

## ESTUDO DA INTEGRIDADE DE JUNTAS ADESIVAS PONTO E BOLSA POR MICROTOMOGRAFIA POR TRANSMISSÃO DE RAIOS X

Ariella Vianna Fontes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Rio de Janeiro Junho de 2015

## ESTUDO DA INTEGRIDADE DE JUNTAS ADESIVAS PONTO E BOLSA POR MICROTOMOGRAFIA POR TRANSMISSÃO DE RAIOS X

Ariella Vianna Fontes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof<sup>a</sup>. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

Prof. Luiz Carlos Pereira, D. Sc.

Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D. Sc.

Dr. Sérgio Damasceno Soares, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL JUNHO DE 2015 Fontes, Ariella Vianna

Estudo da integridade de juntas adesivas ponto e bolsa por microtomografia por transmissão de raios x/Ariella Vianna Fontes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

VIII, 73 p,: il.;29,7cm.

Orientador: Gabriela Ribeiro Pereira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2015. Referências Bibliográficas: p 68-71.

 Caracterização. 2. Microtomografia. 3. Análise de Imagens. 4. Juntas adesivas. I. Pereira, Gabriela Ribeiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

À minha querida mãe Shirlane e amada filha Maria.

À amiga Gabriela.

Ao meu namorado Rafael.

#### AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Lúcio e minha mãe Shirlane pelo apoio incondicional em todas as minhas escolhas. Por dividirem as ansiedades, os sonhos e sempre me incentivarem a seguir em frente e conquistar meus objetivos.

À minha amada filha Maria por todo seu amor e carinho que me fortaleceram pra seguir em frente.

Ao meu irmão Bernardo, sempre solicito em todos os momentos.

Ao meu namorado Rafael, pelo companheirismo e dedicação. Sempre incentivando minhas escolhas, paciente com minhas inquietações e entusiasmado com meu trabalho. São inúmeros os motivos para lhe agradecer.

À professora, orientadora e amiga Gabriela por não me deixar desanimar nas horas de dificuldade, pela amizade, ensinamentos, oportunidade e principalmente pela confiança depositada em mim. Serei eternamente grata a você.

Ao CENPES/PETROBRAS pela oportunidade de realizar este estudo.

À equipe do LNDC, sempre solícitos e prontos a ajudar.

Ao LNNano e LIN pela colaboração na realização dos ensaios de microtomografia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

À todos amigos que contribuíram direta ou indiretamente na conclusão deste projeto.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ESTUDO DA INTEGRIDADE DE JUNTAS ADESIVAS PONTO E BOLSA POR MICROTOMOGRAFIA POR TRANSMISSÃO DE RAIOS X

Ariella Vianna Fontes

Junho/2015

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

A busca por métodos de ensaios não destrutivos para análise de materiais compósitos é alvo de constante estudo. Os dutos de plástico reforçados com fibra de vidro, devido a sua boa relação entre resistência mecânica, peso e resistência à corrosão, são amplamente utilizados, por exemplo, na indústria petrolífera. Todavia as conexões de vários trechos desses dutos, realizadas por juntas adesivas, podem apresentar defeitos como a falta de adesão e a falta de adesivo, tornando-se pontos propícios ao colapso. Até o momento ainda não há uma metodologia de ensaio não destrutivo consolidada, capaz de avaliar a integridade das juntas adesivas. A técnica mais utilizada é o ensaio de ultrassom, porém a análise qualitativa possui limitações na avaliação de regiões de transição, além de não fornecer resultados quantitativos dos defeitos encontrados. Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar os defeitos correlacionando as técnica de ultrassom e microtomografia por transmissão de raios X, onde esta última permite examinar a estrutura interna do material. Foram confeccionados e avaliados corpos de prova contendo os defeitos típicos encontrados em campo. Os resultados mostraram que a microtomografia é adequada para caracterização qualitativa e quantitativa dos defeitos típicos de juntas adesivas encontrados em campo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## STUDY OF THE INTEGRITY IN ADHESIVE JOINTS "BELL AND SPIGOT" BY MICROTOMOGRAPHY BY TRANSMISSION X RAY

Ariella Vianna Fontes

June/2015

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Department: Metallurgic and Materials Engineering

The search for methods of analysis for non-destructive testing of composite materials is the subject of constant study. The fiber reinforced polymer composite pipes, because of their good relation between strength, weight and corrosion resistance, have been widely used, for example, in oil industry. However the connections of many sections of these pipes made by adhesive bonded joints can show defects like kissing bond and lack of adhesive, making it propitious to collapse points. Until now there isn't any consolidated methodology of non-destructive testing, able to evaluate and control the integrity of adhesive bonded joints. The most used technique is the ultrasound test, but the qualitative analysis has limitations in the evaluation of transition regions, and don't provide quantitative results of the defects found. Within this context, this work aims to characterize the defects correlating techniques of ultrasound and X ray transmission microtomography where the latter technique allows us to examine the internal structure of the material. Were fabricated and evaluated specimens containing typical defects found in the field. The results showed that the microtomography is appropriate for the qualitative and quantitative characterization of the typical defects found in adhesive bonded joints found on field.

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Microtomografia	5
2.1.1. Princípio Básico	7
2.1.2. Aquisição	8
2.1.3. Reconstrução	9
2.1.4. Visualização	
2.2. Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI)	14
2.2.1. Parâmetros quantificados em microtomografia	16
2.3. Materiais compósitos	19
2.4. Ensaios não destrutivos realizados anteriormente em juntas adesivas	ponto e
bolsa	21
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	
3.1. Material	
3.2. Microtomografia	30
3.2.1. Aquisição	30
3.2.2. Reconstrução	
3.2.3. Programa de quantificação de imagens - <i>CTan</i>	
CAPÍTULO 4	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1. Análise qualitativa por microtomografia	39
4.2. Análise quantitativa	64
CAPITULO 5	66
5.1. Conclusões	66
5.2. Trabalhos futuros	67
REFERÊNCIAS	68
ANEXO A	

## ÍNDICE

## **CAPÍTULO 1**

#### 1. INTRODUÇÃO

As projeções tecnológicas colocam como prioridade o desenvolvimento de novos materiais que permitam unir propriedades específicas de cada composto em um único material. Os setores de alta tecnologia tais como: aeroespacial, automotivo, petróleo, óleo e gás e energético evidenciam a necessidade de aperfeiçoamentos e buscam soluções inovadoras com grandes contribuições ao desenvolvimento tecnológico do país.

A indústria petrolífera absorve atualmente grande parte dos estudos voltados para os materiais compósitos, seja na área de desenvolvimento de novos materiais ou na área de caracterização, tendo por objetivo, em geral, a substituição dos materiais metálicos. No campo *onshore* e *offshore* os materiais compósitos fornecem uma boa relação entre peso específico, resistência mecânica e resistência a corrosão, propriedades essenciais às funções, de modo a atuar adequadamente no ambiente insalubre de diversos equipamentos e tubulações dos sistemas de operação. As boas propriedades obtidas nos compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de vidro, do inglês *Fiber Reinforced Polymer* (FRP), levam a uma vasta aplicação, principalmente em tubulações condutoras de fluidos em refinarias e plataformas de petróleo.

Os dutos (*pipes*) compósitos já são amplamente utilizados no transporte de água sendo de suma importância no sistema petroquímico, onde a interrupção no seu funcionamento pode levar ao colapso do poço e dos equipamentos envolvidos nessas operações. As junções entre os vários trechos dos referidos dutos podem ser realizadas através de solda, juntas laminadas (*hand layup ou spray up*) ou juntas adesivas, ambas susceptíveis ao colapso estrutural causando prejuízos financeiros, ambientais e humanos [1]. As juntas adesivas denominadas "ponta e bolsa" (*bell and spigot*) são objeto de estudo no presente trabalho visto a grande dificuldade do controle de qualidade e garantia da integridade durante a realização da atividade de junção no campo. O acabamento denominado "ponto e bolsa", que une os dutos compósitos, é realizado através da diferença de conicidade das extremidades, ou seja, a luva de união possui diâmetro um pouco maior em relação ao duto que receberá o encaixe, sendo este

levemente usinado, reduzindo seu diâmetro. O espaço remanescente entre o duto e a luva é preenchido pelo adesivo polimérico, especifico para o tipo de junção e temperatura de operação [1], de forma a assegurar a aderência entre os componentes (Figura 1).



Figura 1. Ilustração da conexão de dutos compósitos através de junta adesiva.

Os defeitos são gerados durante o processo de montagem, e os principais defeitos encontrados nas juntas "ponta e bolsa" são: porosidades, trincas, falta de adesão ("*lack of adhesion*") e falta de adesivo. A falta de adesão ocorre quando a camada adesiva não adere a superfície devido a presença graxas ou óleos, ou seja, há o contato mas não há aderência. A falta de adesivo, está relacionada a quantidade inferior de adesivo aquela estabelecida no procedimento de montagem, gerando áreas vazias. O preparo inadequado e a falta de limpeza das superfícies que entrarão em contato com o adesivo são as principais causas de geração de defeitos, como o comprometimento da qualidade da instalação das juntas [2].

No que tange aos métodos aplicáveis de ensaios não destrutivos, os materiais compósitos são considerados muito diferentes dos metais. Geralmente os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro possuem baixa condutividade elétrica, baixa condutividade térmica, alta atenuação acústica e significante anisotropia [3].

Nesse contexto, se destacam na última década o desenvolvimento de técnicas não invasivas a fim de avaliar a integridade (detectar e dimensionar descontinuidades) de materiais compósitos de estruturas críticas, submetidas a esforços estáticos ou dinâmicos com funcionamento contínuo. Atualmente uma grande parte dos estudos para a caracterização de materiais compósitos usam como base técnicas os ensaios não destrutivos (END) já consolidadas em materiais metálicos. Porém, muitos ensaios não

destrutivos mostraram-se ineficientes em materiais compósitos, e com isso a busca por técnicas mais eficientes continua incessante [4].

Com algumas técnicas de ensaios não destrutivos é possível detectar imperfeições macrométricas superficiais e até defeitos micrométricos localizados no interior da estrutura dependendo da resposta dada pelo material ao estímulo característico de cada técnica [2]. As técnicas existentes abrangem desde a mais simples inspeção visual até aquelas mais sofisticadas envolvendo radiações ionizantes e complexas programações computacionais como a tomografia. Entre as técnicas mais aplicadas de END estão as técnicas acústicas de ultrassom e a emissão acústica (EA) [2]. As juntas adesivas "ponto e bolsa", usadas no presente trabalho, foram estudadas anteriormente através de diferentes técnicas de análise não destrutiva, tais como radiografia convencional e computadorizada, termografia, emissão acústica e ultrassom. Estas técnicas apresentaram limitações na caracterização dos defeitos. O ensaio de ultrassom, por exemplo, possui como princípio a introdução de um feixe sônico de alta frequência, através de um cabeçote acoplado a peça, que será refletido pela interface oposta. A monitoração das reflexões sônicas transmitidas ao material permitirá detectar a existência de descontinuidades [5], porém a utilização desta metodologia não oferece informação quantitativa, tal como o percentual da ausência de adesivo, além de limitações da técnica que não permitem identificar o tipo de defeito, dimensioná-los e determinar se regiões denominadas de "transição" possuem defeito ou não.

Apesar de recente, a técnica de microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) reúne características promissoras para análise de juntas adesivas, possibilitando uma avaliação qualitativa e quantitativa do volume e distribuição do adesivo em escala micrométrica. A microtomografia produz imagens fiéis do interior do objeto estudado. Imagens sequenciais adjacentes são compiladas gerando representações tridimensionais que permitem a visualização e extração de atributos de forma eficiente.

A microtomografia baseia-se nos princípios da radiografia, ou seja, na atenuação dos raios X ao interagir com o objeto inspecionado que por sua vez irá gerar diversas imagens radiográficas uma vez que o objeto é rotacionado a passos angulares e constantes [6]. Após a aquisição das diversas imagens do objeto analisado, as radiografias são reconstruídas, permitindo realizar o processamento e análise da estrutura interna do objeto [7]. A etapa seguinte à reconstrução é o processamento de

imagens que tem como função facilitar a visualização da imagem ou adequá-la para análises quantitativas através da correção de defeitos (contraste da imagem, remoção de artefatos gerados durante a aquisição, correção de distorções geométricas, etc.) ou realces de regiões de interesse nas imagens, e a extração e tratamento de dados quantitativos, feitos pelo próprio computador [8].

