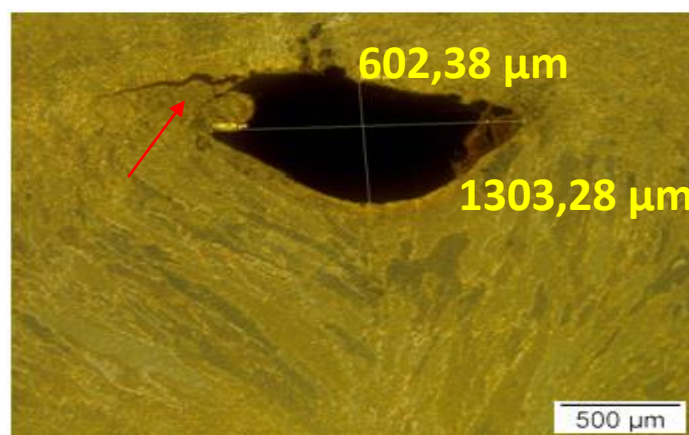
Figura 45- Imagens microscópicas da chapa soldada sem escovação entre os cordões de solda mostrando poros localizados na região da solda.



Fonte: Autor (2017)

Na figura 46 é mostrada uma descontinuidade relativamente maior com diâmetros de 602,38 µm (o menor) e de 1303,28 µm (o maior), indicando que a não remoção da escória pode deixar elementos voláteis no interior do cordão que são causadores de grandes poros. A concentração de tensão nas extremidades de um poro alongado ou bolha pode levar à nucleação e a propagação de uma trinca em uma de sua extremidade, conforme indicado pela seta vermelha na figura abaixo.

Figura 46- Imagens microscópicas da chapa 02 mostrando um poro com uma trinca nucleada na sua extremidade.

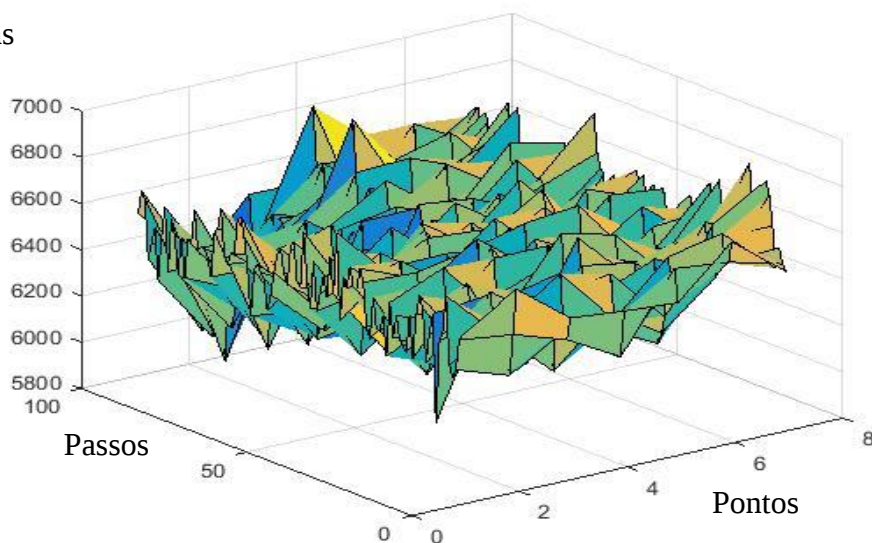


Fonte: Autor (2017)

A chapa que a solda não foi escovada forneceu o gráfico mostrado na figura 47, através dele é possível observar alguns picos de contagens de 6847 e outro pico com 6836 contagens apontando a presença de descontinuidades.

Figura 47- Gráfico 3D da tomografia da chapa 02.

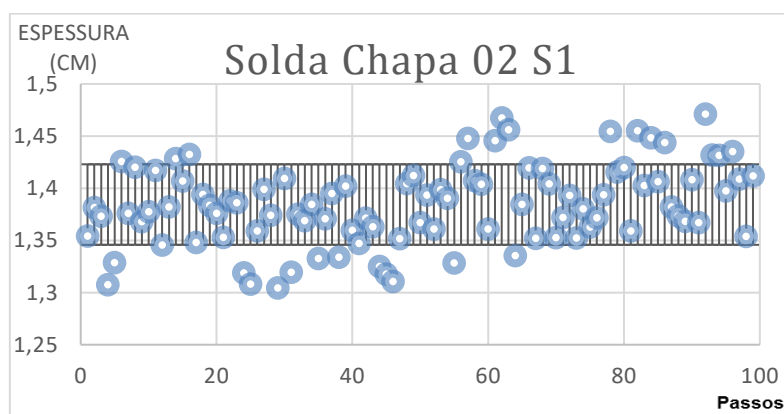
Contagens



Fonte: Autor (2018)

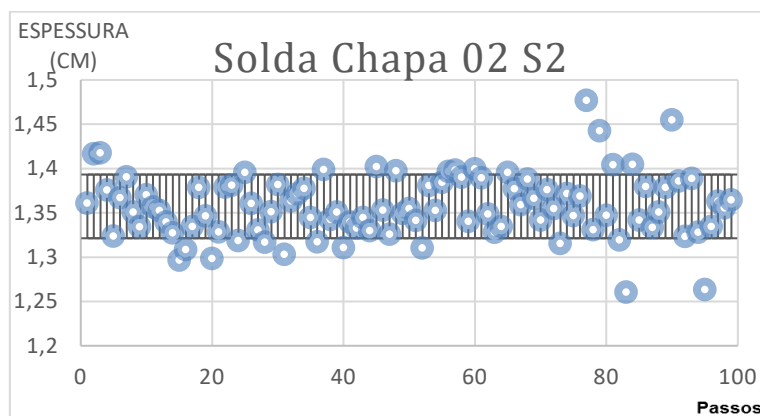
Os gráficos da solda na chapa 02, figuras 48 a 50 apresentaram média de espessura em S1 de 1,38 cm e DV 0,038 cm, S2 com 1,357 cm e 0,035 cm e em S3 de 1,35 cm com DV de 0,030 cm, com erro de 0,24%. Alguns pontos estão com menos de 1,29 cm de espessura, indicando descontinuidades localizadas em S2, com região de até 1,26 cm de espessura de material. As imagens microscópicas mostram que existem algumas descontinuidades na solda. Espessuras acima de 1,37 cm foram provocadas por regiões com ressaltos.

Figura 48- Gráficos das espessuras na região S1 da Solda.



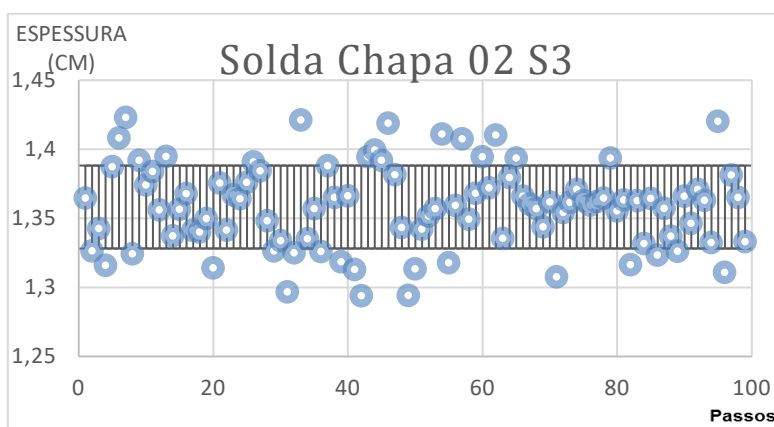
Fonte: Autor (2018)

Figura 49- Gráficos das espessuras na região S2 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

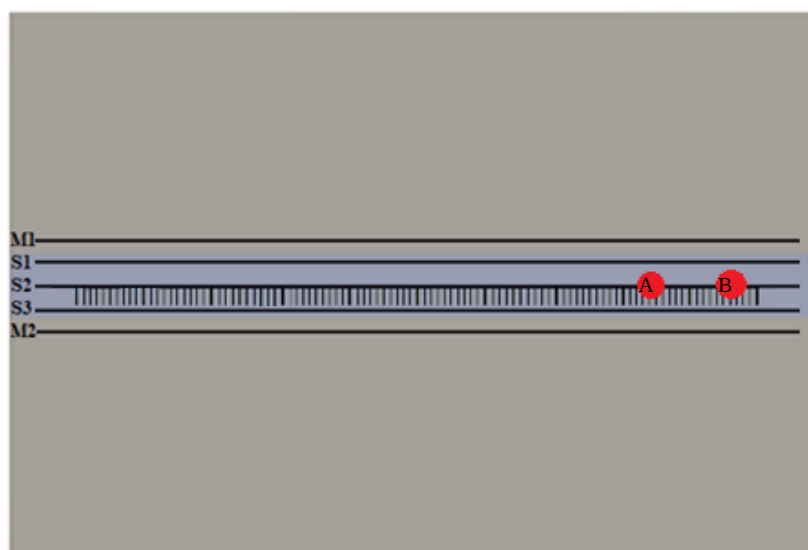
Figura 50- Gráficos das espessuras na região S3 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

A localização de duas discontinuidades da chapa 02 apresentados nos gráficos das figuras 48 a 50, são mostrados na figura 51. Onde em A temos uma discontinuidade em S2 no passo 83 com 1,260 cm e outro no passo 95 de 1,263 cm representado por B.

Figura 51- Localização de algumas descontinuidades na chapa 02.

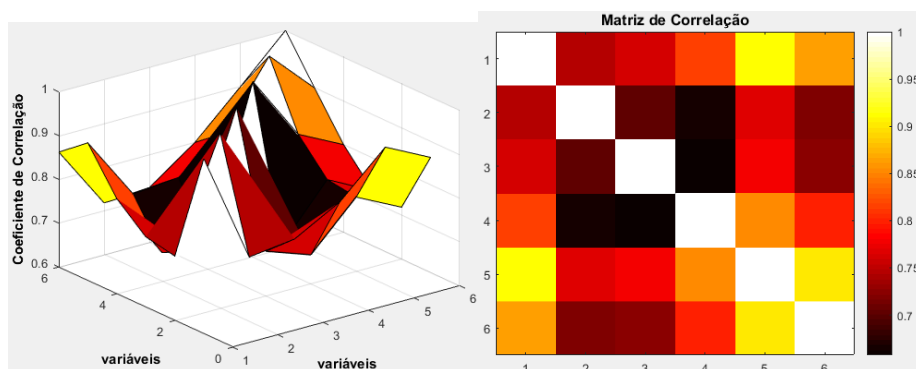


Fonte: Autor (2017)

Pelas descontinuidades dispostas na figura anterior, a porosidade calculada pela Equação 20, utilizando a densidade de referência foi 9,6% em A e 9,3% em B pela densidade calculada pela Equação 11 a ϕ foi 8,5% em A e 8,2% em B.

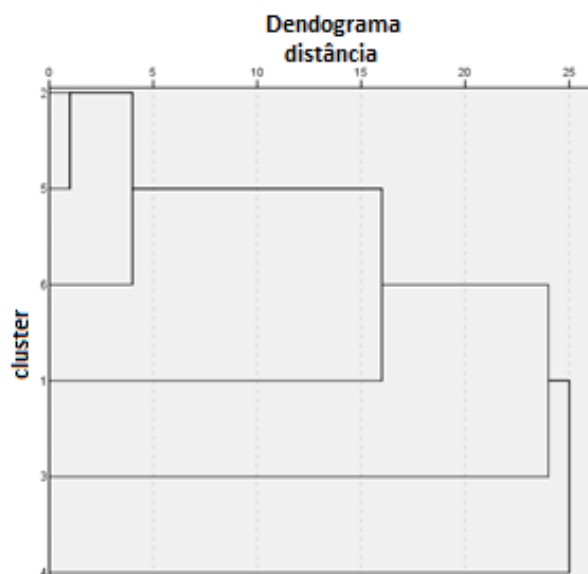
Pelas imagens da figura 52, é possível observar uma correlação que atinge valores mínimos de 0,6, quando correlacionada a amostra 02 e comparada com a chapa de referência, um resultado que mostra a existência de descontinuidades na solda. Na figura 53 o dendrograma mostra número de *clusters* da solda 02, com os *clusters* 1, 3 e 4 chegando a ter distância 25 dos demais e os demais bem afastados, isso devido a descontinuidades mais pontuais localizadas.

Figura 52- Coeficiente de correlação da solda 02.



Fonte: Autor (2018)

Figura 53- Dendrograma da solda 02.

