

# INSPEÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS EM DUTOS COMPÓSITOS PRFV POR ULTRASSOM E MICROTOMOGRAFIA\*

Ariella Vianna Fontes<sup>1</sup>  
Priscila Duarte de Almeida<sup>2</sup>  
Sergio Damasceno Soares<sup>3</sup>  
Gabriela Ribeiro Pereira<sup>4</sup>

## Resumo

A integridade estrutural das tubulações existentes em plantas de extração de óleo e gás é um dos grandes desafios na área de ensaios não destrutivos, visando garantir a segurança e eficiência da produção. Os dutos de plástico reforçados com fibra de vidro (PRFV) tem, progressivamente, substituído as ligas metálicas tradicionais por apresentarem alta resistência mecânica e a corrosão além de baixo peso específico. 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. O presente trabalho apresenta a caracterização qualitativa e quantitativa dos defeitos típicos encontrados em juntas adesivas do tipo “ponto e bolsa” utilizando as técnicas de ultrassom e microtomografia. Os resultados mostraram que a técnica de ultrassom é promissora no que tange a detecção de defeitos em juntas adesivas, ainda que com limitações. A microtomografia mostrou-se adequada para caracterização qualitativa e quantitativa dos defeitos visto que esta permite analisar a estrutura interna do material. **Palavras-chave:** Juntas adesivas; Dutos compósitos; Ultrassom; Microtomografia.

## INSPECTION OF GFRP ADHESIVE JOINTS BY ULTRASONIC TESTING AND 3D MICROTOMOGRAPHY

### Abstract

The structural integrity of existing pipelines in the oil and gas extraction operations is essential to ensure production safety and efficiency. Composite materials have progressively being applied in these pipelines in replacement of standard metal alloys, since composites may combine interesting properties such as high corrosion resistance, high mechanical strength and low specific weight. In this context, this work aims to present non-destructive inspection methodologies, such as ultrasonic testing (UT) and X-ray transmission microtomography (microCT), in order to detect and quantify the defects of lack of adhesive and lack of adhesion, typically found in adhesive joints of glass fiber reinforced polymer (GFRP) pipes. The results showed that both techniques present inherent advantages and limitations on their application.

**Keywords:** Adhesive joints; Composite pipe; Ultrasonic inspection; Microtomography.

<sup>1</sup> Engenheira de materiais, MS.c, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira de materiais, MS.c, Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC), Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro, D.Sc, CENPES/Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>4</sup> Física, D.Sc., professora adjunto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Setores de alta tecnologia impulsionam o aperfeiçoamento e a busca por novos materiais e soluções inovadoras. A indústria petrolífera absorve, atualmente, grande parte dos estudos voltados para os materiais compósitos, seja na área de desenvolvimento ou na área de caracterização. A aplicação dos materiais compostos é ampla devido ao conjunto de propriedades favoráveis a sua utilização em ambientes como refinarias e plataformas de petróleo. A alta resistência a corrosão, alta resistência mecânica e baixo peso específico encontrados nos compósitos de matriz polimérica reforçado com fibra de vidro (PRFV) conduziu a uma vasta aplicação deste material, substituindo as tradicionais tubulações metálicas condutoras de fluidos.

A conexão entre vários trechos de dutos compósitos pode ser realizada através de solda, juntas laminadas ou juntas adesivas, onde a última é objeto de estudo no presente trabalho [1]. As junções são regiões com grande susceptibilidade ao colapso devido à grande dificuldade do controle de qualidade no campo e a inspeção requerer técnicas de ensaios não destrutivos (END) ainda não consolidadas para materiais compósitos.

Amplamente utilizado, o processo de montagem de dutos compósitos denominado “ponto e bolsa” consiste em unir, com uma camada de adesivo, as extremidades de dutos com diferentes conicidades, ou seja, diâmetros diferentes. É nesta etapa que defeitos como porosidade, trincas, falta de adesão e falta de adesivo surgem, comprometendo a integridade da estrutura. 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 [2].

Nesse contexto ressalta-se a importância da caracterização das juntas adesivas afim de assegurar a integridade de estruturas críticas submetidas a esforços estáticos ou dinâmicos com funcionamento contínuo, evitando assim colapsos que levam a diminuição da segurança e grandes perdas financeiras. O desenvolvimento de técnicas não invasivas capazes de detectar e dimensionar, em materiais compósitos, os principais defeitos é uma busca constante [2]. Muitos ensaios não destrutivos mostram-se ineficientes ou parcialmente eficientes, sendo a correlação entre duas ou mais técnicas diferentes uma oportunidade de suprir as lacunas existentes atualmente.