A motivação deste estudo, além da avaliação da integridade das juntas adesivas por microtomografia, abrange os estudos quanto a limitação da técnica ultrassônica, visando a melhoria dos seus resultados. Apesar das limitações encontradas na caracterização dos defeitos em juntas adesivas do tipo "ponto e bolsa" através do ensaio de ultrassom, os resultados encontrados por Almeida [9] mostraram-se promissores na detecção de defeitos em juntas adesivas no campo. Com a combinação de mais de uma técnica espera-se determinar qualitativa e quantitativamente o risco oferecido a estrutura pela presença dos defeitos, visto que o ultrassom permite a realização do ensaio em campo e a microtomografia possui elevada confiabilidade qualitativa e quantitativa dos defeitos de falta de adesão e adesivo.

A efetividade da metodologia utilizada para simular os principais defeitos encontrados em juntas adesivas também será avaliada. Para a caracterização por END foram confeccionados corpos de provas de 16" de diâmetro simulando condições reais de juntas "ponta e bolsa" defeituosas, encontradas em campo.

O presente trabalho descreve o estudo desenvolvido e seguirá a seguinte estrutura:

- Capítulo 1: breve introdução do problema que motivou o estudo e apresentação da metodologia a ser avaliada;
- Capítulo 2: revisão bibliográfica sobre a técnica avaliada no estudo, permitindo ao leitor se inteirar dos principais termos e definições, assim como os estudos realizados nas presentes amostras envolvendo outras técnicas de ensaios não destrutivos;
- Capítulo 3: descrição dos materiais utilizados no estudo e dos procedimentos adotados para configuração e realização dos testes;
- Capítulo 4: apresentação e discussão dos resultados encontrados;
- Capítulo 5: apresentação das conclusões do estudo;

## **CAPÍTULO 2**

#### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Microtomografia

A descoberta dos raios X data de 1895 e tornou-se uma ferramenta poderosa para análise e caracterização tanto na área médica, como na área industrial. A quantidade de radiação detectada nos experimentos permite correlacionar com as propriedades dos materiais, tal como sua densidade atômica. Apesar da atenção requerida com a proteção radiológica, algumas características como a direção dos raios X entre as interações e a atenuação de acordo com a densidade física do material permitiram desenvolver ensaios não destrutivos tais como inspeção por raios X, tomografia, microtomografia e espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS) capazes de revelar informações da estrutura atômica.

A produção dos raios X requer uma atenção especial pois variáveis como filtragem, material do alvo, pico de tensão do tubo, corrente e tempo de exposição podem afetar a forma do espectro de energia [10]. A caracterização de um material envolvendo a atenuação dos feixes de raios X depende da energia do fóton emitido e do elemento constituinte que compõe o material, ou seja, as variáveis que definem o cálculo dos coeficientes de atenuação [11].

Dentre os ensaios não destrutivos que utilizam radiação ionizante, a microtomografia é uma técnica recente na área industrial devido a limitações tais como: dificuldade dos raios X atravessarem grandes amostras, movimento das amostras até o sistema fonte-detector ou todos os lados da amostra não estarem acessíveis.

A microtomografia é uma técnica que tem como resultado a representação da distribuição espacial de um parâmetro físico, ou seja, o coeficiente de atenuação de um objeto [12], capaz de representar a estrutura interna dos objetos analisados com resolução espacial da ordem de micrômetros. Essa técnica de análise não destrutiva possui seu princípio baseado na técnica de raios X, onde a principal diferença se

encontra na ordem de grandeza do foco do tubo de raios X, na resolução do detector, que irá determinar a resolução espacial e na rotação das amostras analisadas de forma que a reprodução em 3D é permitida (Figura 2). Enquanto que no ensaio de raios X convencional a amostra encontra-se parada entre o tubo de raios X e os detectores, na tomografia, a cada passo de rotação da amostra (diferentes ângulos), imagens são adquiridas e o conjunto dessas projeções serão posteriormente reconstruídas com auxílio da programação computacional (processamento digital de imagens). Assim como no ensaio de raios X convencional os diferentes tons de cinza nas imagens são proporcionais a densidade dos materiais analisados, na tomografia pode-se analisar o coeficiente de atenuação ponto a ponto ao contrário de uma radiografia planar onde as diferentes profundidades aparecem em um único plano. Desta forma são ressaltadas as duas principais vantagens da microtomografia em relação a radiografia convencional: a capacidade de produzir cortes de imagens digitais com alto contraste, boa resolução espacial e acurácia geométrica do objeto analisado e estes cortes de imagens não sofrerem influência significativa devido a sobreposição ou estruturas fora do plano da seção [12].



Figura 2. Princípio da formação da imagem tomográfica, onde a amostra é rotacionada no eixo z e as imagens adquiridas nos eixos x e y [13].

O ensaio de microtomografia pode ser dividido nas etapas de aquisição, reconstrução e visualização.

#### 2.1.1. Princípio Básico

Uma fonte de radiação X monoenergética produz um feixe com intensidade  $I_o$  que irá incidir sobre a amostra estudada. O feixe, após interagir com o material heterogêneo e de espessura  $\Delta x$ , sofrerá uma atenuação média por comprimento, denominada coeficiente de atenuação  $\mu(x)$ , variando a intensidade inicial devido aos fenômenos de absorção e espalhamento (Figura 3). Desta forma o feixe de raios X, para uma fonte monoenergética, após atravessar um corpo terá intensidade I, podendo ser expressada pela Equação 1. Esta variação  $\Delta I$  é devido a interação da radiação com o objeto [10].



Figura 3. Atenuação dos fótons de raios X ao atravessar um corpo [10].

$$I = I_o exp\left(-\int_0^x \mu(x) dx\right)$$
 Equação 1

A fonte do tubo de raios X utilizada na microtomografia é polienergética e por isso o coeficiente de atenuação será dependente da energia dos raios X. Nesse caso, o coeficiente de atenuação linear dependerá do espectro de energia dos raios X e das diferentes densidades dentro do material. A Equação 2 mostra a relação exponencial entre a atenuação da intensidade do feixe sobre a amostra e os efeitos de interação da radiação com a matéria [14] onde  $\mu$  (x, y, E) é a atenuação linear para misturas ou  $\frac{7}{7}$ 

substâncias químicas compostas e E a energia dos raios X. Essa equação é denominada Lei da Atenuação Exponencial.

$$I = \int_0^{Emáx} I_0 exp\left[\int_L \mu(x, y, E)dl\right] dE$$
 Equação 2

As fontes polienergéticas emitem feixes de alta e baixa energias, onde os feixes de baixa energia são preferencialmente absorvidos ao penetrar no corpo de provas. Devido a este fator, utiliza-se o artifício da colocação de um filtro de radiação de metal na janela de saída dos raios X, minimizando a quantidade de radiação de baixa energia que incide na amostra. Desta forma evita-se o efeito denominado endurecimento de feixe que consiste na absorção preferencial dos feixes de baixa energia que penetram no corpo de prova, e que irá se apresentar como bordas mais brilhantes que o interior da amostra [6,15].

#### 2.1.2. Aquisição

A aquisição das imagens tomográficas consiste em um conjunto de projeções que são obtidas conforme a rotação do objeto em relação a posição original. A cada ângulo é gerada uma imagem transversal ao plano do material [15]. Ao longo do caminho percorrido pelo feixe de raios X, diferentes coeficientes de atenuação  $\mu(x,y)$  são obtidos gerando um modelo 2D como imagem resultante (Figura 4). A atenuação total de um feixe é representado pela integral de  $\mu(x,y)$ , denominada raio-soma (Equação 3) [14].

$$\oint_{raio} \mu(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \ln \left(\frac{I_o}{I}\right)$$
Equação 3

Uma projeção P(t) será então definida pelo conjunto de raios-soma para cada ângulo em que o objeto se encontra deslocado da posição original [15].



Figura 4. Esquema da tomografia por transmissão de raios x. Ilustração de uma projeção através de um objeto em um ângulo de visão φ formando uma função da Projeção, onde AB define a linha ao longo do qual a integral será calculada [10].

#### 2.1.3. Reconstrução

Na microtomografia o processo de aquisição geram projeções, ou seja, imagens bidimensionais que retratam em níveis de cinza os coeficientes de atenuação da radiação incidente na amostra analisada. As diversas projeções necessitam ser reconstruídas para obter as seções do objeto analisado sob uma perspectiva matematicamente definida [16]. O algoritmo de retroprojeção filtrada mais utilizado é baseado no modelo desenvolvido por Feldkamp para reconstrução utilizando feixes cônicos.

De forma simplificada, a representação matemática do problema está descrita a seguir: A Equação 4 descreve a projeção bidimensional  $P(\theta, a, b)$  para um feixe paralelo onde a e b são as coordenadas horizontais e verticais do detector respectivamente,  $\theta$  é o ângulo de projeção e f(x, y, z) representa o objeto tridimensional. As Equações 5 e 6 apresentam a relação das coordenadas (a e b) com as coordenadas x, y, z e  $\theta$ , onde R é a distância fonte – detector [6].

$$P(\theta, a, b) = P(\theta, a(x, y, \theta)) = \oint f(x, y, z) dl$$
 Equação 4

$$a(x, y, \theta) = R \frac{-xsen\theta + cos\theta}{R + xcos\theta + ysen\theta}$$
 Equação 5

$$b(x, y, z, \theta) = z \frac{R}{R + x \cos\theta + y \sin\theta}$$
 Equação 6

Nas expressões apresentadas acima tem-se como variável apenas a posição do raiosoma da projeção sendo  $\theta$  fixo, porém o corpo de provas é translado ao longo de uma trajetória perpendicular ao feixe de radiação, devendo-se considerar então a geometria cônica do feixe de raios X (Figura 5). Nesta configuração é possível reconstruir um espaço tridimensional diretamente através dos dados de projeção bidimensionais, pois a radiação ao passar pelo corpo de prova atinge todo o detector sem a necessidade de reconstruir cada fatia até a formação do volume.



Figura 5: Representação do feixe cônico [17].

Para um feixe cônico a Equação 7 pode ser utilizada. Apesar de similar ao princípio para reconstrução de um feixe paralelo, tem-se o incremento de fatores a ponderar devido ao aumento da complexidade geométrica [6]. Assim, tem-se o filtro rampa representado por \* que denota a convolução entre a projeção P( $\theta$ ,a,b) e g(a) e o pré fator de peso, mostrado na Equação 8, que pode ser relacionado com a geometria do feixe, onde  $\phi$  e  $\psi$  são ângulos leque e cônico, respectivamente [6].

$$\tilde{P}(\theta, a, b) = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} P(\theta, a, b)\right) * g(a)$$
Equação 7

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} = \cos\varphi\cos\psi \qquad \qquad \text{Equação 8}$$

A Equação 9 mostra a retroprojeção do pré fator de peso e da projeção filtrada  $\tilde{P}(\theta, a, b)$  no espaço tridimensional do objeto f(x,y,z), permitindo a reconstrução de uma imagem tomográfica.

$$f(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{(R + x \cos\theta + y \sin\theta)^2} \tilde{P}(\theta, a(x, y, \theta), b(x, y, \theta)) d\theta \qquad \text{Equação 9}$$

Vale ressaltar que durante a etapa de reconstrução é possível utilizar filtros de correções de artefatos em anel e de artefatos de endurecimento de feixe visando melhorar a qualidade da imagem reconstruída. O resultado desta etapa são as seções transversais do objeto analisado, comumente chamadas fatia ou *slices*, em inglês.

#### 2.1.4. Visualização

Após as etapas de aquisição e reconstrução, tem-se como resultado seções transversais que representam "fatias" do interior da amostra analisada [14]. A Figura 6 mostra uma sequência com imagens das etapas de aquisição (Figura 6a) e reconstrução (Figura 6b).