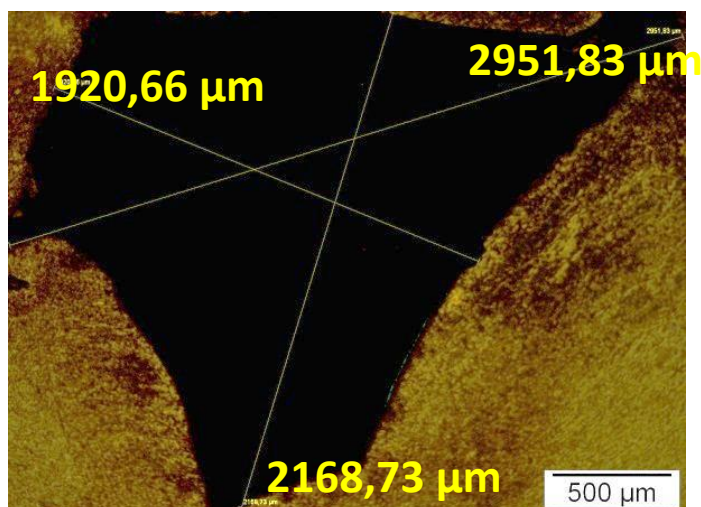


Fonte: Autor (2018)

4.4.3 Amostra 03: Chapa soldada com passe único.

Pelas imagens da microscopia é possível observar a presença de uma grande descontinuidade de geometria irregular, apresentando medidas diametrais de 2951,83 μm , 2168,33 μm e 1920,66 μm , formando um grande espaço vazio no interior do cordão de solda, conforme mostra a figura 54.

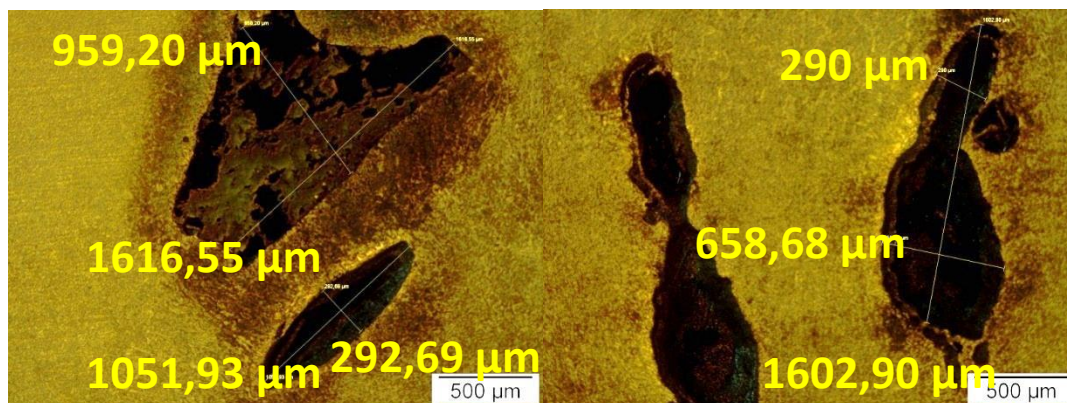
Figura 54- Imagens microscópicas da chapa 03 mostra um grande espaço vazio localizado na região da solda.



Fonte: Autor (2017)

Também foram encontradas descontinuidades menores na região da solda com diâmetros que variam de 290 μm até 1502,90 μm , conforme mostra a figura 55.

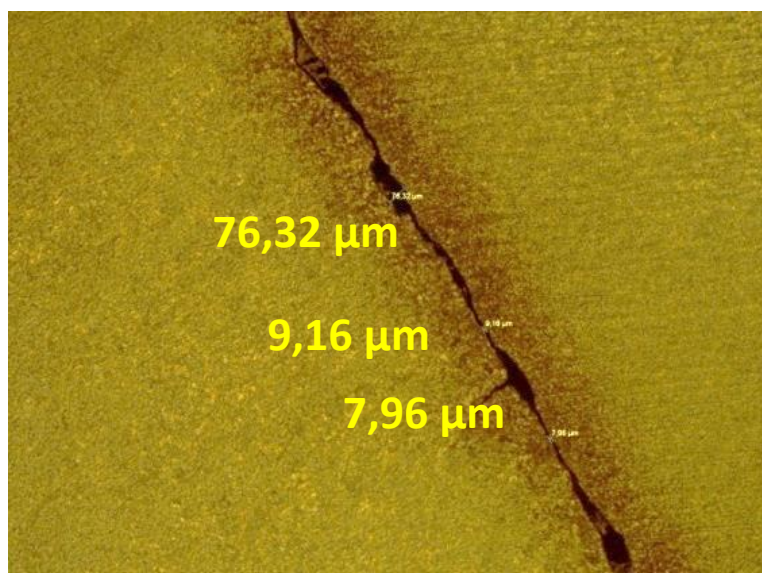
Figura 55- Imagens microscópicas de poros com diferentes tamanhos encontradas na zona fundida da Chapa 03.



Fonte: Autor (2017)

Além de poros também foi encontrado trinca na solda, um indicativo da falta de fusão do material. Essa trinca apresenta espessuras que variam de 7,95 μm a 76,32 μm e pode ser vista na figura 56.

Figura 56- Micro trincas encontrada na solda feita com passe único.

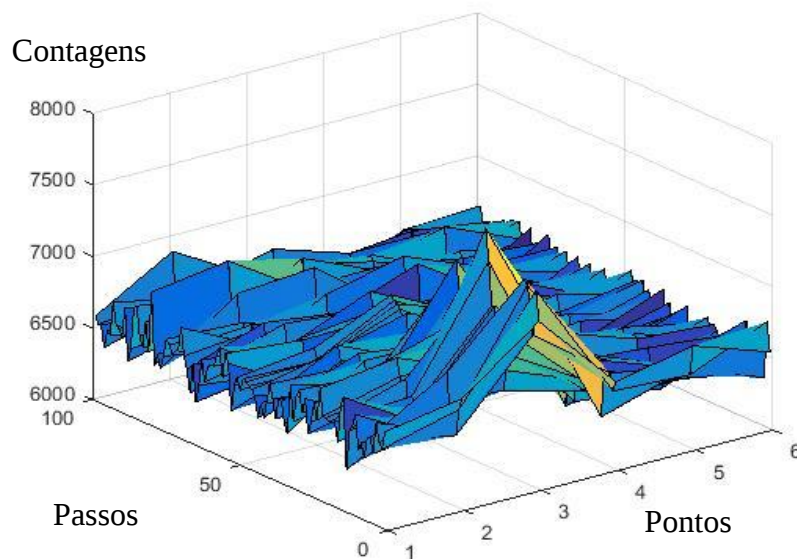


Fonte: Autor (2017)

Através do gráfico da figura 57 temos a distribuição dos dados tomográficos da Chapa 03, é possível observar alguns picos registrando contagens de até 7660 que está bem acima da média esperada de 6568,45 contagens, indicativo de descontinuidades

relacionados a falta de material de preenchimento provocando grande quantidade de porosidade.

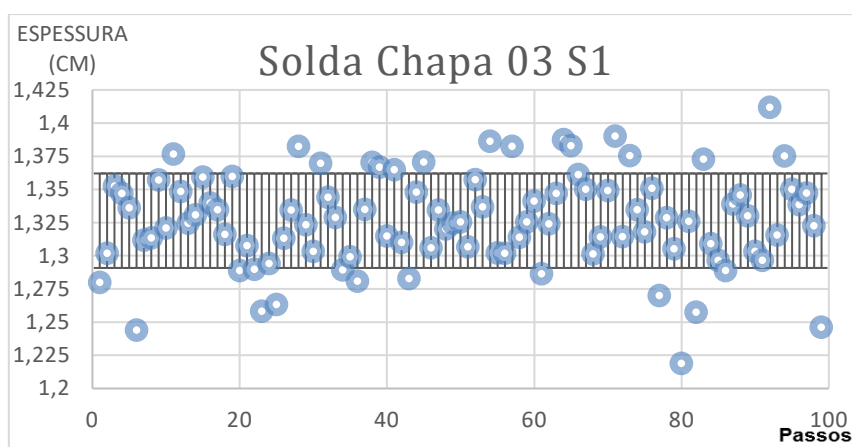
Figura 57- Gráfico 3D da tomografia da chapa com passe único.



Fonte: Autor (2018)

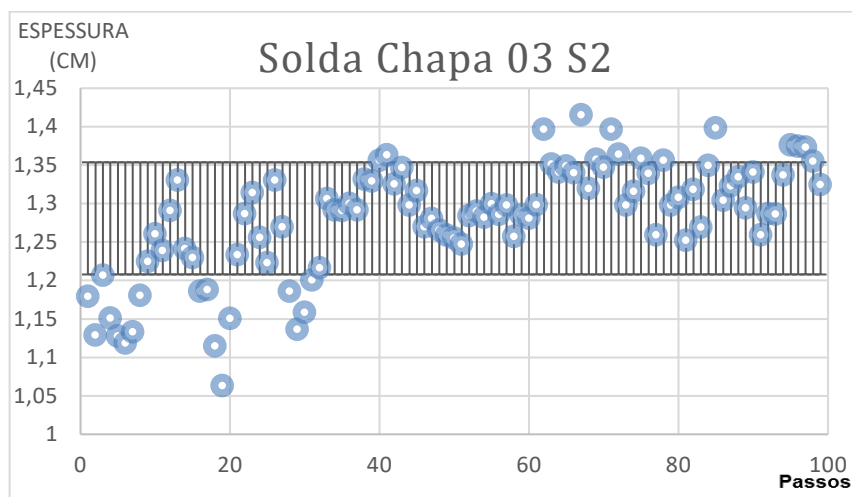
Os gráficos da solda na chapa 03, nas figuras 58 a 60 apresentaram média de espessura na solda em S1 de 1,384 cm e DV 0,038 cm, S2 com 1,357 cm e 0,035 cm e em S3 de 1,358 cm com DV de 0,030 cm. O erro encontrado foi de 4,03%. Como vários pontos estão com menos de 1,29 cm de espessura, especificamente entre os passos 1 e 40 da S2, isso mostra que existem descontinuidades, com regiões que chegam a ter 1,06 cm.

Figura 58- Gráficos das espessuras na região S1 da Solda.



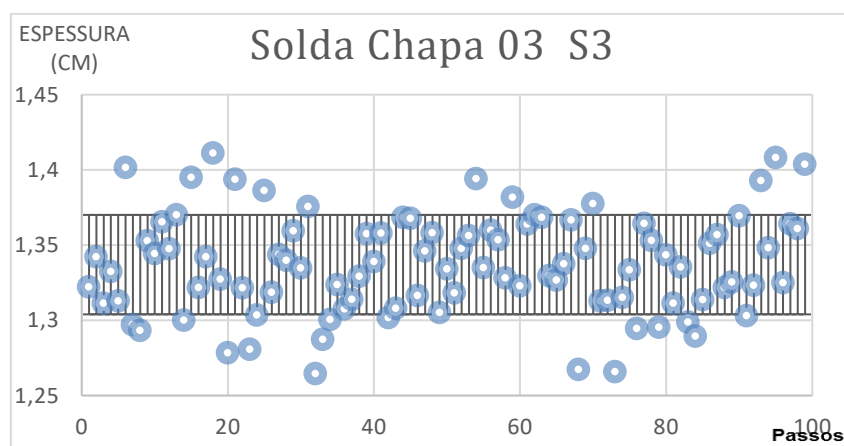
Fonte: Autor (2018)

Figura 59- Gráficos das espessuras na região S2 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

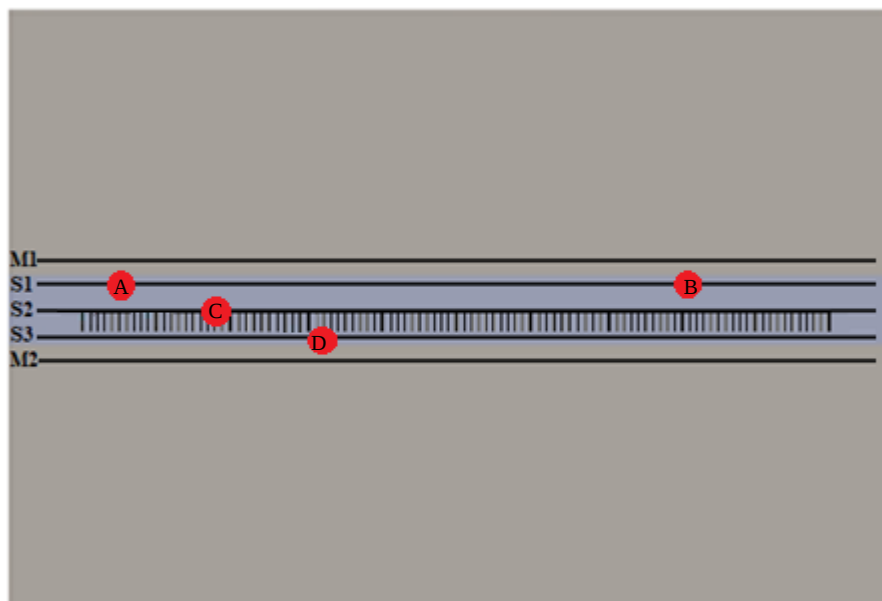
Figura 60- Gráficos das espessuras na região S3 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

A figura 61 mostra o exemplo da localização das maiores discontinuidades da Chapa 03. Na varredura S1, é possível encontrar uma discontinuidade de 1,243 cm no passo 6 letra A e uma de 1,218 cm no passo 80 letra B. Em S2 existem muitas discontinuidades entre os passos 1 e 31, a maior com 1,06 cm de material no passo 19, representado pela letra C e na altura S3, destaca-se uma discontinuidade com 1,26 cm no passo 32, letra D.