Entre os ensaios mais aplicados de END, está a técnica de ultrassom. A monitoração das reflexões sônicas transmitidas ao material permitirá detectar a existência de descontinuidades, porém, a utilização desta metodologia ainda não permite a identificação do tipo de defeito. Apesar de recente, a técnica de Microtomografia computadorizada de raios X (Micro-CT) reúne características promissoras uma vez que permite avaliar qualitativa e quantitativamente a região desejada, pois produz imagens fidedignas a cortes seriados ao longo do objeto estudado [3]. No entanto, uma de suas limitações é a dificuldade de realizar o ensaio em campo.

O presente estudo visa caracterizar os defeitos (falta de adesivo e falta de adesão) em juntas adesivas “ponto e bolsa” através das técnicas de ultrassom e microtomografia afim de observar as vantagens e limitações impostas por cada

técnica, sendo a correlação entre as mesmas passível de unir aplicabilidade e confiabilidade futuramente.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Foram utilizadas amostras de material compósito de matriz epóxi reforçada com fibra de vidro para confecção dos dutos a serem analisados. Os dutos compósitos foram confeccionados por enrolamento filamentar com as espessuras de parede da ordem de 10,0 mm para dutos de 16". Após esta etapa foi realizada a junção dos trechos dos dutos simulando a real situação ocorrida no campo, porém com defeitos incluídos propositalmente. O adesivo utilizado nas juntas é constituído de resina epóxi, sílica cristalina, silicato de cálcio, sílica coloidal amorfa, metanol hidrolisado e fibras de aço inoxidável [2].

Foram analisadas juntas feitas da sobreposição das extremidades das duas partes de tubos de 16" de diâmetro a serem unidas recebendo um adesivo polimérico para consolidar a adesão dos trechos. Depois de unidos os trechos de tubos, a junta é cortada a 60° originando seis corpos de prova (Figura 1a). Posteriormente, três corpos de prova, com defeitos e sem defeito, são cortados novamente em serra de fita, desta vez originando amostras com dimensão 12mm x 12mm, para inspeção por ultrassom e análise por microtomografia (Figura 1b). No presente trabalho foram caracterizadas amostras com os defeitos artificiais: falta de adesão e falta de adesivo.



(a)



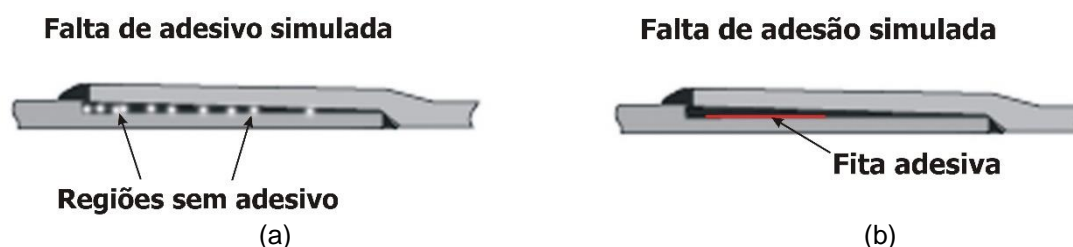
(b)

**Figura 1.** (a) Seção de uma junta de 16" de diâmetro; (b) Junta compósita após o corte em serra de fita.

Os principais defeitos encontrados nas juntas “ponto e bolsa” são porosidades, trincas, falta de adesão e falta de adesivo. O presente estudo concentra-se em caracterizar os dois últimos e para isso os mesmos foram inseridos artificialmente.

A falta de adesivo é caracterizada pela ausência da camada adesiva, gerando vazios em algumas regiões da junta. Este defeito foi simulado através da utilização de menor quantidade de adesivo que a indicada pelo fabricante para a perfeita união da junta. A falta de adesão é um defeito mais complexo, pois, ainda que a camada adesiva esteja presente, esta não está devidamente aderida à superfície do duto, o que pode

levar a estrutura a uma falha catastrófica. Este defeito foi simulado através da inserção de uma fita polimérica de 200  $\mu\text{m}$  de espessura entre a camada adesiva e a superfície do duto. A Figura 2 ilustra os defeitos simulados.