Figura 6. (a) Imagem de uma projeção bidimensional durante a aquisição; (b) Imagem de uma "fatia" após a etapa de reconstrução.

Segue-se então para a etapa da visualização do objeto estudado. A visualização pode ser feita em 2D (seções transversais, coronais e sagitais), onde a imagem digital formada é constituída pelo elemento de imagem denominado *pixels* (Figura 7) ou em 3D a partir da reconstrução das "fatias" onde o elemento da imagem é denominado *voxel* (*pixel* + profundidade de corte) oriundo de uma matriz volumétrica reproduzindo as informações obtidas pela reconstrução de todas as seções transversais da amostra (Figura 8) [15].



Figura 7. Representação do pixel [18].



Figura 8. Representação do voxel [18].

A representação bidimensional feita através de uma matriz NxM, permite determinar a resolução que imagem gerada apresenta, pois quanto maior o número de elementos estruturantes, melhor a capacidade de distinguir dois pontos, ou seja, maior será o nível de detalhes possíveis de se observar. Cada elemento da imagem estará relacionado, ponto a ponto, ao coeficiente de atenuação  $\mu(x,y)$  da amostra por níveis de cinza [15]. Assim, os *pixels* escuros representam uma região da amostra menos densa, ou seja, que permite passar a radiação com facilidade e os *pixels* claros representam uma região mais densa onde a radiação é mais atenuada ao passar pela amostra impressionando menos o filme.

#### 2.2. Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI)

A utilização do Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI) abre novas perspectivas para a caracterização de materiais, pois permite fazer medidas impossíveis de serem realizadas manualmente, conferindo maior reprodutibilidade, confiabilidade e velocidade ao processo [8]. Com a finalidade de melhorar a qualidade da imagem de forma a otimizar a análise qualitativa, o processamento digital de imagens permite corrigir defeitos de aquisição e/ou realçar detalhes de interesse através de operações matemáticas que alteram os valores dos pixels de uma imagem digital. A extração de atributos para uma análise quantitativa é possível através da análise de imagens, obtendo-se resultados de medições mais rápidas, precisas e acuradas possibilitando ainda a realização de medidas impossíveis de se executar manualmente [19]. Pode-se dividir o processamento e análise digital de imagens em 5 etapas:

- Etapa 01 Aquisição de imagens: É o primeiro passo e de extrema importância, pois uma aquisição bem feita evita defeitos que mascaram os resultados mesmo após os tratamentos digitais. Na etapa de aquisição, defeitos como artefatos em anel e endurecimento de feixe podem ser atenuados com a utilização de filtros na saída do feixe ou durante a reconstrução.
- Etapa 02 Pré-processamento: Neste momento são realizadas operações modificando diretamente os valores de intensidade dos *pixels*, otimizando a qualidade das imagens para as etapas subsequentes. Alguns procedimentos rotineiramente utilizados são: manipulação do brilho, expansão do contraste, correção de iluminação irregular, redução do ruído e realce de bordas [8].
- Etapa 03 Segmentação: A segmentação visa reproduzir digitalmente a tarefa de reconhecer regiões de uma imagem como objeto, um processo cognitivo extremamente sofisticado realizado pela visão humana. A segmentação divide a imagem em regiões e distingue essas regiões como objetos independentes uns dos outros e do fundo [8]. As imagens são binarizadas dividindo-a em unidades significativas, ou seja, nos objetos de interesse que a compõe. É uma tarefa difícil de implementar. Existem diversas técnicas de segmentação baseadas em

diferentes princípios (limiarização de histograma, detecção de bordas, textura, morfologia matemática, etc). A mais simples e amplamente utilizada é a segmentação por faixa tonal, também chamada de limiarização ou *thresholding*. A limiarização usa o tom de cinza dos pixels para distingui-los, considerando como objeto as regiões dos *pixels* contíguos com tons de cinza dentro de uma faixa tonal delimitada a partir de um limiar ou tom de corte. O ponto mais sensível da limiarização é a escolha do tom de corte [20], geralmente feita através da observação do histograma da imagem. Não existe um método ideal e genérico de segmentação que seja sempre o melhor.

- Etapa 04 Pós-processamento: É a etapa que visa corrigir defeitos da segmentação utilizando a técnica de morfologia matemática, ou seja, um conjunto de operações de tratamento de valores da intensidade dos *pixels* em função dos valores de sua vizinhança. Pode-se aplicar o pós-processamento para procedimentos como a separação de objetos que se tocam ou o agrupamento formando objetos mais complexos.
- Etapa 05 Extração de atributos: Permite a obtenção de parâmetros que caracterizam os objetos a serem analisados, extraindo e quantificando as informações necessárias. Pode-se realizar medidas de campo tais como: contagem de objetos, área, textura; e medidas de região, que visa caracterizar os objetos segmentados individualmente tais como: tamanho, forma, posição, etc. [8].

A Figura 09 mostra uma sequência padrão de aquisição, processamento e análise [21] a partir da qual, rotinas mais sofisticadas podem ser desenvolvidas.



Figura 9. Sequência padrão de PADI [8].

#### 2.2.1. Parâmetros quantificados em microtomografia

Um ponto relevante a ser comentado são as análises quantitativas em microtomografia. Após o resultado final de uma microtomografia, um conjunto de dados é gerado. Posteriormente, para análise precisa dos dados, deve-se determinar um volume de interesse significativo do objeto chamado VOI (*Volume of interest*), que é constituído pelo conjunto de diversas regiões de interesse, denominado ROI (*Region of interest*), de uma única imagem transversal. De acordo com o interesse do estudo determina-se os parâmetros morfométricos a serem analisados. Os resultados obtidos podem ser apenas das imagens geradas da seção transversal ou pode abranger o volume total do objeto, sendo este último calculado através da integração de muitas análises de diversas fatias subsequentes da seção transversal [15].

O processamento digital de imagens, que precede à análise de imagens bidimensional ou tridimensional para extração dos atributos, possui como etapa principal, a binarização, pois todas as medições de parâmetros são realizadas em imagens segmentadas, ou seja, imagens onde foi determinado o objeto de interesse e o fundo (Figura 10).



Figura 10. Imagem binarizada de uma "fatia" da junta adesiva.

Na Tabela 1 estão listados alguns parâmetros de análise morfométrica tridimensional, onde o Volume total – VOI (TV, mm<sup>3</sup>) determina o volume total do volume de interesse, o Volume de objeto (obj.V, mm<sup>3</sup>) determina o volume total de objetos binarizados dentro do VOI e Porcentagem de volume e objeto (obj. V/TV, %) determina a proporção do VOI ocupada por objetos sólidos binarizados.

Análise 3D integrada de todo objeto						
Parâmetro	Símbolo	Unidade				
Volume total (VOI)	TV	$mm^3$				
Volume de objeto	Obj.V	$\mathrm{mm}^3$				
Porcentagem de volume e objeto	Obj.V/TV	%				
Volume ocupado por poros fechados	Po.V(cl)	mm³				
Superfície ocupada por poros fechados	Po.S(cl)	$\mathrm{mm}^2$				
Porcetagem de poros fechados	Po(op)	%				
Volume de poros conectados	Po.V(op)	mm <sup>5</sup>				
Porcentagem de volume de poros conectados	Po(op)	%				
Volume total de poros	Po.V(tot)	mm³				
Porosidade total	Po(tot)	%				

Tabela 1. Análise morfométrica em 3D [22].

Os parâmetros analisados permitem calcular ou estimar, por exemplo, espessuras de objetos e volumes. No presente trabalho serão de interesse os parâmetros morfométricos que quantifiquem o volume total de interesse (VOI), ou seja, a proporção de volume de interesse ocupado pelos objetos sólidos da imagem binarizada de forma a determinar o volume total de vazios (poros), sendo de extrema relevância na determinação dos defeitos em juntas adesivas. A Figura 11 mostra o exemplo de uma imagem processada para a quantificação da porosidade assim como o resultado expresso em percentual (%) x faixa de tamanho (mm) mostrando que 100% dos poros encontrados possuem dimensão entre 0 e 10 mm.

		3D Analysis Res	ults D+			? 🛛
		Dalaset Number of layers: Computation time	itab1-12rec 48 :::::::::::::::::::::::::::::::::::			
		Description		Abbreviation	Value	Unit 🔺
		Trahenular paties	n facior	Th Pf	-D 36744	1/nive
		Cantroid Is)		EndX	144 531 25	nivel
		Cantroid Iv1		Crd.Y	124,82587	pixel
		Centraid [z]		Crd.Z	183.49621	pixel
		Number of object	5	O bj.N	7	
		Number of closed	pores	Po.N(d)	477	
		Volume of closed	potes	Po.V(d)	2211.52917	pixel
		Surface of closed	pores	Po.S(d)	6345.74994	pixel*
		Closed porosity (p	ercent)	Polci	0.35930	2
		Volume of open p	ore space	Po.M(op)	23018.19167	pixel"
		Open porosity (pe	rcentj	Polopj	3.60491	× _ =
		Total volume of p	ore space	Po.M[IoI]	25229.72083	psel.
		f otal porosity (pe	icent	Politatj	3.95126	z
		Euler number		EU.N	334	
		Cannactivity		Com	150	7 Anio
		Cannacilvity dens	ny.	Lonn.Dn	0.00023	17 pix.
		2				
A M	ajor diameter 🔐	🖁 Perimeter 👯 Form (	) Orientation	🔁 Porasity		

Figura 11. Exemplo de uma imagem processada para quantificação da porosidade [15].

#### 2.3. Materiais compósitos

A necessidade de novos materiais visa atender propriedades específicas para determinado uso, onde os materiais individuais não mais atendem às crescentes exigências de desempenho, segurança, economia e durabilidade, tornam os materiais compósitos cada vez mais interessantes.

Os materiais compósitos são constituídos por duas ou mais fases quimicamente distintas, uma denominada matriz e as demais são denominados de reforços, onde o produto final apresentará uma combinação das propriedades dos seus constituintes. A principal característica do reforço é a sua alta resistência mecânica absorvendo as tensões transferidas pela matriz [23].

O compósito é projetado de modo que as cargas a qual a estrutura é submetida em serviço sejam suportadas pelo reforço. Suas propriedades dependem da matriz, do reforço e da interface. Desta forma, muitas variáveis precisam ser consideradas ao se projetar um compósito: o tipo de matriz (metálica, cerâmica e polimérica), o tipo de

reforço (fibras ou partículas), suas proporções relativas, a geometria do reforço, método de cura e a natureza da interface. Cada uma destas variáveis deve ser cuidadosamente controlada a fim de produzir um material estrutural otimizado para as circunstâncias nas quais será usado [1].

Os compósitos poliméricos, constituídos de uma matriz polimérica e um reforço, são amplamente utilizados devido a sua facilidade de conformação assim como boas propriedades à temperatura ambiente, e baixo custo se destacam na substituição de materiais tradicionais nas mais diversas aplicações, especialmente estruturais, onde o carregamento aplicado no material é suportado pelas fibras, mantendo-as ancoradas e agrupadas. Sua larga aplicação se deve ao baixo peso, resistência à corrosão e ótimas propriedades mecânicas quando comparados com alguns materiais convencionais de engenharia [1]. Para o presente trabalho foi utilizada a resina epóxi por possuir alta resistência química e a corrosão, boas propriedades térmicas e mecânicas, excelente adesão a uma variedade de substratos e boas propriedades elétricas.

Os reforços podem ser particulados, fibrosos ou estruturais e possuem como principal função receber o carregamento transferido pela matriz além de funções secundárias como redução de custo ou aumento da estabilidade dimensional do material. As fibras de vidro possuem larga escala de utilização devido à características como baixo coeficiente de dilatação térmica, altas propriedades mecânicas mantidas à altas temperaturas, alto alongamento na ruptura, facilidade de processamento e baixo custo [1]. As aplicações *offshore* atribuídas aos compósitos de epóxi reforçados com fibra de vidro abrangem sistemas aquosos de baixa pressão [24].