Figura 61- Localização de algumas decontinuidades na chapa 03.

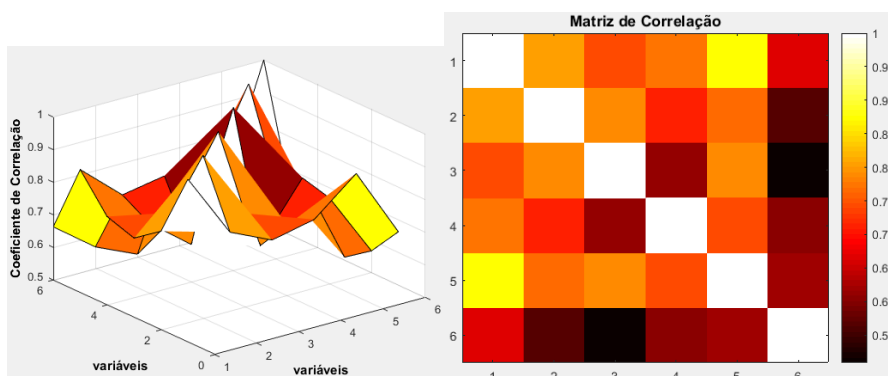


Fonte: Autor (2018)

Nesta solda a porosidade chegou a ser 23,74% pela densidade de referência e 22,8% pela densidade gravimétrica.

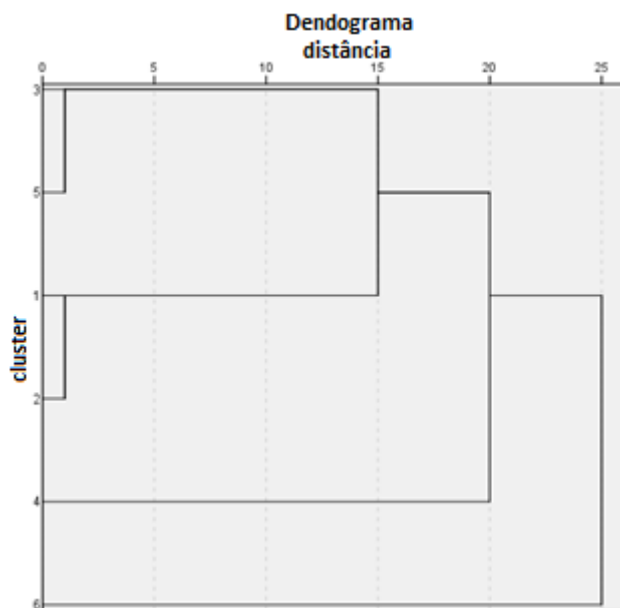
Fazendo a correlação da solda 03, mostrado na figura 62, é possível observar valores que atingem um mínimo de 0,55, distante de 1, indicando que nesta amostra ocorre a presença de discontinuidades. Através do dendrograma mostrado na figura 63, temos o *cluster* hierárquico da solda 03 em que os *cluster* 3 e 5 se afastam dos *clusters* 1 e 2, que por sua vez juntos se aproximam dos demais porém chegando a ter 25. Provável localização das discontinuidades.

Figura 62- Coeficiente de correlação da solda 03.



Fonte: Autor (2018)

Figura 63- Dendrograma da solda 03.

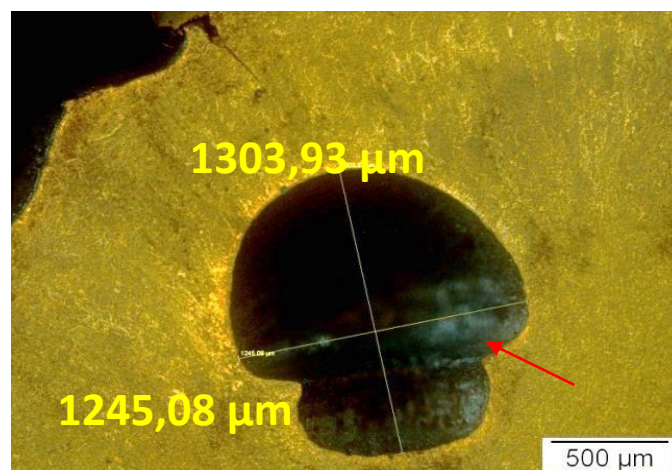


Fonte: Autor (2018)

4.4.4 Amostra 04: Chapa com impureza na solda

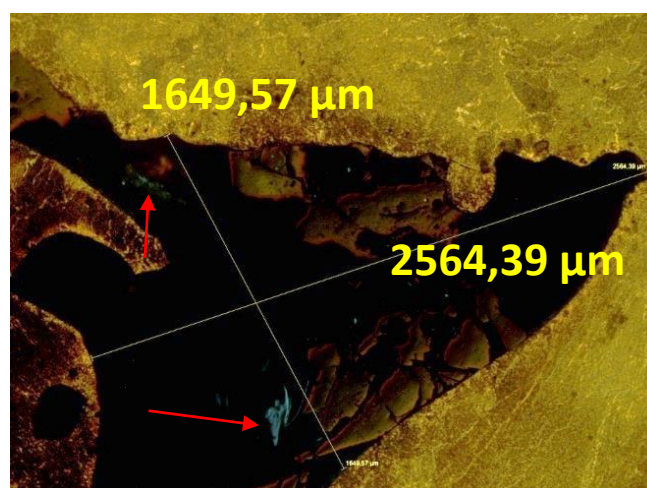
Através das imagens da microscopia é possível observar a presença de poros formando grandes espaços vazios na solda. Nesta chapa, foram encontradas tanto partículas vítreas, figura 64, quanto, poros com diâmetros variando entre 1245,08 μm até 2564,39 μm como mostram as figuras 65 e 66. Também é preciso considerar que o vidro incorporado (seta vermelha) pode simular bem o efeito de contaminantes vítreos no metal de solda. Como o vidro é isolante elétrico, sua presença pode comprometer a estabilidade do arco elétrico, falhando durante a soldagem gerando grandes poros. Por outro lado, pela sua natureza, uma partícula vítrea solidificada no interior do cordão pode ser considerada um concentrador de tensão e propensa à nucleação de trincas que comprometem a integridade estrutural da junta.

Figura 64- Imagens microscópicas da solda com partícula vítrea da Chapa 04.



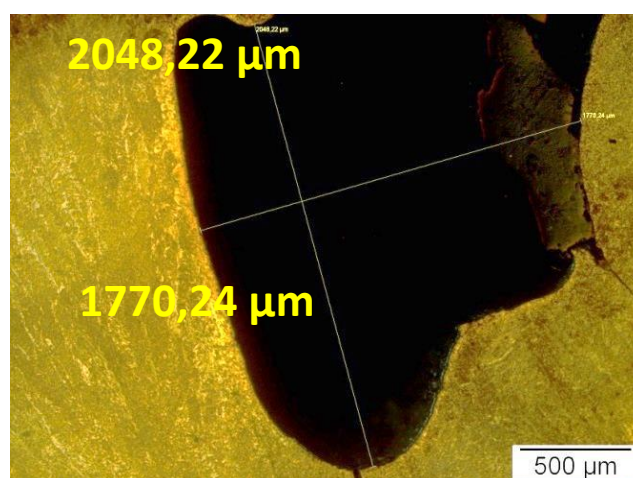
Fonte: Autor (2017)

Figura 65- Imagens microscópicas da solda com partícula vítrea da Chapa 04.



Fonte: Autor (2017)

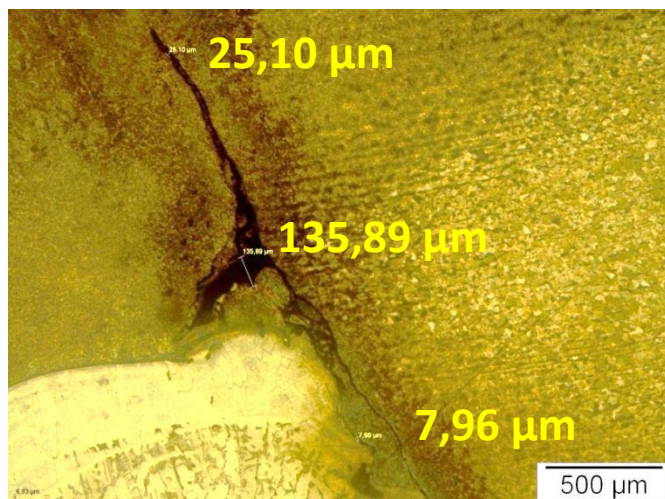
Figura 66- Imagens microscópicas da solda com partícula vítrea da Chapa 04.



Fonte: Autor (2017)

Na outra extremidade da chapa, região da solda que foi adicionado partículas de alumínio, as imagens microscópicas mostraram pequenas trincas com espessuras variando entre 7,96 μm a 135,89 μm , como mostra a figura 67.

Figura 67- Imagens microscópicas da solda com alumínio da Chapa 04.

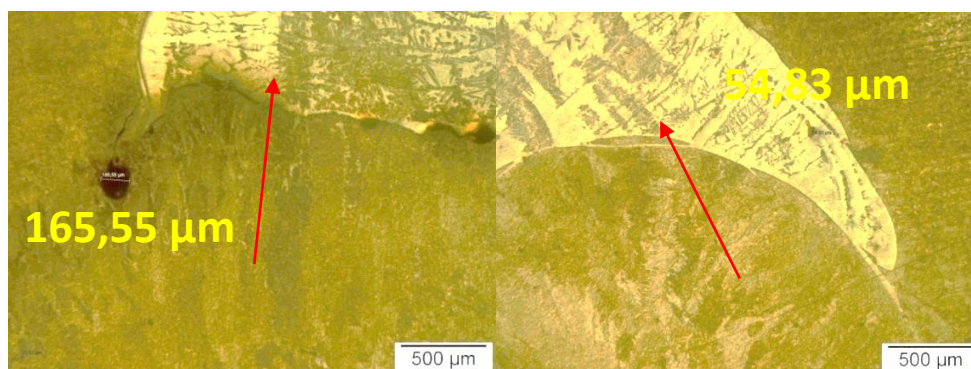


Fonte: Autor (2017)

Pelas imagens mostradas na figura 68, também foram observadas descontinuidades com diâmetros que vão de 54,83 μm a 165,55 μm . Pelo seu baixo ponto de fusão (660°C), comparativamente aos aços (~1580°), o alumínio solidifica-se primeiro. Ressaltam-se também as diferenças de densidade destes dois materiais: 2,70 g/cm³ para o alumínio e 7,89 g/cm³ para o metal de solda.

Por razões óbvias, o alumínio tende a solidifica-se entre o metal de adição e o metal de base. As diferenças entre as propriedades mecânicas entre estes dois materiais podem gerar pontos de baixa resistência ao longo do cordão que pode comprometer a integridade da junta. Apesar do alumínio ter densidade muito menor que a do metal de solda, não foram observadas variações bruscas de sinal detectável pela tomografia nessas regiões. Provavelmente, isto acontece pelo fato dos materiais apresentarem a mesma natureza metálica e do alumínio estar baixas quantidades dentro do cordão de solda.

Figura 68- Microscopia da solda com alumínio.

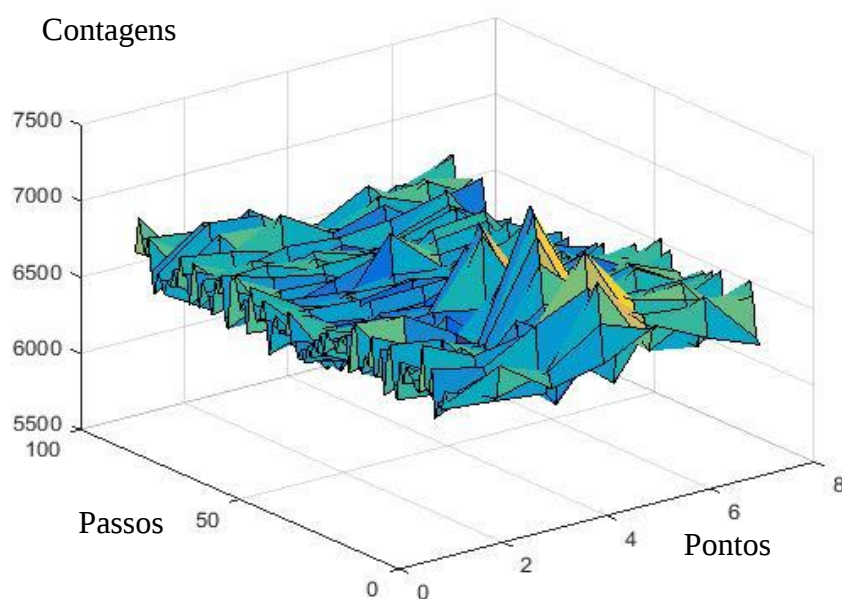


Fonte: Autor (2017)

O gráfico da figura 69 mostra a resposta da tomografia da chapa 04, entre os passos 1 e 49 está a parte com pedaços de vidro colocados entre os cordões de solda e entre os passos 50 e 99 a parte com alumínio adicionado entre os cordões de solda.

Na região onde tem vidro é possível observar picos de contagens bem destacados, que alcançam até 7318 contagens, indicando a presença de descontinuidades na solda. Na maior parte da região que foi adicionado alumínio, observa-se uma uniformidade nesta área, o que possivelmente indica que não há descontinuidades, porém no passo 68 que foi detectado um pequeno pico com 6729 contagens, criando a suspeita da presença de alguma descontinuidade, como confirmados na microscopia.

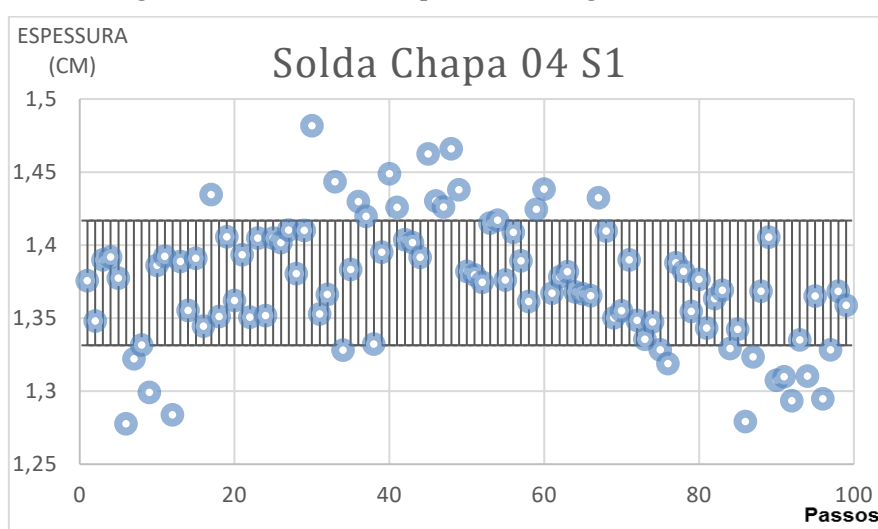
Figura 69- Gráfico 3D da tomografia da chapa com impurezas na solda.



Fonte: Autor (2018)

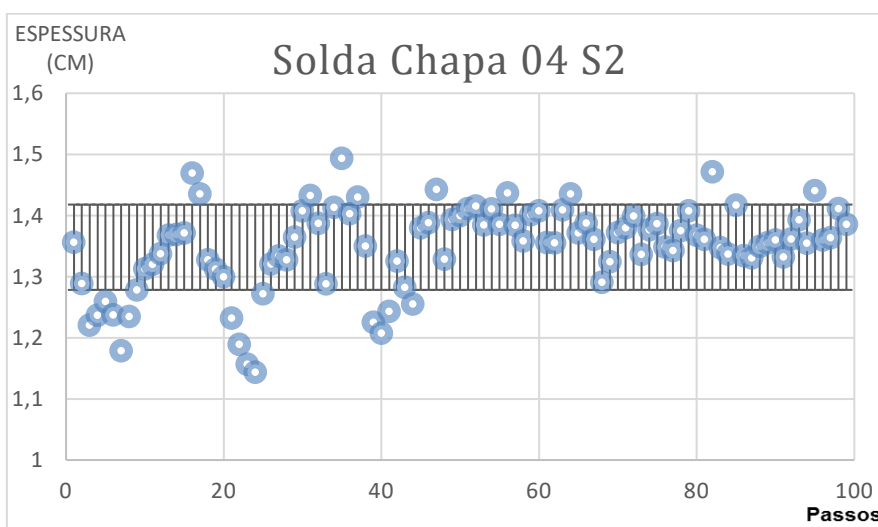
Nas figuras 70 a 72 temos os gráficos da solda na chapa 04, soldada com impurezas, que apresentaram média de espessura em S1 de 1,374 cm e DV 0,035 cm, S2 com 1,348 cm e 0,069 cm e em S3 de 1,359 cm com DV de 0,030 cm com erro de 0,69%. Vários pontos estão com menos de 1,29 cm de espessura, chegando a 1,15 cm de espessura de material na região onde foi adicionado vidro, entre os passos 1 e 49. Na outra metade, do passo 50 até 99 onde foi adicionado alumínio foi encontrada espessura de 1,27 cm, também representado a existência de descontinuidade. As descontinuidades variaram de poros e as impurezas como mostrado na microscopia.

Figura 70- Gráficos das espessuras na região S1 da Solda.



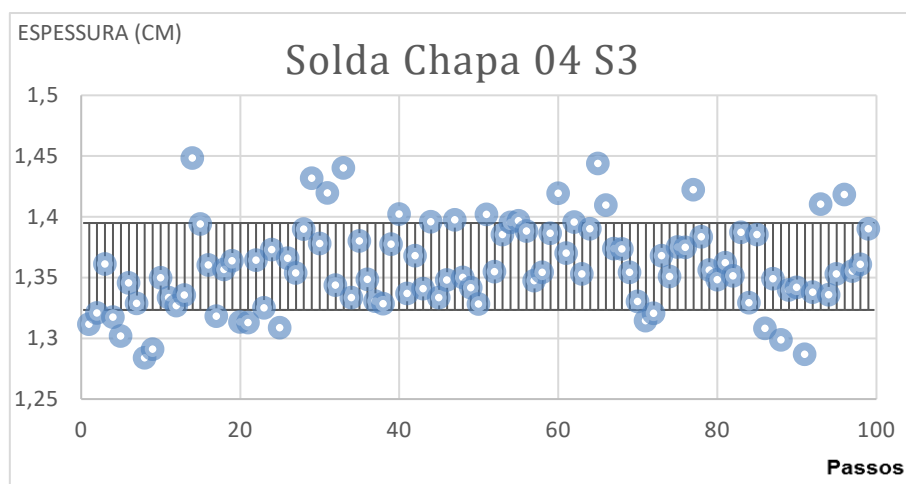
Fonte: Autor (2018)

Figura 71- Gráficos das espessuras na região S2 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

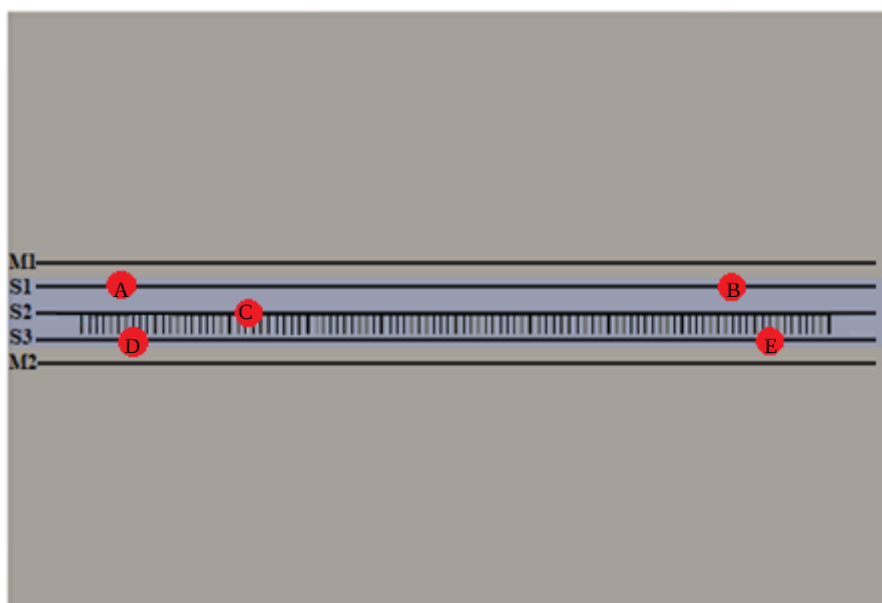
Figura 72- Gráficos das espessuras na região S3 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

A localização de alguma das maiores descontinuidades da Chapa 04 como foi visto nos gráficos das figuras 70 a 72, são mostrados na figura 73. Onde na varredura S1, no ponto A passo 6, na região com impureza de vidro, uma espessura de material de 1,277 cm e no ponto B no passo 86 uma espessura de 1,278 na região com adição de alumínio. No passo 23 da varredura S2 a descontinuidade mostra uma espessura de material de 1,15 cm, letra C. Já na varredura S3, espessuras de material com 1,283 cm, letra D e 1,286 cm, letra E, foram localizadas nos passos 8 e 91 respectivamente.

Figura 73- Localização de algumas decontinuidades na chapa 04.

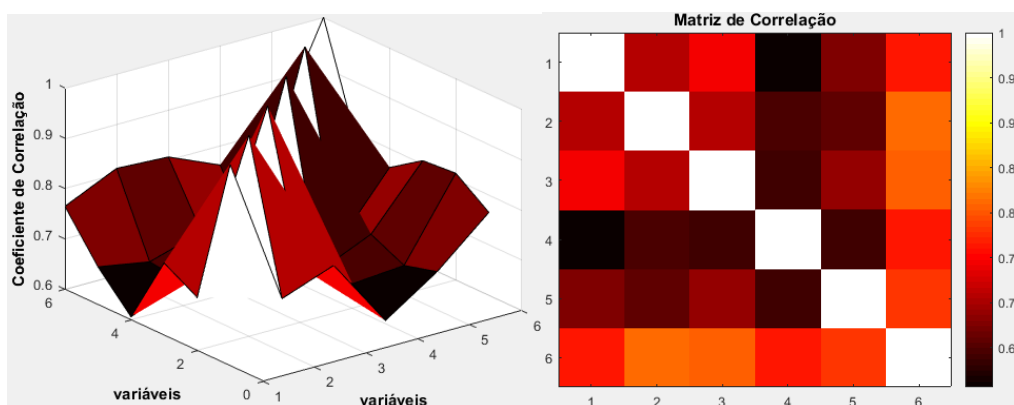


Fonte: Autor (2018)

A porosidade utilizando a densidade de referência foi até 17,9% na região com vidro e 7,4% na região com alumínio. Pela densidade calculada pela Equação 11 a ϕ foi 16,9% na parte com vidro e na parte com alumínio 6,2%.

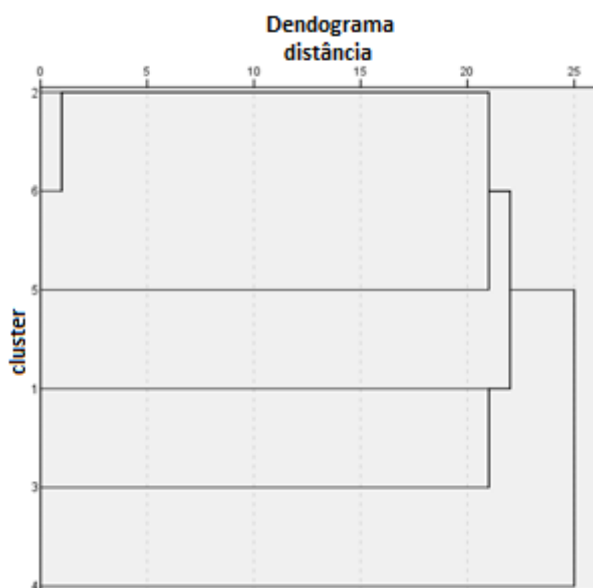
Pelas imagens da figura 74, é possível observar que a correlação da solda 04 apresenta resultados entre de 1 a 0,6, indicativo de divergências com a solda de referência. É possível observar o dendrograma da solda 04 na figura 75. Os *clusters* 2 e 6 encontram-se fora do grupo em relação aos demais, apresentando evidência de descontinuidade localizada na solda porem não identificando se é vidro ou alumínio. Os demais *clusters* estão próximos, porem chegando a 25, o que difere da referência.