Diversos fatores devem ser ponderados na formulação de um material compósito tais como fração volumétrica, geometria e disposição, determinando assim as propriedades do material compósito. São estas variáveis que definem a resistência/rigidez mecânica do material, sua anisotropia e o modo de falha mais provável de ocorrer. Dentro deste contexto entra a caracterização dos materiais pois é fundamental que a adesão entre fibras e matriz seja realizada da forma mais eficiente possível garantindo a transferência do carregamento da matriz para o reforço.

# 2.4. Ensaios não destrutivos realizados anteriormente em juntas adesivas ponto e bolsa

Diante da importância na utilização de dutos compósitos reforçados por fibra de vidro em diversos setores industriais, principalmente de óleo e gás, estudos utilizando variadas técnicas de ensaios não destrutivos foram realizados por outros autores a fim de caracterizar defeitos em juntas adesivas "ponto e bolsa", visto que não existe uma técnica consolidada de END em materiais compósitos. Nesta seção, trabalhos realizados utilizando como corpo de prova juntas adesivas de dutos compósito de resina epóxi reforçado por fibra de vidro (PRFV), fornecidos pela AMERON, serão citados no intuito de fundamentar a presente pesquisa. As técnicas exploradas anteriormente abrangeram a radiografia, emissão acústica (EA), ultrassom e microtomografia.

A radiografia computadorizada utilizada na detecção de descontinuidades de juntas adesivas poliméricas em dutos PRFV foi alvo de pesquisa no trabalho de Oliveira [1]. Neste estudo, além de comparar os resultados obtidos entre a radiografia convencional e computadorizada, desenvolveu-se um padrão para análise da sensibilidade radiográfica. A radiografia é um dos ensaios não destrutivos mais utilizados onde a variação na quantidade de radiação absorvida ao penetrar no objeto inspecionado poderá indicar a existência de descontinuidades no material. A intensidade de radiação absorvida pela amostra está relacionada com a densidade de cada material e a variação de sua espessura [1].

Neste trabalho [1] foram utilizados corpos de provas com dois diâmetros diferentes, 4" e 16", de juntas adesivas em dutos compósitos onde foram simulados, em corpos de provas diferentes, dois dos defeitos mais encontrados no processo de junção dos dutos: falta de adesivo e falta de adesão.

Foram testadas 3 técnicas de exposição para determinação da resolução espacial para as imagens das radiografias buscando detectar os defeitos citados anteriormente. Em todas radiografias foi possível observar marcas escuras na região da junta colada, sendo este um indicativo de vazio, permitindo que os fótons de radiação sejam transmitidos com maior intensidade do que em regiões onde há presença de material [1].

Oliveira [1] apontou que a técnica radiográfica em dutos compósitos é viável na detecção de áreas com falta de adesivo, poros ou outros defeitos volumétricos [1]. A grande dificuldade está em detectar a falta de adesão, que não pode ser claramente identificada. A adição de elementos geradores de contraste mostrou-se bastante eficaz na otimização da detecção de indicações de vazios.

As imagens obtidas através da radiografia convencional e computadorizada mostraram as mesmas indicações de descontinuidades, porém a radiografia computadorizada utilizou uma dose de radiação cerca de 25% menor, além de mostrar-se capaz de detectar descontinuidades em dutos com a presença de fluidos em seu interior. Apesar de ser uma técnica amplamente utilizada, Oliveira realça que não existe uma norma específica para radiografia computadorizada de materiais compósitos, sendo adotada as normas para inspeção de materiais metálicos.

O método de inspeção ultrassônica já é consolidado na avaliação da integridade de materiais tradicionais de engenharia. O grande desafio está na aplicação em materiais compósitos de matriz polimérica devido a atenuação do sinal ultrassônico em microestruturas anisotrópicas. Almeida [9], define como promissora a técnica de ultrassom para caracterização de materiais compósitos e propõe a avaliação da adequação e a sensibilidade da inspeção ultrassônica, pelo método pulso-eco, para detecção dos defeitos comumente encontrados em juntas adesivas "ponto e bolsa". Neste trabalho [9], visou avaliar as principais variáveis existentes neste tipo de ensaio, tais como a frequência/ tipo de transdutor, bloco de referência, procedimento de calibração, ganho de inspeção e necessidade de preparo superficial do duto, a fim de definir uma metodologia capaz de detectar os defeitos. As amostras estudadas foram juntas adesivas em dutos compósitos PVRF de 4" e 16" confeccionados a fim de simular, em corpos de prova diferentes, os principais defeitos que não permitem a aderência dos dutos com o adesivo: falta de adesão e falta de adesivo.

Neste estudo [9], foram testadas 4 metodologias de inspeção, sendo utilizada em todas a frequência de 1 e 1,6MHz devido a boa relação sinal-ruído e transmissão estável dos sinais. Baseado na leitura dos sinais A-scan (Figura 12), o pico relativo a interface do adesivo variou de 100 a 50% da tela através do sinal obtido com o bloco de referência, estipulando-se assim os valores de ganho para escolha do limiar entre defeito e não defeito.



Figura 12. (a) Representação A-Scan da inspeção de uma junta e (b) Ilustração do transdutor ultrassônico e interfaces que originam os picos [9].

As metodologias utilizadas por Almeida [9] consideraram, no A-scan, que o pico relativo a segunda interface com valores de ganho inferiores a 35% são considerados regiões defeituosas, valores variando entre 35 e 40% são denominados como região de transição, necessitando de uma avaliação mais criteriosa e os ganhos acima de 40% são considerados regiões não defeituosas. O objetivo da análise de diversas metodologias foi obter parâmetros que pudessem de fato detectar os defeitos simulados. O estudo apontou para os parâmetros extraídos da metodologia 4 (ganho de 80% da tela) como o que fornece maior percentual de acerto. Este percentual de acerto foi baseado na comparação das 4 metodologias em relação a inspeção visual após as amostras serem cortadas em dimensões de 15x15 mm, utilizado para adequação entre os critérios de aceitação.

Para caracterizar as regiões defeituosas, Almeida [9] montou mapas onde em vermelho está representada a região defeituosa, em amarelo a região de transição e em azul a região sem defeito. Nas Figura 13 e 14 pode-se observar os mapeamentos dos dados

obtidos pela metodologia 4 e o ensaio visual após o corte para os corpos de prova de 16" de diâmetro das amostras denominadas Adesão 4-2 e Adesivo 8-2.



Figura 13. (a) Mapa C-Scan do corpo de prova Adesivo 8-2; (b) Mapa da inspeção visual após o corte do corpo de prova Adesão 8-2 [9]



Figura 14. (a) Mapa C-Scan do corpo de prova Adesão 4-2; (b) Mapa da inspeção visual após o corte do corpo de prova Adesão 8-2 [9].

Uma das principais conclusões do trabalho [9] foi que a técnica de inspeção ultrassônica é adequada na detecção das classes de defeitos na forma em que foram simuladas. Porém, limitações como a dificuldade em determinar se a região de transição possui ou não defeito, o dimensionamento e a quantificação destes levam a busca por estudos mais profundos.

Definida como um fenômeno de geração de ondas elásticas transientes oriunda de um rápido desprendimento de energia mecânica, a emissão acústica possui principais fontes a quebra da matriz, quebra das fibras, descolamento de interfaces do compósito e vazamento.

Em estudo realizado por Souza [2], a caracterização de juntas adesivas de material compósito através das técnicas de ultrassom e emissão acústica se mostrou capaz de detectar os defeitos típicos de juntas adesivas citados nos trabalhos anteriores. Confirmando o estudo feito por Almeida [9], a inspeção ultrassônica apresentou na comparação e avaliação em relação à inspeção visual acertos de 77% para falta de adesão e 72% para falta de adesivo, mostrando-se promissora na detecção dos defeitos analisados.

O monitoramento em tempo real das falhas em materiais e estruturas compósitas sob o regime elástico e de carregamento dinâmico se mostrou promissor com a técnica de emissão acústica. Souza [2] aponta que é possível identificar a perda de estabilidade estrutural da junta através desta técnica, entretanto aponta limitações no dimensionamento e localização dos defeitos na circunferência do duto. Os resultados da inspeção por EA não permitiram mensurar o grau de severidade do defeito a partir do tamanho das descontinuidades. Contudo, o autor [2] sugere que a avaliação da severidade seja feita por técnicas auxiliares, neste caso, por ultrassom.

Outro trabalho de relevância é o estudo feito por Silva [25] que utilizou as técnicas de radiografia computadorizada, radiografia digital e microtomografia na inspeção de juntas coladas do tipo ponto e bolsa. As técnicas radiográficas se mostraram adequadas na análise do defeito simulado denominado falta de adesivo, encontrando como limitação a caracterização do defeito falta de adesão, indo de encontro ao estudo realizado por Oliveira [1]. Silva [25] aponta que a grande diferença das técnicas de radiografia e microtomografia é a possibilidade de avaliação quantitativa 3D da última técnica referida, apesar desta encontrar como obstáculo o fato do ensaio não poder ser empregado em tempo real na inspeção de campo [25].

## **CAPÍTULO 3**

#### 3. METODOLOGIA DA PESQUISA

No presente trabalho são realizadas as principais etapas necessárias para caracterização dos defeitos comumente encontrados em juntas adesivas de dutos compósitos FRP através da técnica de microtomografia por transmissão de raios X. A metodologia utilizada envolveu a análise e processamento digital de imagens através dos softwares CTan e CTvox. Assim, por meio de uma rota de processo escolhida, obtém-se a indicação qualitativa e quantitativa dos defeitos simulados.

De posse das informações obtidas na microtomografia, tornou-se possível avaliar as limitações e eficiência dos resultados obtidos no ensaio de ultrassom [9] realizado nas mesmas amostras, além de indicar a efetividade dos métodos utilizados para simular os defeitos estudados.

#### 3.1. Material

A primeira etapa do desenvolvimento deste projeto consistiu em selecionar as amostras que serão analisadas por microtomografia. Foram utilizadas amostras de material compósito de matriz epóxi reforçado com fibra de vidro "Ameron Bondstrand 700M Conductive" para confecção dos dutos a serem analisados. Este material é amplamente usado nas áreas *on-shore* e *off-shore* para condução de fluidos.

No presente estudo foram utilizados segmentos de dutos compósitos de 16", confeccionados por enrolamento filamentar, com espessuras de parede da ordem de 10,0 mm, onde durante a realização da junção dos trechos dos dutos simulando a real situação ocorrida no campo, foram incluídos defeitos propositalmente (Figura 15). O adesivo utilizado nas juntas foi fornecido pela AMERON sob a designação PSX-60 que, segundo especificação contida no catálogo do fabricante, é constituído de resina epóxi, sílica cristalina, silicato de cálcio, sílica coloidal amorfa, metanol hidrolisado e fibras de aço inoxidável [2].



Figura 15. Segmento de tubo em uma junta 16" [1]

As juntas analisadas são provenientes da sobreposição das extremidades dos dutos de 16" que recebem, para consolidar a adesão dos referidos trechos, um adesivo polimérico com espessura de 1 mm (Figura 16-a). Posteriormente a união dos trechos dos dutos, a junta é cortada em ângulos de 60°, originado seis corpos de provas. Esses corpos de provas foram objetos de estudo em trabalhos anteriores [1,2,9]. A configuração dos corpos de prova pode ser observada esquematicamente nas Figuras 16-b e 16-c. Com o objetivo de confrontar os resultados de ultrassom com o ensaio visual, os corpos de provas foram subdivididos em porções menores (Figura 17-a). O segundo corte foi conduzido em serra de fita e a configuração final consistiu na geração de 78 partes diferentes com dimensão aproximada de 15 mm x 15 mm (Figura 17-b).



Figura 16: Dimensões e cortes dos dutos de 16" [1]



Figura 17. (a) Corpos de prova de 16 polegadas cortados [1]; (b) Corpos de prova após o segundo corte [9].