Figura 74- Coeficiente de correlação da solda 04.



Fonte: Autor (2018)

Figura 75- Dendrograma da solda 04.

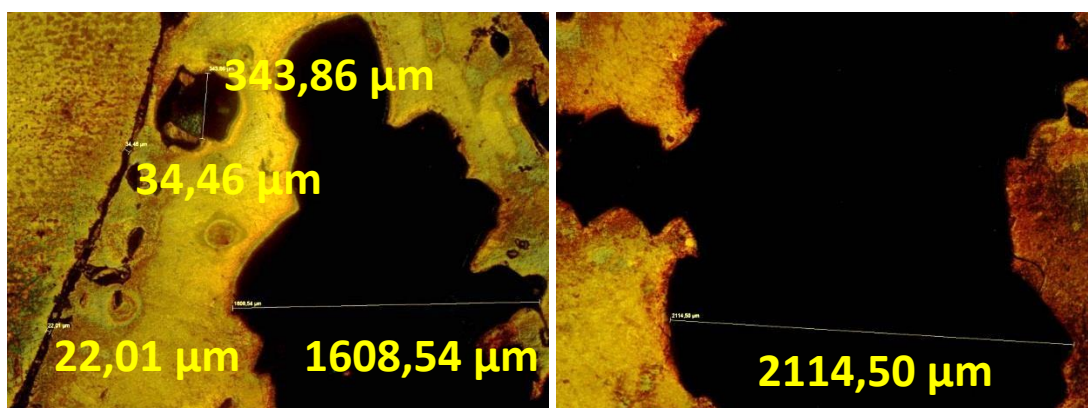


Fonte: Autor (2018)

4.4.5 Amostra 05: Chapa soldada sem Gás de Proteção

Como esperado, as imagens microscópicas mostraram justamente a grande quantidade de poros na solda, além de trincas e falta de fusão. A ausência do gás de proteção além de desestabilizar o arco elétrico, produz uma grande oxidação da junta, contribuindo para formação de grandes poros. A figura 76 mostra trinca com 22,01 μm a 34,46 μm de espessura e poros com diâmetros compreendidos entre 1608,54 μm a 2114,50 μm .

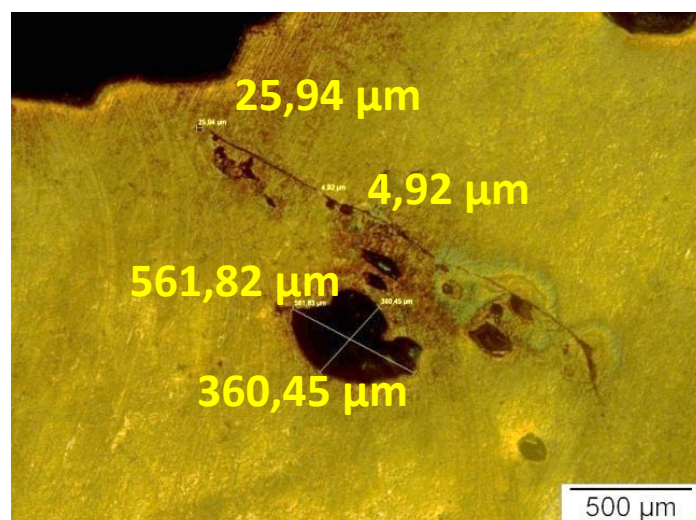
Figura 76- Microscopia mostrando trincas e região sem preenchimento de material, localizados na região da solda.



Fonte: Autor (2017)

Na figura 77 é possível observar poros com 25,94 μm e descontinuidades com até 561,83 μm de espessura. Também foi encontrada uma longa trinca com espessura média de 4,92 μm

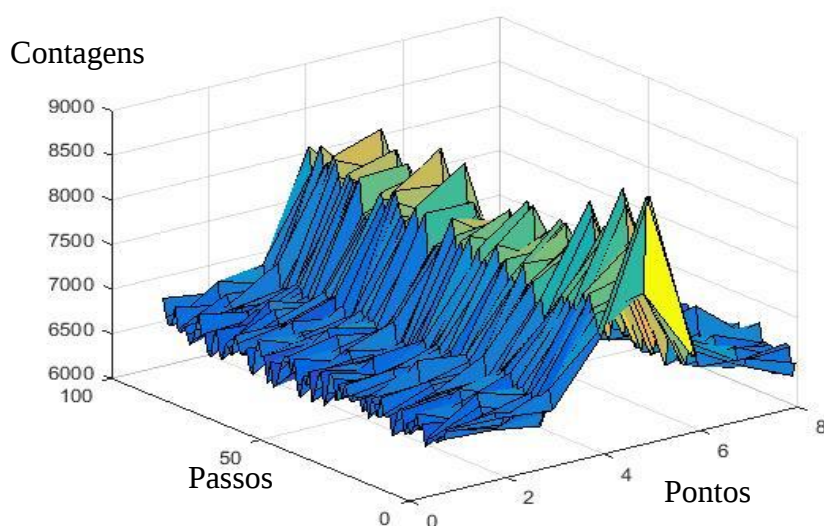
Figura 77- Microscopia com poros e trincas localizados na região da solda.



Fonte: Autor (2017)

Pelos dados obtidos com a tomografia da chapa 05, foi criado um gráfico mostrado na figura 78, através dele é possível observar a grande quantidade de descontinuidades existente nesta solda, indicado pelos picos de contagens, que chegaram a ter 8738 contagens, existentes por toda a região da solda. Esse tipo de sinal provavelmente indica muita porosidade e quantidade de descontinuidades que acarretou uma excessiva falta de material na solda. A falta do gás de proteção cria uma característica na solda semelhante a uma soldagem em condições de vento, como visto na Secção 4.4.2, mostrando descontinuidades parecidas com poros em grande quantidade por todo cordão de solda.

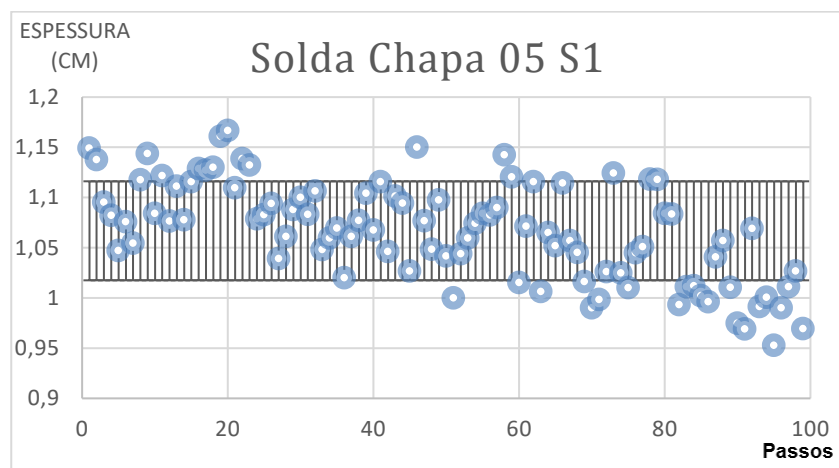
Figura 78- Gráfico 3D da tomografia da chapa soldada sem o gás de proteção.



Fonte: Autor (2018)

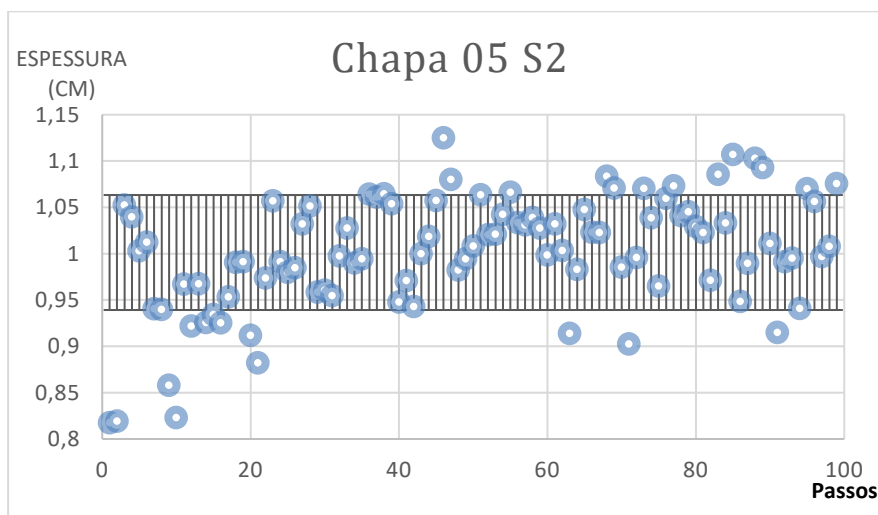
A média de espessura da solda em S1 de 1,066 cm e DV 0,049 cm, S2 com 1,018 cm e 0,063 cm e em S3 de 1,301 cm com DV de 0,037 cm são mostrados nos gráficos das figuras 79 a 81, apresentando erro de 17,58%. Abaixo de 1,29 cm de espessura, diversas descontinuidades foram encontradas na solda, com pontos chegando a ter 0,817 cm de espessura. Grande quantidade de descontinuidades representada pela existência de trincas e poros em toda extensão do cordão de solda, como visto na microscopia.

Figura 79- Gráficos das espessuras na região S1 da Solda.



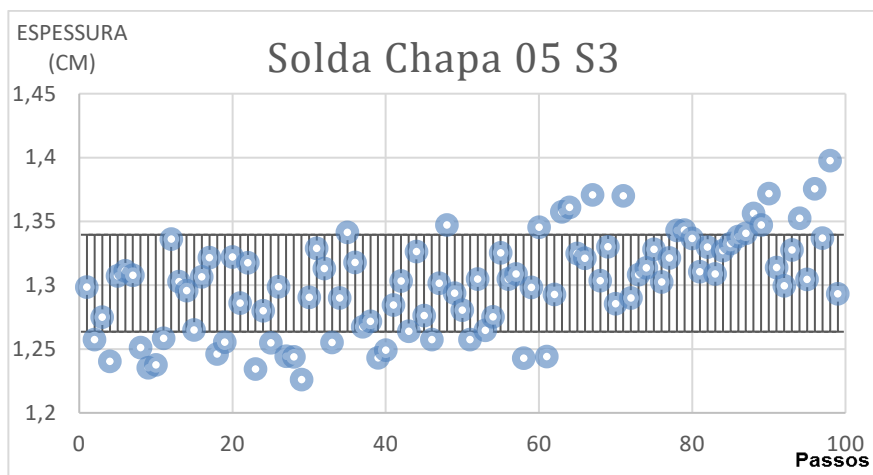
Fonte: Autor (2018)

Figura 80- Gráficos das espessuras na região S2 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

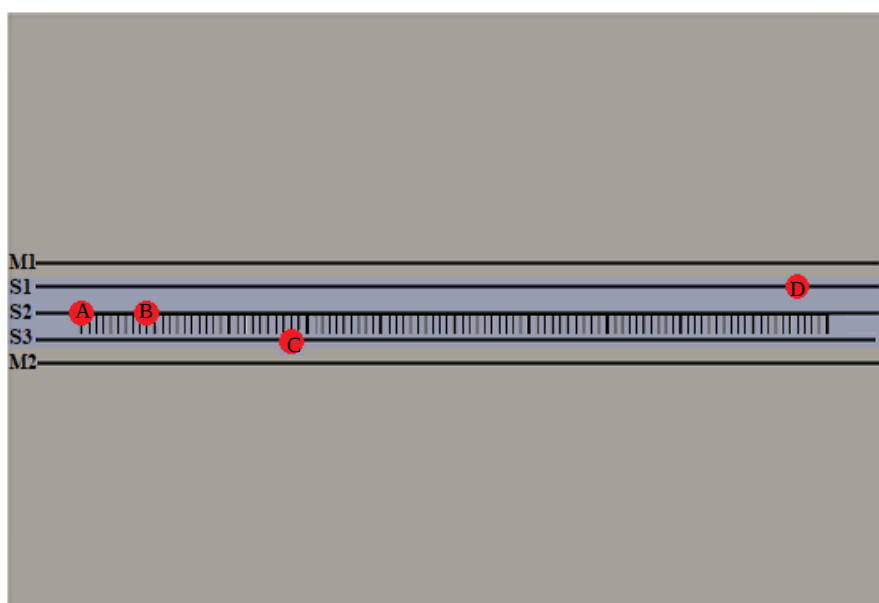
Figura 81- Gráficos das espessuras na região S3 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

A figura 82 mostra a localização de quatro das maiores descontinuidades da Chapa 05 como foi visto nos gráficos das figuras 74 a 76, cada traço da régua corresponde ao local do passo. A maior descontinuidade contendo 0,817 cm de material no passo 1 na varredura da altura S2, mostrado pelo ponto A. No ponto B, correspondente a leitura no passo 10 e altura S2 a espessura de material foi 0,8229 cm. O ponto C localizado na varredura S3 e passo 29, foi detectada descontinuidade com espessura de material de 1,226 cm e na altura S1 no passo 95, a espessura de material foi 0,9525 cm.

Figura 82- Localização de algumas descontinuidades na chapa 05.



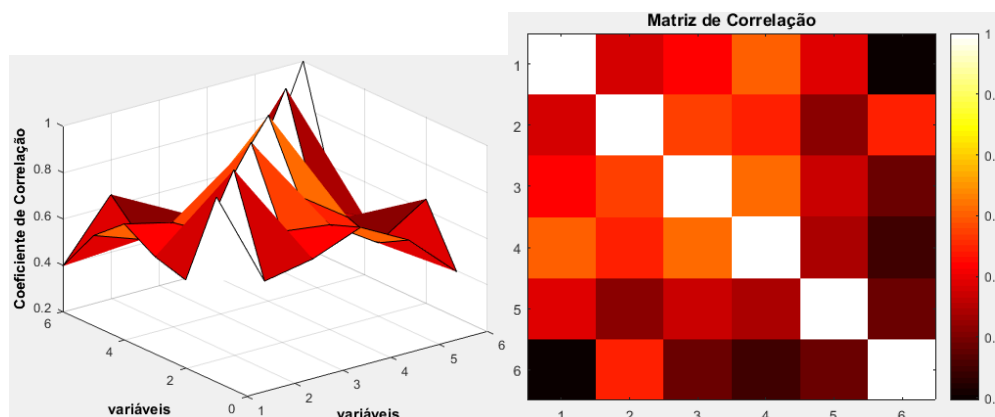
Fonte: Autor (2018).

Na chapa 05 onde foi encontrado regiões com espessura de material com 0,817 cm devido a grande quantidade de porosidade, neste ponto o volume de porosidade através da Equação 18 tem $0,1313 \text{ cm}^3$, pelo método de Pires(2002) utilizando a densidade de referência foi encontrada uma porosidade de 39,28% correspondendo a $0,1312 \text{ cm}^3$. Apresentando uma diferença de 0,07% entre os dois métodos na região porosa. Nesta amostra, utilizando as medidas de densidade calculada com a Equação 11 o ϕ foi 37,21%.

Através da figura 83, é possível observar uma correlação com valores mínimos de 0,4 bem distante de 1, isso mostra muito heterogeneidade na correlação, um indicativo da existência de descontinuidades. Na figura 84 mostra o dendrograma do *cluster* hierárquico da solda 05. Os *clusters* 4, 5 e 6 se se afastam dos demais, devido a

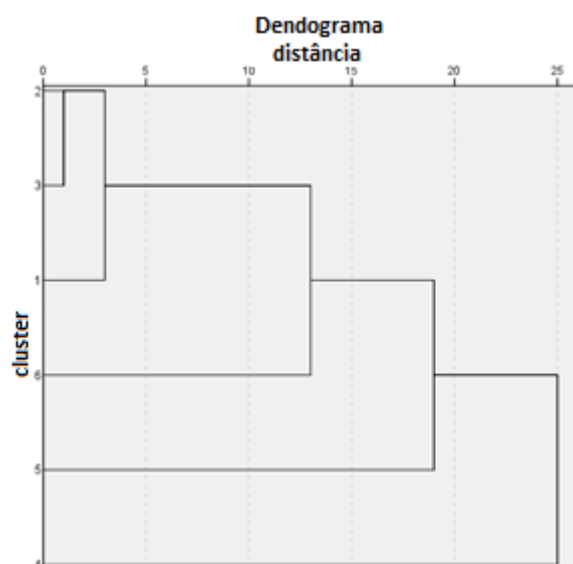
localização de muitas discontinuidades isso pode ser confirmado pelo *cluster* da solda de referência.

Figura 83- Coeficiente de correlação da solda 05.



Fonte: Autor (2018)

Figura 84- Dendrograma da solda 05.

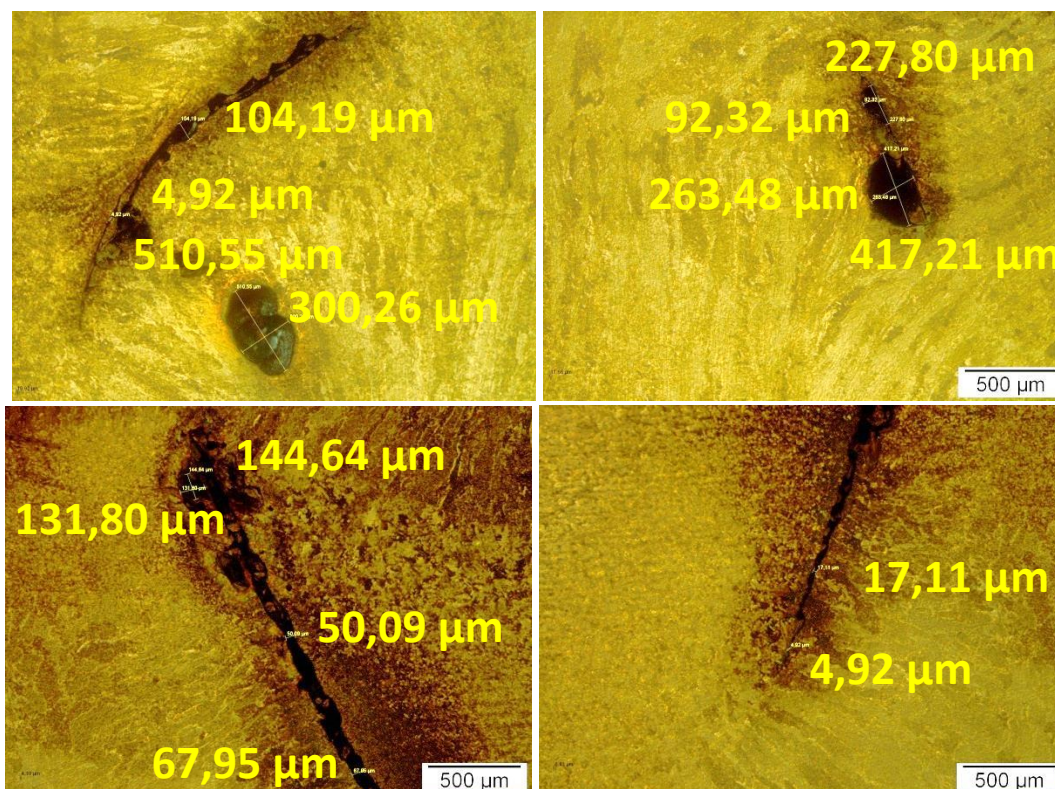


Fonte: Autor (2018)

4.4.6 Amostra 06: Chapa soldada manualmente

As imagens microscópicas mostram poros com diâmetros que variam de 92,32 μm a 510,55 μm e longas trincas com espessuras compreendidas entre 4,92 μm e 67,95 μm , conforme mostra a figura 85. Com esta simulação, fica evidente que a mão de obra com pouca qualificação (aprendizes) na indústria naval é a causadora de um alto índice de retrabalho.

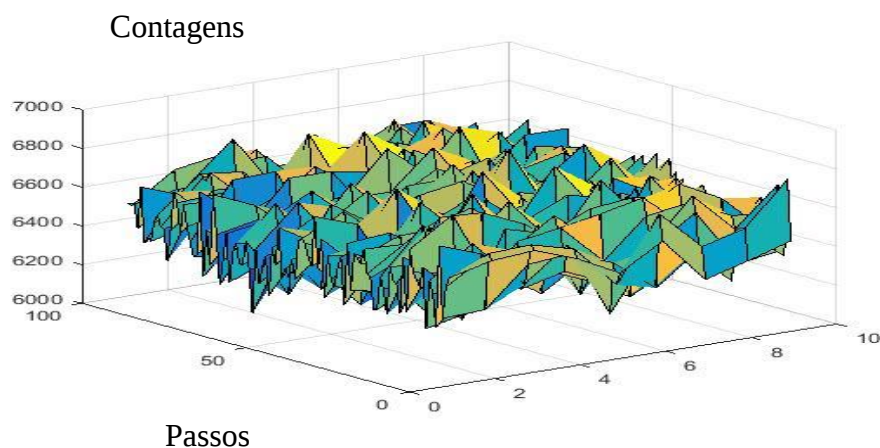
Figura 85- Imagens microscópicas mostrando descontinuidades da solda da chapa 06.



Fonte: Autor (2017)

Com os dados da tomografia da chapa 06, foi traçado o gráfico mostrado na figura 86. Por ele é possível observar uma variação muito grande das contagens por toda superfície da amostra, impossibilitando a identificação de alguma descontinuidade na solda. O sinal tanto na região da solda quanto do metal base apresentaram características semelhantes. A suspeita de ter ocorrido isto foi devido a inexperiência na hora da soldagem, já que o material de solda durante a fusão vazou para fora do chanfro se espalhando pela superfície da chapa, formando uma solda espessa e mal distribuída.

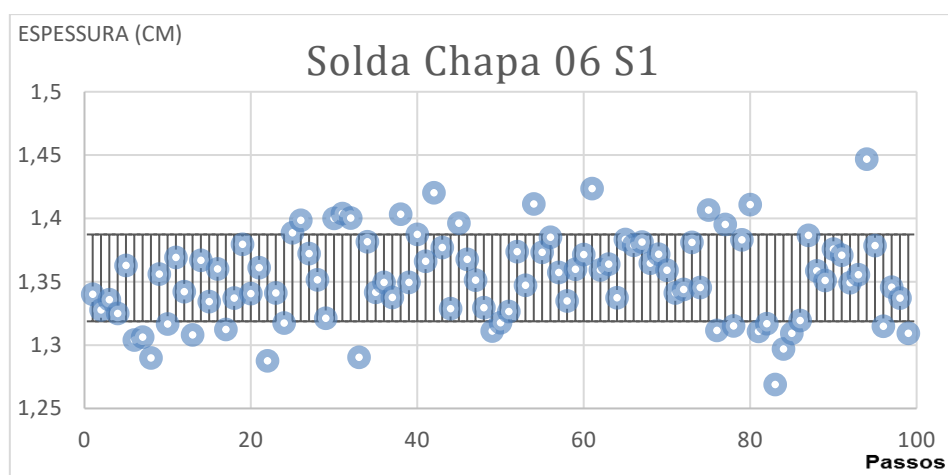
Figura 86- Gráfico 3D da tomografia da chapa soldada manualmente.



Fonte: Autor (2018)

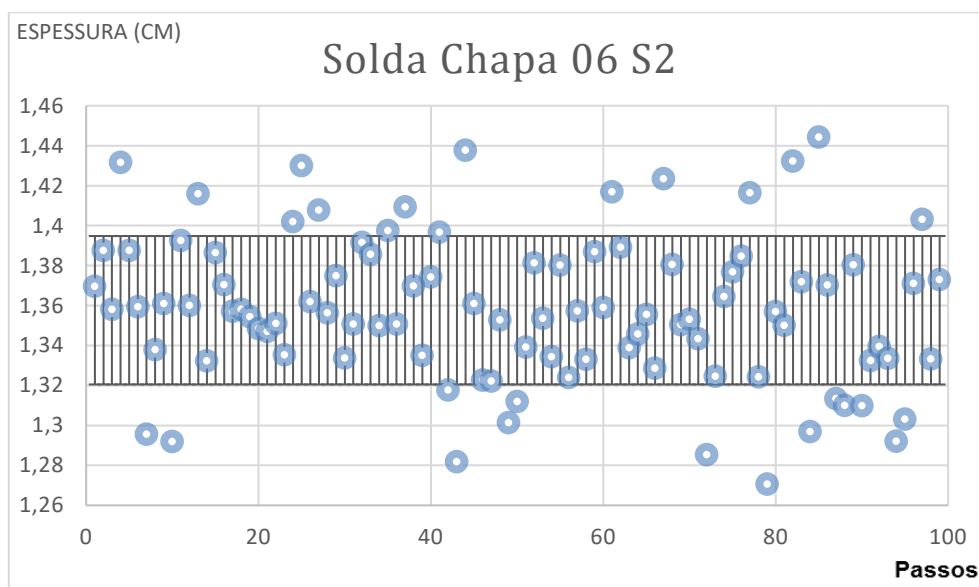
As figuras 87 a 89 mostram os gráficos da solda na chapa 06 que apresentaram um média de espessura em S1 de 1,353 cm e DV 0,034 cm, S2 com 1,357 cm e 0,037 cm e em S3 de 1,346 cm com DV de 0,036 cm e erro de 1,29%. Vários pontos de descontinuidades foram encontrados na solda, apresentando espessura menor que 1,29 cm de espessura, chegando a ter 1,26 cm de espessura de material e imagens microscópicas mostram descontinuidades na solda.