Diversas são as amostras que podem ser levadas para análise através da microtomografia. A escolha dos corpos de prova visou abranger todas as classes de resultados encontradas pela técnica ultrassônica: Região "não defeituosa", Região de "transição" e Região "defeituosa". Desta forma, a fim de analisar a falta de adesivo e falta de adesão utilizou-se as partes geradas após o segundo corte das amostras globais denominadas Adesivo 8-2 e Adesão 4-2.

Foram selecionados três corpos de provas referente a amostra Falta de Adesivo 8-2, denominados "Adesivo D", "Adesivo T" e "Adesivo ND", onde o resultado obtido com a análise ultrassônica [9] foi região defeituosa, região de transição e região não defeituosa, respectivamente. Para a amostra Adesão 4-2 foram selecionados sete corpos de provas onde "Adesão D1" e "Adesão D2" representam a "Região defeituosa", "Adesão T1" e "Adesão T2" representam a "Região de transição", "Adesão ND1" e "Adesão ND2" representam a "Região de feituosa" e "Adesão ND1" e "Adesão ND2" representam a "Região não defeituosa" e "Adesão A" é um corpo de prova aberto.
Dois tipos de defeitos a serem analisados foram simulados durante a confecção das juntas da seguinte forma:

#### • Falta de Adesão:

A falta de adesão consiste na deficiência da adesão química entre o tubo e a camada de adesivo. Geralmente esse defeito é causado pela deficiência no preparo da superfície do duto que irá receber o adesivo, assim como temperatura e tempo de cura insuficientes. Este defeito será simulado através de uma fita adesiva colocada na superfície da junta antes de ser aplicado o adesivo gerando uma área onde o adesivo não irá aderir à superfície a ser colada.

## • Falta de Adesivo:

É o tipo de defeito onde a quantidade de adesivo é inferior à que o procedimento padrão de montagem das juntas indica originando áreas onde não há adesivo (vazios) para prover a colagem. A falta de adesivo é simulada colocando uma quantidade menor de adesivo (30% menos do que o procedimento indica) que não será homogeneizada por toda a superfície gerando assim regiões onde o adesivo não irá preencher o espaço destinado a ele para efetivar a colagem da junta. A Figura 18 ilustra os métodos utilizados para simular os defeitos de falta de adesão e falta de adesivo.



Figura 18. Método para simular falta de adesão e adesivo.

### 3.2. Microtomografia

As amostras do presente trabalho analisadas por microtomografia seguiram a metodologia descrita a seguir.

## 3.2.1. Aquisição

A aquisição das imagens foram realizadas utilizando o aparelho de microtomografia da marca *Skyscan/Bruker*, modelo 1173 (Figura 19), pertencente ao Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) do departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e o aparelho da marca *Skyscan/Bruker*, modelo 1272 (Figura 20), pertencente ao Laboratório de Nanotecnologia do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Campinas.



Figura 19. Ilustração do microtomógrafo Skyscan/Bruker, modelo 1173 [26]



Figura 20. Ilustração do microtomógrafo Skyscan/Bruker, modelo 1272 [27]

Os equipamentos de microtomografia encontram aplicações nas áreas biomédicas, ciência dos materiais, industrial e no controle de qualidade [27]. Os modelos utilizados no presente estudo possui configuração similar. Ambos possuem um tubo de raio x microfocado de tensão e corrente ajustáveis, manipulador de objeto para o posicionamento e rotação da amostra durante a aquisição das imagens, rotação do objeto até 360° em passos angulares fixos, utilização de filtros na saída do feixe do tubo de raio x para redução de artefatos em anel e detector do tipo *flat panel*. As principais especificações de cada microtomógrafo utilizado encontra-se descriminado na Tabela 2.

Microtomografo	Skyscan 1173	Skyscan 1272		
Tensão	40-130 kV	20-100 kV		
Ponto focal	5 microns	5 microns		
Potência	8W 10W			
Matriz detector	2240x2240	4904x3280 pixels		
Tamanho pixel detector	5,0 μm e 12 bits de range dinâmico	0,35 μm (16Mp) e 14 bits de range dinâmico		
Tamanho objetos	140 mm diâmetro e 200 mm comprimento	75 mm diâmetro		
Arquivos salvos	16 bits, extensão .TIFF	16 bits, extensão .TIFF		
Filtros	Al 0.25mm; Al 05mm; Al 1,0mm + Cu 0,15mm; Cu 0,05mm	Al 0,25 mm; Al 0,5 mm; Al 1,0 mm; Al 0,5 mm + Cu 0,038 mm Cu 0,11 mm		

Tabela 2. Resumo das especificações dos microtomógrafos Skyscan/Bruker 1173 e 1272.

Na Tabela 3 encontram-se especificadas as condições experimentais utilizadas no presente trabalho para obtenção das projeções.

Microtomografo	Skyscan 1173	<b>Skyscan 1272</b> 70 kV		
Tensão	70 kV			
Corrente	90 µA	142 μΑ		
Resolução espacial	12,4 µm	15,0 μm		
Passo angular	0,5	0,6		
Filtro	Al 1,0 mm	Al 0,5 mm		
Tempo de medida cada projeção/ total	890 ms/ 54min28s	1140 ms/ 1h17min09s		
Número de projeções	720	326		
Tamanho da matriz (pixel)	2240 x 2240	820 x 2388		

Tabela 3: Condições de aquisição das imagens

### 3.2.2. Reconstrução

Após a aquisição das imagens, a próxima etapa consiste na reconstrução das projeções bidimensionais obtidas nos microtomógrafos *Skyscan* 1173 e 1272. A reconstrução das projeções é feita a partir do compilamento das fatias bidimensionais utilizando-se os programas *NRecon* da *SkyScan* (versão 1.6.8.0) / *InstaRecon* (versão 1.3.9.2), com licença do Laboratório de Intrumentação Nuclear (LIN) do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ (Figura 22) e *NRecon* da *Skyscan* (versão 1.6.9.16), com licença do Laboratório de Nanotecnologia (LNNano) do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) – Campinas, que se baseiam no algoritmo de *Feldkamp* para reconstrução de geometria de feixe cônico de raios X [14].

O software *NRecon* possui artifícios que permitem otimizar a reconstrução, delimitando a região de interesse para reconstrução, neste caso a junta adesiva, e fazendo correções para a melhora da imagem resultante. É nesta etapa que as variáveis do programa podem ser ajustadas de forma a obter uma reconstrução com menor número de artefatos e ruídos que não foram eliminados completamente durante a fase de aquisição. A Figura 21 mostra a interface do programa *Nrecon*.



Figura 21. Visualização da interface do programa NRecon [14].

Os principais parâmetros que permitem correções [28] nesta etapa e podem ser ajustados estão descritos a seguir:

- Smoothing função com objetivo de suavizar a imagem através de operações matemáticas dos *pixels*, diminuindo o ruído e melhorando a qualidade da imagem final.
- Misalignment compensation esta função compensa um possível desalinhamento ocorrido durante a aquisição entre duas projeções com intervalo de 180°. É um importante parâmetro pois evita a duplicação do objeto na imagem, melhorando a identificação das estruturas.
- *Ring artifacts reduction*: A redução dos artefatos em anel consiste na aplicação de um filtro passa baixa de forma a amenizar ou eliminar os artefatos em forma de anéis que surgem na imagem (Figura 22) devido a defeito no detector, podendo ser sensibilidade dos *pixels* diferentes ou calibração inadequada.



Figura 22. Efeito de anéis circulares [14].

• *Beam-hardening correction*: O artefato conhecido como endurecimento de feixe apresenta como imagem característica uma borda mais clara que o centro da amostra. Este efeito se deve ao fato da radiação incidente ser policromática, ou seja, possuir fótons com diferentes energias. Como os raios X de baixa energia são facilmente absorvidos, os raios que percorrem caminhos menores

são mais atenuados que os que percorrem caminhos mais longos, causando a diferença de atenuação observada entre a borda e o centro. Esta correção portanto, minimiza estas diferenças através da linearização destas variações. reduz o efeito *beam-hardening*, ou endurecimento de feixe, linearizando estas (Figura 23). O uso de filtros na saída do feixe de raios X também ajuda no processo de correção do efeito de endurecimento de feixe [14].



Figura 23. Efeito de endurecimento de feixe [14].

As variáveis descritas acima devem ser cuidadosamente testadas, podendo cada ajuste ser visualizado previamente à reconstrução. Para as amostras de juntas adesivas do presente trabalho, os valores utilizados estão descritos na Tabela 4.

Parâmetros	Skyscan 1173	Skyscan 1272		
Smoothing	3,0	4,0		
Misalignmet compensation	De acordo com software	De acordo com software		
<b>Rings artifacts reduction</b>	8,0	7,0		
Beam-hardening correction	9,0	0		

Tabela 4. Parâmetros experimentais utilizados na reconstrução.

## 3.2.3. Programa de quantificação de imagens - CTan

O software utilizado para quantificação foi o *CTanalyser (CTan)*, com licença do Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ e do Laboratório de Nanotecnologia (LNNano) do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) – Campinas. Neste foi realizado também toda etapa de pré-processamento assim como a determinação do *threshold* (limiar) mais adequado para a binarização da imagem. Dentre os diversos parâmetros de quantificação disponíveis, utilizou-se para o presente trabalho o volume total do volume de interesse (VOI) (TV,mm<sup>3</sup>), o volume total de objetos binarizados (BV, mm<sup>3</sup>) e a porcentagem do volume de interesse ocupada pelos objetos binarizados (Obj.V/TV, %). A interface do programa *CTan* pode ser visualizada na Figura 24.



Figura 24. Visualização da interface do programa CTan [14].

A extração dos atributos deve ser realizada em uma região pré-selecionada e binarizada que poderá ser 2D ou 3D. Os procedimentos seguidos no presente trabalho até a quantificação consistiu na determinação da área a ser analisada, utilização de filtros morfológicos de suavização, binarização e pós-processamento.

Em uma imagem única e transversal, a área denominada ROI (região de interesse) deve ser cuidadosamente escolhida, delimitando a região de interesse em ser analisada e eliminando o que for indesejável. A análise em 3D é realizada em um volume de interesse (VOI) que consiste na soma de todos os ROIs das fatias transversais consecutivas.

A binarização da imagem é uma etapa decisiva, onde a escolha do nível de *threshold* transforma os tons de cinza em pixels brancos ou pretos, determinando a estrutura de interesse a ser analisada. A escolha do limiar deve ser cuidadosa de forma a não subestimar ou superestimar os valores nas regiões binarizadas [25]. Neste estudo, foi escolhido, através do histograma, o *threshold* que os valores acima do limiar seriam os *pixels* brancos representando o adesivo.

Por fim, após a binarização e os ajustes finos realizados no pós processamento, pode-se realizar a quantificação utilizando os parâmetros de interesse, como por exemplo, o Volume total de objeto binarizado. A Figura 25 mostra uma sequência das etapas descritas anteriormente.



Figura 25. (a) seção transversal; (b) região de interesse (ROI); (c) imagem binarizada e histograma de binarização; (d) quantificação e distribuição por tamanho de poros [28].

# **CAPÍTULO 4**

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do presente estudo. Em primeiro lugar, serão analisados os resultados qualitativos bidimensionais. Em seguida, serão discutidas as análises qualitativas tridimensionais e a eficiência do método usado na simulação dos defeitos. Por fim, será mostrada a análise quantitativa dos defeitos "falta de adesivo" e "falta de adesão".

## 4.1. Análise qualitativa por microtomografia

No presente trabalho, a primeira etapa consistiu na análise qualitativa das imagens 2D e 3D das juntas adesivas a fim de mostrar se a técnica de microtomografia é adequada na caracterização dos defeitos simulados.

# Análise bidimensional

As Figuras 26 e 27 mostram uma "fatia" transversal da amostra "Adesão D1" e "Adesão T1" onde o defeito a ser avaliado é a falta de adesão, sendo as Figuras 26(a) e 27(a) as imagens em tons de cinza e as Figura 26(b) e 27(b) as imagens binarizadas após o préprocessamento e determinação do *threshold*. Procurou-se manter o mesmo *threshold* para todas as amostras de forma a padronizar a binarização para a extração de atributos, porém as imagens obtidas em diferentes microtomógrafos tiveram valores ótimos distintos. Assim, para as imagens adquiridas no microtomógrafo *Skyscan* 1173 o limiar de *threshold* estipulado foi de 36, ou seja, os valores acima deste limiar são convertidos em *pixels* brancos, considerados adesivo, e os valores abaixo deste limiar são

convertidos em *pixels* pretos, considerados vazios/poros. Para as imagens oriundas do microtomógrafo *Skyscan* 1272, o limiar de *threshold* escolhido foi 50.