Figura 87- Gráficos das espessuras na região S1 da Solda.



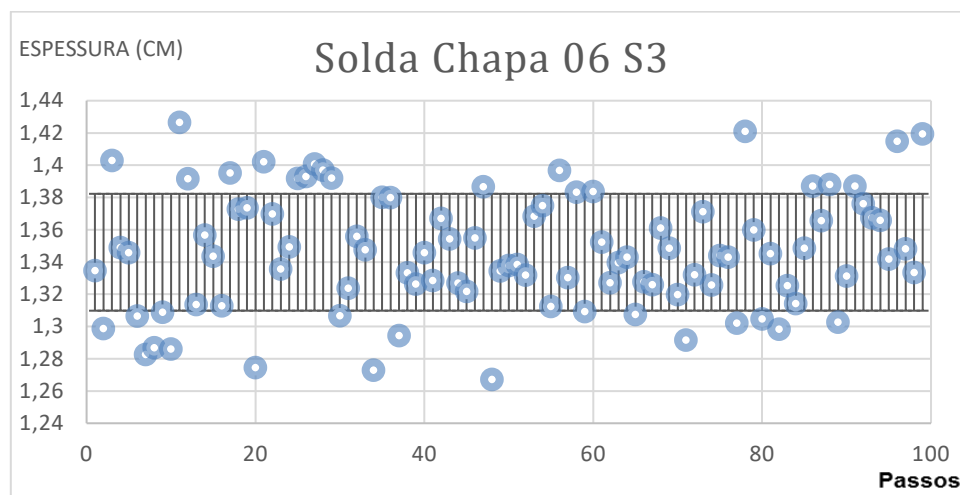
Fonte: Autor (2018)

Figura 88- Gráficos das espessuras na região S2 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

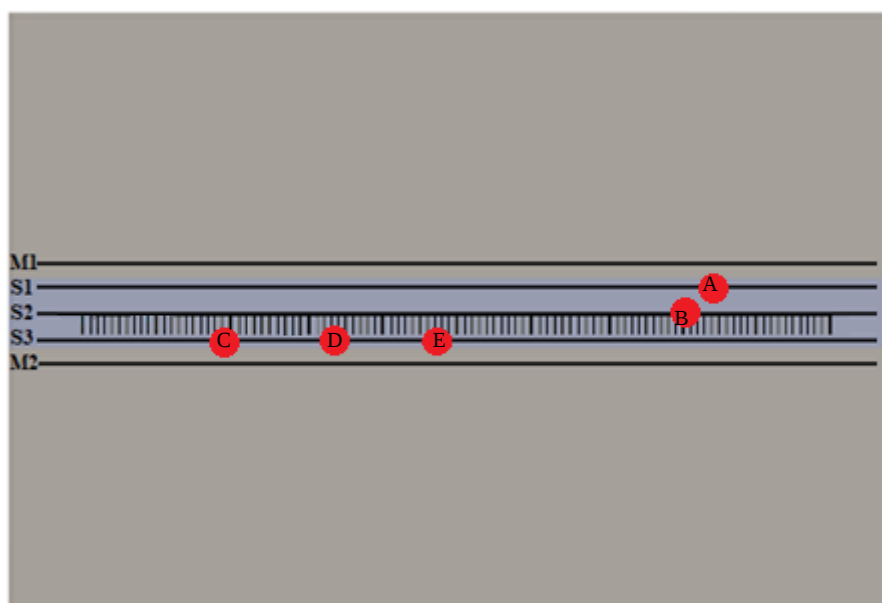
Figura 89- Gráficos das espessuras na região S3 da Solda.



Fonte: Autor (2018)

Representados nos gráficos das figuras 87 a 89, a localização de cinco das maiores discontinuidades da chapa 06, são mostrados na figura 90. Em A, existe uma discontinuidade com 1,268 cm de material que está na varredura S1 e passo 83. Em B com 1,27 cm localizado no passo 79 em S2. Na varredura S3 existem discontinuidades com espessura de material de 1,274 cm, letra C, 1,272 cm em D e 1,266 cm, letra E encontradas respectivamente nos passos, 20, 34 e 48.

Figura 90- Localização de algumas decontinuidades na chapa 06.

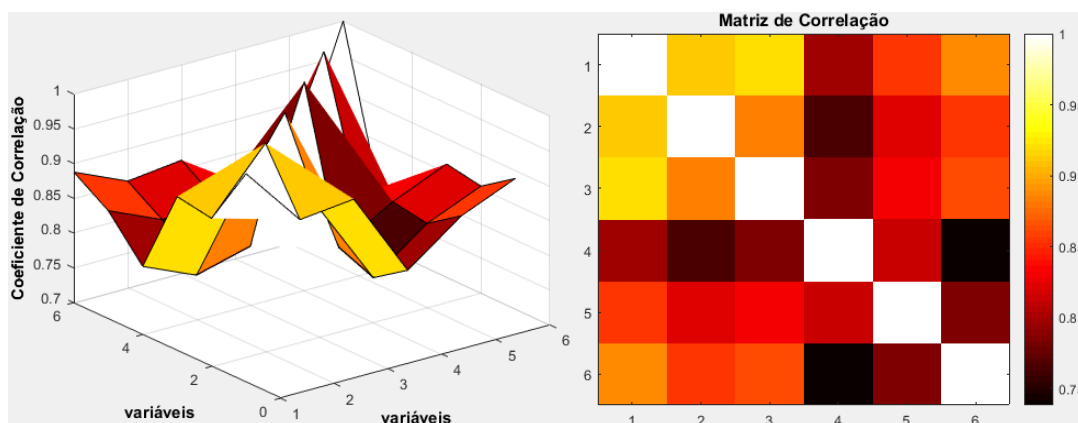


Fonte: Autor (2018)

Na solda da chapa 06 a maior região de porosidade foi 9,1% pela densidade de referência e 8% calculada pela densidade gravimétrica.

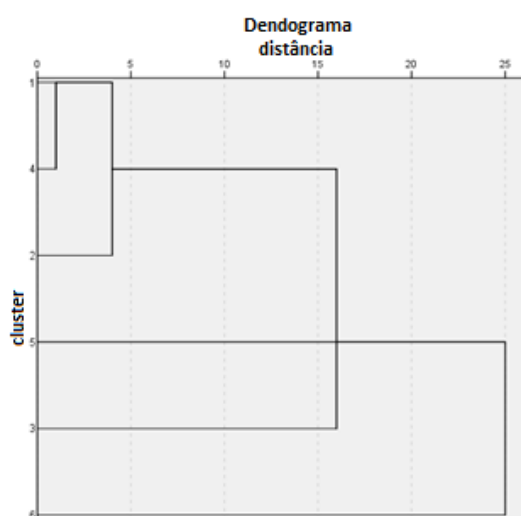
Apesar do diagrama 3D apresentar dificuldade em evidenciar uma descontinuidade, pelo coeficiente de correlação e sua matriz, mostrado na figura 91, é possível observar que existe descontinuidades na amostra, indicado pela baixa correlação que chega a valores mínimos de 1 a 0,7, comparado com a solda de referência. É possível observar pelo dendrograma da figura 85 a análise *cluster* da solda 06. Em que os *clusters* 3, 5 e 6 aparecem afastados chegando a ter altura 25, bem separado dos demais com menos de 5 as altura entre eles, indicando algumas descontinuidades mais pontuais.

Figura 91- Coeficiente de correlação da solda 06.



Fonte: Autor (2018)

Figura 92- Dendrograma da chapa 06.



Fonte: Autor (2018)

Assim, os resultados mostraram a eficiência da tomografia gama na inspeção de solda, foi mostrada a forma de obter informações das amostras e com isso analisar sua estrutura e descobrir a existência de descontinuidades, que foram calculadas através dos dados obtidos e equações bem fundamentadas possibilitando, detectar, dimensionar e localizar as descontinuidades.

Para isso foram empregados vários métodos de análise, como coeficiente de correlação e *cluster*, análise estatística, cálculos de dimensionamento e medidas de densidade e localização, que forneceram a coerência dos resultados obtidos, dando confiança nos resultados. Junto com a fundamentação teoria, com resultados comparativos na literatura e outros trabalhos acadêmicos que fortaleceram esta tese.

5 CONCLUSÃO

Com os resultados este trabalho mostrou a total viabilidade do uso do método de ensaio não destrutivo por tomografia gama na inspeção de solda com limite de detecção de 0,4 mm, eficaz em detectar descontinuidades em chapas soldadas, sendo comparável a outros de END. Embora a tomografia já disponha de equipamentos com resolução superiores a 4 μm .

- Através das imagens microscópicas foi firmada a qualidade da solda de referência e as descontinuidades demais amostras. No ensaio tomográfico as suspeitas de descontinuidades foram de fato posteriormente evidenciadas através da análise estatística e matriz do coeficiente de correlação e localizadas pelos dendrogramas de *cluster* dos dados e o posicionamento das leituras.

- Os coeficientes de correlação e dendrogramas mostraram que a análise de *cluster* apresentaram resultados bem coerentes com as análises estatísticas e a microscopia, no objetivo de localizar as soldas com descontinuidades. Esquemas de resultados parecidos foram obtidos por Moura *et al.*(2015) e Oliveira(2017) usando amostras de tubos de aço soldados.

- As imagens microscópicas, em especial, da chapa 05 em que a soldagem foi realizada sem o gás de proteção, mostraram grandes porosidades chegaram a ter mais de 2114,50 μm de diâmetro. Pela tomografia esta porosidade atingiu 39,28%, dentro da solda, estabelecida pela Norma AWS D1.1.

- Valores do volume da varredura na chapa de referência apresentou uma média 19,78 cm^3 , enquanto a chapa 05 apresentou 15,26 cm^3 de material, devido à grande quantidade de descontinuidades. O metal base apresentou um erro percentual de 0,12% e a solda de referência de 1,6% dentro do limite de erro estabelecido de 5%, segundo Alyassin(1994). No caso da chapa 05 apresentou o maior erro encontrado 15,83% decorrente das descontinuidades.

- Os métodos para calcular o volume da descontinuidade, descritos pelas Equações 18 e a 20 utilizada por Pires(2002), apresentaram uma diferença de 0,07% entre seus resultados.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Concluída a presente pesquisa ficam a complementar os estudos:

- Aplicação da técnica utilizada neste trabalho em outros tipos de materiais utilizados na indústria, como por exemplo chapas ou tubos de alumínio, titânio, carbono, ferro e suas ligas.
- Aplicação da técnica utilizada neste trabalho com outros tipos de fonte radioativa.
- Aprimoramento de um modelo para melhorar a resolução dos dados e possibilitar a detecção de descontinuidades cada vez menores.
- Projeto de um equipamento tomográfico gama de baixo custo e portátil, que facilite a inspeção em campo.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, R.; ZBORAY, R.; **Gamma radiography and tomography with a CCD camera and Co-60 source**. Applied Radiation and Isotopes v. 127 p. 82–86, 2017
- AIRD, E. G. E.; **Basic physics for medical imaging**. Ed. Butterworth-Heinemann Ltd. Medical Books UK 1988
- ANDREUCCI, R.; **Aplicação Industrial: Ensaio por Líquidos Penetrantes**. Abend Ed. Jun. 2013
- ANDREUCCI, R.; **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultrassom**. Abend Ed. Mai. 2014
- ASME Code; Section VIII, **BPVC - Rules For Construction Of Pressure Vessels** Division 1, 2017
- BANAS, K.; BANAS, A.M.; GAJDA, M.; KWIA TEK, W.M.; PAWLICKI, B.; BREESE, M.B.H.; **Analysis of synchrotron radiation induced X-ray emission spectra with R environment**, Radiation Physics and Chemistry, Elsevier, Volume 93, Pages 82-86, December 2013
- BARROS, P. S.; **Influência Da Convecção Forçada Em Juntas Soldadas**, Dissertação de Mestrado em Materiais e Fabricação, Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, DEMEC, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2015
- BARTOLOMEW, R. N.; CASAGRANDE, R. M.; **Measuring Solids Concentration in Fluidized Systems by Gamma-Ray Absorption**, Ind. Eng. Chem 49 (3), p. 428–431, March 1957
- BENAFER; **Chapa Grossa ASTM A 131 Graus A – AH – DH – EH**; Disponível em: <<http://www.benafer.com.br/index.php/produto/chapa-grossa-astm-a-131-graus-a-ah-dh-eh/>>. Acesso em: 18 Fev. 2017
- BOSSI, R. H.; IDDINGS, F. A.; WHEELER, G. C.; **Radiographic Testing**, Nondestructive Testing Handbook, 3ª ed., V. 4, American Society for Nondestructive Testing, Edit. Patrick O. Moore, USA, 2002
- CARVALHO, A. A.; REBELLO, J. M. A.; SOUZA, M. P. V.; SAGRILO, L.V.S.; SOARES, S.D.; **Reliability of non-destructive test techniques in the inspection of pipelines used in the oil industry**, International Journal of Pressure Vessels and Piping v. 85 p. 745–751, 2008
- CHEN, B.; FANG, Z.; XIA Y.; ZHANG L.; HUANG, Y.; WANG, L.; **Accurate defect detection via sparsity reconstruction for weld radiographs**. NDT and E International Vol. 94 p. 62–69 Ed. Elsevier, November 2017

DALTON, L.; BALLARIN, V.; BRUN, M.; **Clustering Algorithms: On Learning, Validation, Performance, and Applications to Genomics.** Journal Current Genomics.; Vol. 10(6), p. 430–445, Sep. 2009

DANTAS, C.C.; MELO, S.B.; OLIVEIRA, E.F.; SIMÕES, F.P.M.; SANTOS, M.D.G.; SANTOS V.A.; **Measurement of density distribution of a cracking catalyst in experimental riser with a sampling procedure for gamma ray tomography,** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 266, p. 841–848, January 2008

DENNIS, M. J.; **Industrial Computed Tomography.** American Society for Metals (ASM) International, ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control v. 17, p. 347- 401, USA, 1989

DOCPLAYER; **Espectrometria gama com detectores de cintilação,** Departamento de Física da Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Portugal. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/25835979-Trabalho-pratico-espectrometria-gama-com-detectores-de-cintilacao.html>> Acesso em: Abril 2017

DROUBI, M. G.; FAISAL, N. H.; ORR F.; STEEL, J. A.; EL-SHAIB, M.; **Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints.** Journal of Constructional Steel Research Vol. 134, p. 28–37, Ed. Elsevier, March 2017

DUNN, S.; JANOS, L.; ROSENFELD, A.; **Bimean clustering.** Journal Pattern Recogn., Vol. 1, Issue 3, p. 169-173 Ed. North-Holland Publishing Comp. EUA, March 1983

ESPINOZA, F. A.; OLIVER, J. M.; WILSON, B. S.; STEINBERG, S. L.; **Using hierarchicalclustering and dendrograms to quantify the clustering of membrane proteins.** Bulletin of Mathematical Biology, Vol. 74, p. 190–211, Jul 2011

EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D; **Cluster Analysis.** 5. ed. p33-36.: John Wiley and Sons, 2011

FOGAGNOLO, J. B.; **Introdução a Processos e Metalurgia da Soldagem.** Unicamp. p. 99 São Paulo. 2011

GERDAU; **Arames Para Solda;** Disponível em: <<https://www.comercialgerdau.com.br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/catalogo-arames-para-solda.pdf> > Acesso em: 18 Fev. 2017

GUEDES, K. A. N. **Simulação por meio do código MCNPX de Tomografia Gama e Validação com Dados Experimentais.** Dissertação de Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2016

GOLDAK, J.; ASADI, M.; ALENA, R. G.; **Why power per unit length of weld does not characterize a weld?** Computational Materials Science, p. 390 – 401, Fevereiro 2010

GREEN, W. H.; SINCEBAUGH P.; **Nondestructive Evaluation of Complex Composites Using Advanced Computed Tomography (CT) Imaging**, Army Research Laboratory, ARL-TR-2400, February 2001

HARDING, G.; **On the Sensitivity and Application Possibilities of a Novel Compton Scatter Imaging System**, IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-29 p.1260–1265, 1982

HENDRICKS, J.S.; **MCNPX Model/Table Comparison**. LA-14030 Los Alamos National laboratory, March 2003

HUGONNARD, P.; GLIÈRE, A., **X-ray simulation and applications, Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology**, Germany Berlin March 1999

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; **Industrial Process Gamma Tomography TECDOC-1589**, Vienna, Austria, Maio 2008

JAENISCH, G. R.; BELLON C.; EWERT U.; **aRTist – Analytical RT Inspection Simulation Tool for Industrial Application**. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China Oct 2008

JAIN, A.K.; MURTY, M.N.; FLYNN, P.J.; **Data Clustering: A Review** Michigan State University ACM Computing Surveys, Vol. 31, No. 3, September 1999

KAK, A. C.; SLANEY M.; **Principles of computerized Tomographic Imaging**, IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Electronic Copy, p. 49- 112 New York 1988

KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. J.; **Finding Groups in Data An Introduction to Cluster Analysis**. S.l. 34: John Wiley and Sons, 2005

KUMAR, S.B.; MOSLEMIAN, D.; DUDUKOVIC, M.P.; **Gas-holdup measurements in bubble columns using computed tomography**. AIChE Journal, v.43(6), p.1414-1425, 1997

LANCASTER, J.F. **The physics of welding**. Physics in Technology. N. 2, Vol. 15, p. 73–79, IOPScience 1984

MALARVEL, M.; SETHUMADHAVAN, G.; BHAGI, P. C. R.; KAR S.; SARAVANAN T.; KRISHNAN A.; **Anisotropic diffusion based denoising on X-radiography images to detect weld defects**. Digital Signal Processing Vol. 68, p. 112–126 ed. Elsevier, June 2017

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3^a. ed. p. 365: UFMG, v. Único, Belo Horizonte 2011

MARISCOTTI, M. A. J.; JALINOOS, F., FRIGERIO, T.; RUFFOLO, M.; THIEBERGER, P.; **Gamma-Ray Imaging for Void and Corrosion Assessment**, Concrete International, Nov 2009

MCNPX, **User's Manual**. [S.l.], 2005

MILER; **Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)**, 2014. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com>>. Acesso em: 01 Junho 2017

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B; **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Escola de engenharia - UFMG, 01 Janeiro 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: Março 2017

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; **Processos de Soldagem**. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, 01 Fevereiro 2006. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012.pdf>>. Acesso em: Março 2017

MORGAN, L.; NOLAN, P.; KIRKHAM, A.; WILKINSON, R.; **The use of automated ultrasonic testing in pipeline construction**. Insight 11 v.45 p.746–53. 2003

MOURA, A. E.; DANTAS, C. C.; NERY, M. S.; BARBOSA, J. M.; ROLIM, T. L.; LIMA, E. A. O.; SANTOS, S. B. M. V. A. D.; **Non-destructive evaluation of weld discontinuity in steel tubes by gamma ray ct**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, ELSEVIER, p. 155–162, 2015

NETO, J. M. R.; FIORI, A. P.; LOPES, A. P.; MARCHESE, C.; COELHO, C. V. P.; VASCONCELLOS, E. M. G.; SILVA, G. F.; SECCHI, R.; **A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas**. Revista Brasileira de Geociências v. 41, p. 498-508, Set 2011

NIST XCOM.; **National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1-t.html>>. Acesso em: 18 fev. 2018

OLIVEIRA, E. F.; **Reconstrução Tomográfica com Superfícies B-Splines**. Dissertação de Mestrado em Ciências — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2011

OLIVEIRA, K. M.; **Tomografia Gama Computadorizada e simulações com MCNPX Aplicados para Estudo da Solda** Dissertação de Mestrado em Ciências — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2017

OLIVEIRA, K. M.; DANTAS, C.C.; FERREIRA, R. A. S.; MELO, S.B.; LIMA, E. A. O.; BARBOSA, E. S.; **Gamma Ray and MCNPX Simulation Applied to Weld Structure Investigation**. 8th World Congress on Industrial Process Tomography – WCIPT8, Iguassu, Brazil, September 2016

PALHA, R. N.; **Microtomografia Computadorizada De Isoladores De Compósito Utilizando Reconstrução 2D E 3D**, Comissão Nacional De Energia Nuclear, Dissertação de Mestrado, Departamento De Energia Nuclear, Universidade Federal De Pernambuco, UFPE, Recife, PE, Janeiro 2014

PIRES, L. F.; **Gamma-Ray Computed Tomography to Characterize Soil Surface Sealing**. Applied Radiation and Isotopes. v. 57, p. 375-380, Oxford, 2002

RSICC; COMPUTER CODE COLLECTION MCNP5/MCNPX; **Monte Carlo N-Particle Transport Code System Including MCNP5-1.60 and MCNPX-2.7.0 and Data Libraries**. CCC-740 Oak Ridge National Laboratory Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2011

ROSENFELD, A., SCHNEIDER, V. B., AND HUANG, M. K.; **An application of cluster detection to text and picture processing**. Computer Science Center of the University of Maryland. IEEE Trans. Inf. Theor. 15, 6, p. 672–681. EUA, Nov. 1969

SALVADOR, P. A. V.; **Análise De Sistemas Multifásicos Utilizando Tomografia Computadorizada Gama Monoenergética E Polienergética**, Tese de Doutorado, Instituto De Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP, São Paulo 2008

SARALI, S.; DOGAN, N.; DOGAN, I.; **Comparison of hierarchical cluster analysis methods by cophenetic correlation**. Juornal of Inequalities and Applications, Ed. Springer, p. 203, April 2013

SCHIEWE, K.E.; TUZLA, K.; **Measurements of Solid Concentration in a Downward Vertical Gas – Solid Flow**. AIChE.J., v. 45 n. 5, p. 949-955, 1999

SCHON, J.; **Propriedades Fisicas Das Rochas Aplicadas À Engenharia: Fundamentos Teóricos E Práticos**. Ed.1 Elsevier, Rio de Janeiro, 2015

SPRAWLS, JR., P.; **Physical Principles of Medical Imaging**. Madison, Wisconsin: Medical Physics. 2 ed., USA, 1995

STANLEY, J. H.; **Physical and Mathematical Basis of CT Imaging**, American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM CT Standardization Committee E7.01.07, ASTM Tutorial, Section 3, Columbus, OH, 1986

VEERA, U. P.; **Gamma ray tomography design for the measurement of hold-up profiles in two-phase bubbles columns**. Chemical Engineering Juornal, ELSEVIER, p. 21, 2001

WAINER, E.; BRANDÍ, S. D.; MELO, F. D. H.; **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1ª. ed.: Edgard Blücher LTDA., v. Único,. p 506. ISBN ISBN 85-212- 0238-5. São Paulo 2004

WATERS L. S.; **MCNPX User's Manual**, Version 2.3.0, Los Alamos National Laboratory report LA-UR-02-2607, April 2002

ANEXO A - SIMULAÇÃO MCNPX

Abaixo o script da simulação da chapa no MCNPX

```

1-      riser: Com a Chapa
2-      c source/detector center position
3-      c cell cards
4-      1 1 -7.86 1 -2 -3
5-      2 0          3
6-      3 0          -3 #1 #4 #5
7-      4 2 -11.32 4 -5 6 -7
8-      5 3 -3.67 -8 9 -10
9-
10-     c surface cards
11-     1  px  7.00
12-     2  px  8.37
13-     3  so  40
14-     4  cx  0.275
15-     5  cx  10.275
16-     6  px  8.91
17-     7  px  16.41
18-     8  cx  2.54
19-     9  px  16.42
20-    10  px  21.5
21-
22-     c data card
23-     mode p
24-     c material cards
25-     M1  26000. -1
26-     M2  82000. -1
27-     M3  11000.  0.5
28-         53000.  0.5
29-     c source definition
30-     sdef ERG=0.662 POS=-33.9 0 0 DIR=1 VEC=1 0 0
PAR=2
31-     c tally definition
32-     f1:p 9
33-     c1 0 1
34-     nps 1000000

```