Nas Figuras 26 e 27, apesar de serem amostras onde o defeito simulado foi a falta de adesão, é possível observar a falta de adesivo também. Os resultados mostraram uma grande distribuição de "pequenos" vazios intrínsecos (misturados) ao adesivo, na qual não devem ser considerados como ausência de adesivo e sim como poros devido às propriedades deste material.



Figura 26. Amostra Adesão D1 (a) Imagem da "fatia" em tons de cinza e (b) imagem da "fatia" binarizada.



Figura 27. Amostra Adesão T1 (a) Imagem da "fatia" em tons de cinza e (b) imagem da "fatia" binarizada.

Os vazios que aparecem misturados ao adesivo podem ocorrer durante o processo de preparação e/ou aplicação devido ao aprisionamento de ar [26]. A Figura 28 mostra a imagem binarizada de uma fatia da amostra "Adesão D1", onde os vazios são apresentados como *pixels* brancos, ou seja, como objeto de interesse. Desta forma foi possível avaliar a distribuição dos tamanhos desses vazios.



Figura 28. Imagem da fatia binarizada "Adesão D1", onde o objeto de interesse (*pixels* brancos) são os vazios/poros.

A Figura 29 mostra o histograma com a distribuição de tamanhos de vazios encontrados na fatia "Adesão D1" (Figura 28). Uma vasta quantidade de vazios com tamanhos até 0,40 mm foram contabilizados, porém serão considerados como porosidade intrínseca ao adesivo. Conforme observado na análise visual, o aumento significativo do tamanho dos vazios, ou seja, tamanhos maiores que 0,40 mm poderão ser considerados como defeito "falta de adesivo". A Figura 30 ilustra em cores a distribuição de tamanhos de vazios de acordo com o histograma da Figura 2, sendo representado em azul claro a falta de adesivo, ou seja, vazios com tamanhos maiores que 0,40 mm.

Analysis				×
🔯 💥 🕺 🛱 🖣 😘 🦷	123			
••• Size (ECDa)		From 🚯 Orientation 💽 Describe		
- Size (LCDa) 🖾 Major diameter		Form 😗 Urientation 🛄 Porosity		_
N,% 25- 20- 15- 5- 0.02 0.05 0.10	112 88 0.20 0.40	∾ ● ● ● ←		nm
Description	Abbreviation	Value	Unit	
File name		amostra_16rec_rot_voi_1056.bmp		
Z position	Pos.Z	13.09686	mm	
Number of objects	Obj.N	1771		
Total ROI area	T.Ar	244.23257	mm^2	Ξ
Object area	Obj.Ar	89.89814	mm^2	
Percent object area	Obj.Ar/T.Ar	36.80842	%	
Total ROI perimeter	T.Pm	62.51803	mm	
Object perimeter	Obj.Pm	575.67724	mm	
Object perimeter / area ratio	Obj.Pm/Obj.Ar	6.40366	1/mm	
Average object area	Av.Obj.Ar	0.05076	mm^2	
Average object area-equivalent circle	Av.Obj.ECDa	0.25423	mm	
Surface convexity index	SCv.I	15.47381	1/mm	
Euler number	Eu.N	1683		
Number of closed pores	Po.N(cl)	88		
Area of closed pores	Po.Ar(cl)	154.33266	mm^2	
Perimeter of closed pores	Po.Pm(cl)	513.15922	mm	
Closed porosity (percent)	Po(cl)	63.19132	%	
Area of open pore space	Po.Ar(op)	0.00177	mm^2	
Total area of pore space	Po.Ar(tot)	154.33443	mm^2	-
Delette				
				<b>א</b>
6 Color			•	
©	(	)		0
0		η		0

Figura 29. Histograma da distribuição de vazios da fatia da amostra "Adesão D1" (Figura 28) obtido através da análise no *CTan*.



Figura 30. Imagem da fatia "Adesão D1" segmentada em cores de acordo com a distribuição de tamanhos dos vazios do histograma da Figura 29.

# Análise tridimensional

Os resultados apresentados a seguir mostraram que a caracterização qualitativa dos principais defeitos ocorridos em juntas adesivas ponto e bolsa é possível.

Na Figura 31 pode ser observada a amostra "Adesão D1" reconstruída em 3D, utilizando o programa *CTvox*. O presente estudo consiste em avaliar a junta adesiva e por isso apenas esta região será selecionada para facilitar a visualização e análise dos defeitos.



Figura 31. Visualização tridimensional da amostra "Adesão D1" reconstruída no programa CTvox.

A análise do interior do corpo de provas é possível a medida que camadas (fatias) são removidas. A Figura 32 (a), (b), (c) e (d), referente a amostra "Adesão D1", mostra uma sequência iniciada no duto em contato com a junta adesiva, passando pelo interior do adesivo, fatia a fatia. Como já foi dito anteriormente, de acordo com a densidade do material, diferentes graus de atenuação são observados e estes são retratados nas imagens por cores, onde o duto compósito está representado pela cor verde, a junta adesiva pela cor vermelha (os pontos verdes na junta adesiva aparecem devido sua composição possuir elementos de densidade similar a do duto) e os vazios (poros) pela cor azul. Esse padrão de cores será adotado na caracterização de todas as amostras.

A região com ausência de adesivo fica clara na Figura 32(c). Com objetivo de analisar a falta de adesivo, através de recursos computacionais, foi possível evidenciar somente a região dos vazios como mostrado na Figura 33.





Figura 32. Sequência das fatias da junta adesiva da amostra "Adesão D1".



Figura 33. Região de vazios em azul da amostra "Adesão D1".

Outras projeções da amostra "Adesão D1" podem ser observadas nas Figuras 34(a),(b) e (c). A falta de adesivo, em azul, continuou evidente sendo indicada pelos balões em vermelho.





Figura 34. Regiões com falta de adesivo representadas na cor azul da amostra "Adesão D1".

A análise qualitativa visa caracterizar além da "ausência de adesivo", a "falta de aderência" entre o adesivo e o duto. Simulado através de uma fina fita adesiva colocada entre o duto e o adesivo, este defeito aparece na microtomografia em tom azulado como indicado pelos círculos vermelho na Figura 35(a) e (b). O fato da fita ser identificada com coeficiente de atenuação próximo ao dos vazios, ou seja, ar, fica clara a eficiência em usar essa metodologia para simular a falta de adesão para análise em microtomografia.



Figura 35. Regiões com falta de adesão representadas na cor azul da amostra "Adesão D1".

Os resultados apresentados até o momento comprovam a eficácia da técnica de microtomografia na caracterização de ambos defeitos simulados: falta de adesão e falta de adesivo. Contudo, uma das limitações da referida técnica se deve ao fato não poder ser empregada no campo, com resultados em tempo real. Por esse motivo foi feita a interação com a técnica de ultrassom a fim de validar os resultados obtidos por Almeida [9].

#### Microtomografia x Ultrassom

De acordo com os resultados encontrados por Almeida [9], a técnica de ultrassom se mostrou adequada na caracterização de defeitos em juntas adesivas "ponto e bolsa". As limitações encontradas no ensaio ultrassônico abrangeram a dúvida da existência de defeito ou não em regiões denominadas de transição, assim como a ausência de informações quantitativas. Desta forma, a segunda etapa deste estudo consistiu em confrontar os resultados de ultrassom [9] com a análise qualitativa de microtomografia de forma a esclarecer/ validar a caracterização da região defeituosa, de transição e não defeituosa estabelecidas no ensaio ultrassônico.

• Falta de adesivo

As Figuras 36 a 38 mostram os resultados encontrados em microtomografia para 3 amostras: "Adesivo D", "Adesivo T" e "Adesivo ND" referentes a região defeituosa, de transição e não defeituosa apresentadas pelo ensaio de ultrassom.

Os padrões adotados neste trabalho permitiram facilmente a identificação das regiões com falta de adesivo em todas as imagens das fatias adquiridas. A Figura 36 mostra uma sequência de camadas com a ausência de adesivo, identificada em azul. A evidente distinção do adesivo, em vermelho, e dos vazios, se caracteriza por ser uma amostra que possui o defeito simulado "falta de adesivo". Essa análise corrobora o resultado encontrado pela técnica de ultrassom [9], ou seja, trata-se de uma região defeituosa.





(c)

(d)

Figura 36. Sequência das camadas de juntas adesivas para amostra "Adesivo D" denominada DEFEITUOSA pela técnica de ultrassom.

Observou-se que a ausência de adesivo, em azul, é extensa na amostra "Adesivo T", referente a região de transição, como exposto fatia a fatia na Figura 37. A indicação obtida com a microtomografia é de uma região defeituosa, esclarecendo a incerteza, ou seja, a existência ou não de defeito na região de transição, determinada pelo ensaio de ultrassom.

Portanto, através da análise qualitativa microtomográfica entende-se como defeituosa a região antes denominada de transição.





Figura 37. Sequência das camadas de juntas adesivas para amostra "Adesivo T" denominada TRANSIÇÃO pela técnica de ultrassom.

Conforme pode ser observado na Figura 38, que retrata uma sequência de camadas da amostra "Adesão ND", os resultados obtidos por Almeida [9] vão de encontro com o apresentado pela microtomografia, pois não foram observados vazios que pudessem ser caracterizados como ausência de adesivo e sim poros intrínsecos ao material.





Figura 38. Sequência das camadas de juntas adesivas para amostra "Adesivo ND" denominada NÃO DEFEITUOSA pela técnica de ultrassom.

As Figuras 39 (a), (b) e (c) apresentam a matriz e o adesivo de forma transparente permitindo visualizar apenas os vazios, em azul, para cada uma das amostras anteriores, permitindo comparar os 3 resultados possíveis no ensaio de ultrassom. Em todas as imagens ficaram evidentes os vazios encontrados, seja devido a falta de adesivo ou poros. Na Figura 39(a), considerada defeituosa, nota-se a predominância da ausência de adesivo. Análise similar pode ser feita na Figura 39(b) que mesmo com uma proporção menor de vazios, também pode ser considerada uma região defeituosa. Todavia, a Figura 39(c) é considerada não defeituosa apesar de apresentar vazios, pois estes, em uma análise qualitativa, podem ser considerados poros intrínsecos ao material devido a sua extensão.





Figura 39. Região de vazios (a) amostra Adesivo D - DEFEITUOSA; (b) amostra Adesivo T - TRANSIÇÃO; (c) amostra Adesivo ND - NÃO DEFEITUOSA.

(c)

(b)

Durante a análise tridimensional foram observados diversos ângulos e transparências das amostras. Chamou a atenção na amostra "Adesivo T" que além da ausência de adesivo pode ser observada a falta de adesão. Nesta amostra foi simulada apenas a falta de adesivo, sendo utilizado 30% a menos de adesivo que o recomendado pelo fabricante. Entretanto, durante o processo de preparação e junção das superfícies a aderência entre o adesivo e o duto não foi efetiva, ocorrendo de forma não proposital. A falta de adesão pode ser observada, em azul, nas imagens das Figuras 40(a) e 40(b) ao apresentar com suave transparência o adesivo e a matriz.

As imagens permitiram observar que a falta de adesão ocorrida de fato, ou seja, não planejada, possui a mesma representação na microtomografia que a fita adesiva

colocada para simular o defeito. Ambas, fita adesiva e ar, possuem coeficientes de atenuação próximos e estão representados pela tonalidade azul.

Vale ressaltar que a amostra "Adesivo T", no ensaio de ultrassom, foi caracterizada como região de transição, ou seja, não foi possível afirmar se tinha ou não defeito. A microtomografia deixou clara a existência da falta de adesivo e da falta de adesão, entretanto o ensaio de ultrassom não foi capaz de determinar categoricamente o caráter defeituoso da amostra.



Figura 40. Amostra Adesivo T - TRANSIÇÃO: Falta de adesão.

(b)

• Falta de adesão

(a)

As principais divergências entre os resultados de microtomografia e ultrassom começaram a surgir ao confrontar os resultados das amostras com falta de adesão. Os resultados apresentados a seguir se referem as amostras Adesão 4-2 onde os resultados encontrados por ultrassom foram: defeito, transição e não defeito.

As Figuras 41 e 42 mostram uma sequência de fatias das juntas adesivas das amostras "Adesão D1" e "Adesão D2", respectivamente. Ambas as amostras foram caracterizadas como defeituosas pelo ensaio de ultrassom. A simulação da falta de adesão, como dito anteriormente, foi feita através de uma fita adesiva colocada entre o duto e o adesivo. Entretanto, os cuidados com os procedimentos de preparação e montagem durante a junção dos dutos não foram suficientes para não incluir mais um defeito: a falta de adesivo. Os dados qualitativos das Figuras 41(c) e 42(c) demonstram de forma clara a ausência de adesivo, em azul.





Figura 41. Sequência das camadas da junta adesiva da amostra Adesão D1 com resultado de ultrassom sendo região DEFEITUOSA.





Figura 42. Sequência das camadas da junta adesiva da amostra Adesão D2 com resultado de ultrassom sendo região DEFEITUOSA.

Como exposto anteriormente, os resultados apresentados na microtomografia levam em consideração o coeficiente de atenuação do material. Nas Figuras 43(a) e (b) é possível observar a fita utilizada para simular o defeito falta de adesão na amostra "Adesão D1" (Figura 41). A fita é observada em tonalidade azul, ou seja, mesma tonalidade que os vazios (ar), demonstrando que para microtomografia, a mesma representa bem o defeito falta de adesão.

As Figuras 43(c) e (d) são referentes a caracterização da fita por outro ângulo, onde a Figura 43(c) é a amostra com o duto (verde) com alto grau de transparência, evidenciando a matriz e a fita, observada pela lateral. Pode-se observar, na Figura 43(d) com transparência total do duto e do adesivo, a falta de adesão representada pela fita adesiva em toda extensão da amostra.





(c)

(d)

Figura 43. Imagem da fita usada na simulação da falta de adesão na amostra "Adesão D1", representada pela tonalidade azul.

As amostras "Adesão D1" e "Adesão D2" foram caracterizadas como defeituosas pelo ensaio de microtomografia. Entretanto, vale ressaltar que a microtomografia detectou além da falta de adesão, a ausência de adesivo. O resultado de microtomografia portanto, vai de encontro ao determinado por Almeida [9]. A questão a ser discutida é se o ensaio de ultrassom detectou a falta de adesivo ou a falta de adesão, visto que não há um resultado característico para cada defeito.

As amostras "Adesão T1" e "Adesão T2" denominadas regiões de transição no ensaio de ultrassom foram analisadas e os resultados se encontram nas Figuras 44 e 45, respectivamente. A região de transição é uma região crítica no ensaio de ultrassom. Ficou evidente nas fatias representadas pelas Figuras 44(c) e 45(c) que apesar do defeito simulado ser a falta de adesão, a quantidade inferior de adesivo está caracterizada.

Em uma amostra com a presença da fita adesiva, espera-se como resultado "Região defeituosa". Tal resultado não foi encontrado pela técnica ultrassônica, conduzindo a uma observação mais detalhada das limitações dessa técnica no presente estudo.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 44. Sequência das camadas da junta adesiva da amostra Adesão T1 com resultado de ultrassom região de TRANSIÇÃO.



(b)



Figura 45. Sequência das camadas da junta adesiva da amostra Adesão T2 com resultado de ultrassom região de TRANSIÇÃO.

A Figura 46(a) teve o duto suprimido, permitindo observar o adesivo, em vermelho, e os vazios em azul da amsotra "Adesão T1" (Figura 44). A Figura 46(b) mostra apenas os vazios da amostra "Adesão T1" deixando clara a falta de adesivo.



(b)

Figura 46. Região de vazios da junta adesiva da amostra "Adesão T1" com resultado de ultrassom região de TRANSIÇÃO.

Apesar do ensaio de ultrassom apresentar a classe "em dúvida" quanto a existência de defeito ou não, classificando as amostras como "região de transição", o resultado deveria ser região defeituosa pois a falta de adesão foi inserida na amostra através da fita adesiva. A Figura 47(a) ilustra por outro ângulo que a microtomografia da amostra "Adesão T2" (Figura 45) consegue determinar o referido defeito apontado pelas setas amarelas. As Figuras 47(b) e (c) mostram a falta de adesivo ocorrendo simultaneamente à falta de adesão, mesmo de forma não proposital.



Figura 47. (a) Imagem da falta de adesão junta adesiva da amostra Adesão T2 com resultado de ultrassom região de TRANSIÇÃO; (b) e (c) Região com falta de adesivo.

(c)

(b)

Diante do resultado exposto nas amostras com regiões "defeituosas" e de "transição", se fez necessário aprofundar os estudos para entender, de fato, o que a técnica de ultrassom reporta como resultado.

Com objetivo de melhor avaliar os resultados obtidos em ultrassom, realizou-se a análise de amostras consideradas não defeituosas: "Adesão ND1" e "Adesão ND2". As Figuras 48 e 49 mostram a sequência de fatias da junta adesiva com defeito falta de adesão simulado, porém com resultado da inspeção ultrassônica "não defeito". O resultado determinado pela técnica ultrassônica surpreende pelo fato de que nas amostras "Adesão ND1" e "Adesão ND2" existe a fita adesiva simulando a falta de adesão, esperando-se então que o resultado fosse "região defeituosa".

Na Figura 48(d) é possível observar a presença da fita adesiva, representada pela tonalidade azul, e o adesivo em vermelho. O mesmo pode ser visto na Figura 49(c), onde a fita adesiva começa a aparecer conforme camadas da amostra vão sendo removidas.

Fica evidente na Figura 48(c) que o defeito falta de adesivo não esteve presente. Na Figura 49(b) apenas uma pequena região não apresentava adesivo. Desta forma o resultado "não defeito" atribuído pelo ultrassom está indo de encontro com a análise de ausência de adesivo e não falta de adesão.





(b)



(c)

(d)

Figura 48. Sequência das camadas da junta adesiva da amostra Adesão ND1 com resultado de ultrassom sendo região NÃO DEFEITUOSA.





Figura 49. Sequência das camadas da junta adesiva da amostra Adesão ND2 com resultado de ultrassom sendo região NÃO DEFEITUOSA.

A Figura 50 reforça que a microtomografia foi capaz de detectar a falta de adesão nas amostras "Adesão ND1" e "Adesão ND2" simulada através da fita adesiva. Observou-se na Figura 50 uma sequência da amostra "Adesão ND2" que evidencia por outros ângulos a falta de adesão, circulada em amarelo, onde em cada etapa foi conferida transparência ao duto e ao adesivo, gradativamente até ficar somente a fita adesiva, em azul.





Figura 50. (a) e (b) Imagem do defeito falta de adesão visto por outro ângulo da amostra "Adesão ND1"; (c) e (d) Fita usada na simulação.

Diante dos resultados apresentados, a principal questão que se levanta é se o ensaio de ultrassom realmente foi efetivo na caracterização do defeito falta de adesão. Diante do exposto, entende-se que o ensaio de ultrassom, para dimensões de 15 x 15 mm, foi capaz de determinar a "ausência de adesivo" e não a "falta de aderência".

A efetividade da fita em representar o defeito "falta de adesão" no ensaio de ultrassom passou a ser duvidosa, e no presente estudo os resultados apontaram que esta metodologia não foi eficiente, podendo estar relacionado ao material da fita adesiva utilizada. Entretanto, na microtomografia a fita exemplifica bem o que seria a falta de adesão, pois, em se tratando de um material de baixa densidade e com espessura muito fina, os feixes de raios-x atravessam o material. Assim, para a microtomografia, a fita funciona como se fosse uma camada de ar, tanto que é observada junto com os poros (mesma cor). A Figura 51 mostra a imagem de uma amostra aberta denominada "Adesão A", ou seja, os dutos foram separados e a fita usada na simulação foi destacada

até a metade da junta adesiva antes da aquisição no microtomógrafo. A fita adesiva aparece levantada em azul e é possível observar sutilmente sua forma.





Figura 51. Sequência de imagens da amostra aberta.

A simulação de "falta de adesão" é estudo de diversos artigos devido a grande dificuldade de representar um defeito de difícil percepção por ensaios não destrutivos, porém considerado crítico, com potencial ponto de vazamento, colapso etc. A microtomografia, para resolução de 12,4 $\mu$ m e 15 $\mu$ m, foi capaz de detectar esta descontinuidade, porém o ensaio de ultrassom não teve sensibilidade para detectar esse tipo de defeito.

## 4.2. Análise quantitativa

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados obtidos pelo sistema de análise de dados do programa CTan, onde foi possível determinar o volume de vazios das amostras referidas acima.

	Adesivo D	Adesivo T	Adesivo ND
Volume total – VOI - TV(mm <sup>3</sup> )	194,760	299,860	390,670
Volume do objeto – Obj.V (mm <sup>3</sup> )	155,413	251,278	384,670
Percentual do volume do objeto – Obj.V/TV (%)	79,80	83,80	98,46
Percentual do volume de vazios (%)	20,02	16,02	1,54

Tabela 5. Resultado da quantificação da amostra estudada Adesivo 8-2.

Tabela 6. Resultado da quantificação da amostra estudada Adesivo 8-2.

	Adesão D1	Adesão D2	Adesão T1	Adesão T2	Adesão ND1	Adesão ND2
Volume total – VOI - TV(mm <sup>3</sup> )	242,321	346,108	184,804	263,750	189,309	254,633
Volume do objeto – Obj.V (mm <sup>3</sup> )	167,439	324,239	154,860	228,631	172,965	237,510
Percentual do volume do objeto – Obj.V/TV (%)	69,1	93,68	83,79	86,68	91,36	93,27
Percentual do volume de vazios (%)	30,9	6,32	16,21	13,32	8,64	6,73

Assim como na análise qualitativa, a análise quantitativa também será confrontada com os resultados do ensaio de ultrassom. Diante dos dados obtidos é possível estimar uma
correlação entre o percentual de vazios determinado pela microtomografia e a análise qualitativa ultrassônica. Devido ao fato de existir "falta de adesão" e "falta de adesivo" em todas as amostras, independente de ter sido simulado ou não, a análise quantitativa será global. Para os resultados das amostras "região defeituosa" em ultrassom, tem-se o percentual de vazios variando de 30,9 a 6,32%. Para as amostras "região de transição", esse valor variou de 16,21 a 13,32% e para "região não defeituosa" os valores encontrados se encontraram dentro da faixa de 1,54 a 8,64%.

Uma análise mais ampla dos resultados quantitativos deve ser feita abrangendo as considerações da análise qualitativa. Apesar da classificação qualitativa obtida no ensaio ultrassônico, esta não mostrou-se adequada no que tange a falta de adesão.

A Figura 38 mostrou que o percentual considerado "não defeito" pela técnica da microtomografia está em torno de 98% de adesivo sendo o restante podendo ser considerado poros intrínsecos ao material. Apesar do resultado "não defeito" abranger até 9% de falta de adesivo, essa consideração deve ser avaliada de acordo com o estabelecido pelo fabricante.

De acordo com a especificação do fabricante, a ausência de adesivo até 30% é considerada permitida, garantindo a integridade da junta. Esse percentual refere-se a amostra completa e o presente estudo foi em pedaços dessa amostra. Uma etapa sugerida dessa pesquisa é a montagem de um mosaico com imagens sucessivas a fim de poder caracterizar a amostra inteira.

### **CAPITULO 5**

## **5.1. CONCLUSÕES**

Apesar de ser uma técnica não destrutiva recente na área industrial, a microtomografia se mostrou eficiente e adequada à caracterização e quantificação dos defeitos existentes em juntas do tipo "ponto e bolsa" em dutos compósitos de resina epóxi reforçada por fibra de vidro. Neste trabalho foi possível identificar a falta de adesivo e a falta de adesão assim como dimensionar e localizar esses defeitos nas amostras analisadas de modo qualitativo e quantitativo.

Qualitativamente a microtomografia permitiu a classificação das amostras em dois grandes grupos: amostra "defeituosa" e amostra "não defeituosa". A distinção do tipo de defeito encontrado também mostrou-se eficiente através desta técnica, sendo claramente observada a ocorrência da ausência de adesivo ou falta de aderência entre a junta adesiva e o duto compósito.

O percentual da ausência de adesivo, quantificado por microtomografia, atingiu valores entre 30,9% e 1,54%.

Os resultados obtidos pela microtomografia permitiram identificar o que ocorre nas amostras em que o resultado encontrado pelo ensaio de ultrassom não permitiu afirmar a presença ou não de uma "região defeituosa". Denominada de "região de transição", a microtomografia demonstrou que nesta área existe a falta de adesivo e a mesma pode ser portanto considerada como "região defeituosa". A microtomografia demonstrou também, que o ensaio ultrassônico não detecta de forma eficiente o defeito "falta de adesão", caracterizando principalmente a falta de adesivo.

A grande limitação encontra-se na dificuldade de realizar o ensaio de microtomografia no campo, visto que é necessário um microtomógrafo portátil e que todos os lados da amostra estejam acessíveis. Por isso, o ensaio de ultrassom, amplamente utilizado em campo, se faz essencial. Esta técnica de campo, junto com a microtomografia, parece atender a todas as necessidades de uma análise/ caracterização de juntas adesivas em dutos compósitos.

## **5.2. TRABALHOS FUTUROS**

Como estudos futuros, pretende-se otimizar o limiar dos picos de ultrassom de forma a suprimir a região de transição, assim como buscar um método/ material capaz de simular a falta de adesão para ensaio de ultrassom. Ambos estudos contam com a simulação computacional e tratamento estatístico como aliados. Visando determinar a quantidade de falta de adesivo na amostra global, pretende-se utilizar mosaico de imagens unindo os resultados gerados por microtomografia e ultrassom.

# REFERÊNCIAS

[1] OLIVEIRA, D. F., 2010. Desenvolvimento de sistemas de inspeção por técnicas radiográficas na análise de perda de adesão em dutos compósitos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ.

[2] SOUZA, M. P. V., 2014. Inspeção não destrutiva por ultrassom e emissão acústica de juntas adesivas de material compósito. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ.

[3] SUMMERSCALES, J., Non-destructive testing of fiber-reinforced plastic composites, vol 1.

[4] SOUZA, M. P. V., JOAO M. A. REBELO, SOARES, S. D., "Ultrasonic inspection of adhesive joints on fiberglass reinforced epoxy pipes", In: **16th International Conference on Composite Structures (ICCS16)**, Porto, 2011.

[5] SANTIM, J.L. Ultra-som: Técnica e Aplicação. PETROBRAS

[6] MACHADO, A. C., 2012. Estudo de parâmetros microestruturais de rochasreservatório para diferentes resoluções utilizando microtomografia computadorizada 3D. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ.

[7] MACHADO, A. C., LIMA, I., LOPES, R. T., 2012. "Reservoir rock microstructure evaluation by x-ray microtomography". *The Sixth International Conference on Quantum, Nano and Micro Technologies*. pp. 65-68, ISBN: 978-1-61208-214-1

[8] GOMES, O. F. M., 2001. Processamento e análise de imagens aplicados à caracterização automática de materiais. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[9] ALMEIDA, P. D., 2011. Inspeção por ultrassom de juntas adesivas de tubulações em material compósito. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Projeto de graduação. DEMM/UFRJ

[10] PEREIRA, G. R., 2010. Microtomografia por fluorenscência de raios x utilizando radiação sincrotron em amostras biológicas. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ.

[11] FERREIRA, C.C., MAIA, A. F., XIMENES, R. E. M., GARCIA, C. A. B., Cálculo dos coeficientes de absorção energética de dez materiais para utilização em tomografia computadorizada. VOL 5, NUM. 11. 2009.

[12] THOMPSON, D. O., CHIMENTI, D. E., Review of Progress in Quantitative nondestructive evaluation. Volume 7A.

[13] ANDREUCCI, R., 2003. *Apostila de Radiologia Industrial*. Fonte: http://www.infosolda.com.br/andreucci.

[14] ALVES, H. D. L., 2012. Análise da porosidade de sedimentos geológicos usando a técnica de microtomografia computadorizada. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ

[15] OLIVEIRA, M. F. S., 2012. Avaliação de meios geológicos porosos por técnicas atômicas e nucleares. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ.

[16] NOGUEIRA, L. P., 2011. Microtomografia computadorizada e microfluorescência de raios x por luz sincrotron para avaliação dos efeitos da radiação em microestruturas ósseas de rato. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Tese de DSc. COPPE/UFRJ.

[17] FORSEBERG, F., 2008. *X ray Microtomography and Digital Volume Correlation for Internal Deformation and Strain Analysis.* Doctoral Thesis. Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division os Experimental Mechanics.

[18] PINHEIRO, C.J.G., 2008. Desenvolvimento de um algoritmo para quantificação de microestruturas em tomografias 3D de objetos complexos obtidas com radiação sincrotron. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ.

[19] GOMES, O. F. M., 2006. *Microscopia co-localizada: novas possibilidades na caracterização de minérios*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Tese de D.Sc. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[20] FONTES, A. V., 2013. *Caracterização tecnológica de minério de ferro especularítico*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Projeto de graduação. DEMM/UFRJ.

[21] VIEIRA, C. B.; PACIORNIK. S. Uncertainty evaluation of metallographic measurements by image analysis and thermodynamic modeling. *Materials Characterization*, v. 47, p. 219-226, 2001.

[22] NOGUEIRA, L. P., 2008. *Quantificação histomorfométrica óssea a partir de microtomografia 3D por contraste de fase e transmissão de raio x utilizando luz síncroton*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ

[23] CALLISTER JR, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.

[24] GIBSON, A. G., *Composite Material in the Offshore Industry*, Comprehensive Composite Materials, vol. 6, pp. 459-478, 2000.

[25] SILVA, A. M. R., 2015. Estudo de juntas adesivas por ensaios não destrutivos com radiações inonizantes. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ.

[26] SKYSCAN, 2011a. SkyScan 1173 User Guide. Fonte: http://www.skyscan.be

[27] SKYSCAN, 2013. SkyScan 1272 User Guide. V.1

[28] ALVES, H. D. L., 2015. Metodologia de microtomografia computadorizada com dupla energia para caracterização mineralógica de rochas. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ

[29] ANDREUCCI, R. Ensaio por ultrassom. ABENDE, 2003.

[30] BROTHERHOOD, C. J.; DRINKWATER, B. W.; DIXON, S. *The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques*. Ultrasonics, v. 41, p. 521-529, 2003.

[31] FARO, A. A. D. S., 2008. Desenvolvimento de tubos compósitos produzidos por enrolamento filamentar para possíveis aplicações como rises rígidos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ. [32] FELDKAMP, L., DAVIS, L., & KRESS, J., 1984. "Pratical Cone-beam Algorithm". *Journal of the Optical of Society American*, v. 1, n. 6, 612-619.

[33] GIBSON, R. F., *Principles of Composites Material Mechanics*, Ed. 1, New York, Mc Graw Hill, 1994.

[34] GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E., 2000. "Processamento de Imagens Digitais", Edgard Blucher.

[35] GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E., 2001. *Digital Images Processing*. New Jersey: Prentice Hall.

[36] MILLER R. K., HILL, E. V. K., Nondestructive Testing Handbook. 3 ed, Vol. 6, ASNT.

[37] NDT Resource Center. Disponível em: <<u>http://www.ndt-ed.org</u>>, Acesso em: 02 agosto de 2014.

[38] Non Destructive Testing Handbook. 3rd ed. Columbus: American Society of Non Destructive Testing, V.7, 2007.

[39] SKYSCAN, 2011b. NRecon User Guide. Fonte: http://www.skyscan.be

[40] SKYSCAN, 2013a. The user's guide CT-Analyser. Fonte: http://www.skyscan.be

[41] SKYSCAN, 2013b. *Morphometrics Parameters in CT-Analyser*.. Fonte: <u>http://www.skyscan.be</u>

[42] SOUZA, M. P. V., Almeida, P. D., Rebello, J. M. A., Soares, S, D., "Inspeção Ultrassônica de Juntas de Dutos Compósitos do Tipo Ponto e Bolsa", In: 11<sup>a</sup>
Conferência sovre Tecnologia de Equipamentos – COTEQ, Pernambuco, 2011.

#### ANEXO A

Abstract aceito para apresentação na Conferência Europeia de Espectrometria de Raios X (EXRS-2014).

# Non-destructive inspection using 3D microtomography of adhesive joints on composite pipes

A. V. Fontes<sup>(1)</sup>, A. C. Machado<sup>(2)</sup>, A. S. Machado<sup>(2)</sup>, R. T. Lopes<sup>(2)</sup>, I. Lima<sup>(2)</sup>, G. R. Pereira<sup>(1)</sup>

 (1) Non destructive testing, corrosion and welding laboratory – LNDC, Federal University of Rio de Janeiro, Postal 68505, Zip. 21941.972, Rio de Janeiro, Brazil
 (2) Nuclear Instrumentation Laboratory, I-133, Federal University of Rio de Janeiro, Postal 68509, Zip.

21941.972, Rio de Janeiro, Brazil

The need for methods that can ensure the integrity of composite pipes is the subject of constant study, given the importance of plastic tubes reinforced with the operation of offshore platforms. Its properties provide good relation between strength and weight and corrosion resistance. Polymeric adhesive joints are points more likely to collapse due mainly to its assembly process. The kissing bond and lack of adhesive yielding areas with voids providing no glue is due to the discontinuity layer between the adhesive layer and the original surface or the lower the amount of adhesive that indicates the standard procedure, respectively [1].

X-ray microtomography allows the examination of the internal structure with the advantage of obtaining direct 3D parameters and consequently qualitative and quantitative characterizing of the structure. MicroCT images were obtained in a high energy microCT system, which was calibrated to operate in an energy and current of 70 kV and 90  $\mu$ A respectively. The pixel size was 12,4  $\mu$ m and a flat detector was used (2240 x 2240 pixels) to register the cone X-ray beam transmission. After the acquisition procedure the images were reconstructed by using algorithm based on Feldkamp work [4] and the image processing was performed with CTAn and CTvox [5] softwares in order to analyze and visualized the 3D data.

Figure 1 shows the 3D MicroCT visualizations of adhesive joints. It can be seen that the adhesive (orange), composite pipe (green) and lack of adhesive and kissing bond (blue). The experimental parameter ratio of the volume of interest by solid objects binarized was 69%. Note a gap of 31% adhesive joints of pipe, increasing the probability of disruptions.



Figure 1: 3D MicroCT visualizations of the adhesive joints (a), a section of adhesive joints (b) and Kissing bond and lack adhesive (pores) (c).

In the present study, a new method of characterization of join adhesive was developed. The results showed that defects can be described through MicroCT whereas there isn't any consolidate nondestructive methodology to evaluate and control their integrity.

[1] Souza, M.P.V. Non Destructive Inspection by Ultrasound and Acoustic Emission of Adhesive Joints on Composite Pipes. 2014.

[2] NRecon, 2011. SkyScan/Bruker micro-CT, Kartuizerweg 3B 2550 Kontich, Belgium.

[3] InstaRecon, 2011. CBR Premiun 12-8K<sup>TM</sup>, InstaRecon, Champaing, IL, USA.

[4] Feldkamp, L.A., Davis L.C., Kress J.W., 1984. Practical cone beam algorithm, J Opt Soc Am A, 1, 612-619.

[5] CTAnalyser, 2012. The user's guide, Skyscan/Bruker micro-CT, Kartuizerweg 3B 2550 Kontich, Belgium.