**Figura 2.** Defeitos estudados: (a) Falta de adesivo e (b) Falta de adesão.

## 2.2 Ultrassom

As inspeções por ultrassom foram realizadas por contato direto, empregando o método pulso-eco e um transdutor com frequência de 1,6 MHz. O equipamento de ultrassom utilizado foi um GE USIP 40. Blocos de calibração que reproduzem a estrutura de uma junta sem defeitos foram fabricados para possibilitar a calibração da sensibilidade dos ensaios.

A geometria e a irregularidade superficial dos corpos de prova impediram um adequado acoplamento entre o transdutor e o material e, portanto, a realização de uma varredura contínua foi descartada neste momento. Desta forma, para estas inspeções, a superfície dos corpos de prova foi dividida em uma malha quadriculada com 12 mm de lado e em cada ponto da malha foi realizada uma medida ultrassônica.

## 2.3 Microtomografia

As aquisições por microCT foram realizadas utilizando o microtomógrafo Skyscan/Bruker modelo 1272, tensão de 70 kV e corrente de 142  $\mu\text{A}$ , resolução espacial de 15  $\mu\text{m}$  e detector Flat Panel (820 x 2388 pixels) [4]. Após o procedimento de aquisição, as imagens foram reconstruídas usando o algoritmo baseado em Feldkamp [5] e o processamento de imagens foi realizado através dos softwares CTan [6] e CTvox [7] para análise e visualização tridimensional, respectivamente.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Ultrassom

Os resultados da inspeção por ultrassom estão apresentados em mapas C-scan na Figura 3. Estes mapas foram gerados a partir do monitoramento da amplitude do eco de fundo do material durante a tomada de dados. A cor azul indica uma região sem defeitos, a cor vermelha uma região defeituosa e a cor amarela uma região de transição, na qual não é possível atestar a presença ou ausência de defeito.

A Figura 3a apresenta o corpo de prova com o defeito de falta de adesão. Os resultados por ultrassom observados apresentaram uma grande área



majoritariamente defeituosa (onde há a presença da fita inserida), e outra área majoritariamente não-defeituosa, onde não há a presença da fita.

A inspeção para o corpo de prova com falta de adesivo está apresentada na Figura 3b. Os resultados demonstraram uma grande área sem defeitos (onde há a camada de adesivo) e duas áreas defeituosas, onde não há a presença de camada adesiva.



### 3.2 Microtomografia

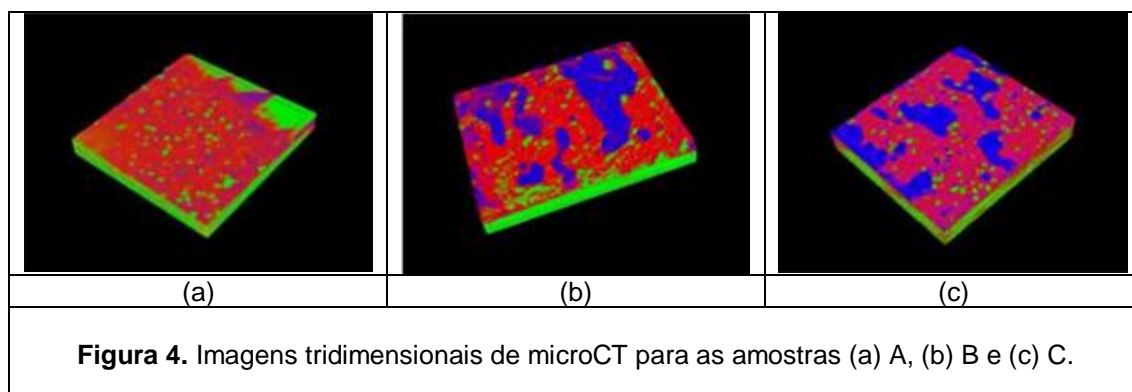
Após o corte dos corpos de prova para as inspeções, 3 amostras para cada tipo de defeito foram selecionadas para análise de microCT, conforme as indicações presentes na Figura 3 e abrangendo os resultados possíveis encontrados pela técnica de ultrassom: região defeituosa, região de transição e região não defeituosa. As amostras denominadas A, B e C são referentes a junta com falta de adesivo e as amostras D, E e F provenientes da junta com o defeito falta de adesão.

- Amostra A: Indicada como não defeituosa pelo ultrassom;
- Amostra B: Indicada como defeituosa pelo ultrassom;
- Amostra C: Indicada como “transição” pelo ultrassom;
- Amostra D: Indicada como defeituosa pelo ultrassom;
- Amostra E: Indicada como “transição” pelo ultrassom;
- Amostra F: Indicada como não-defeituosa pelo ultrassom.

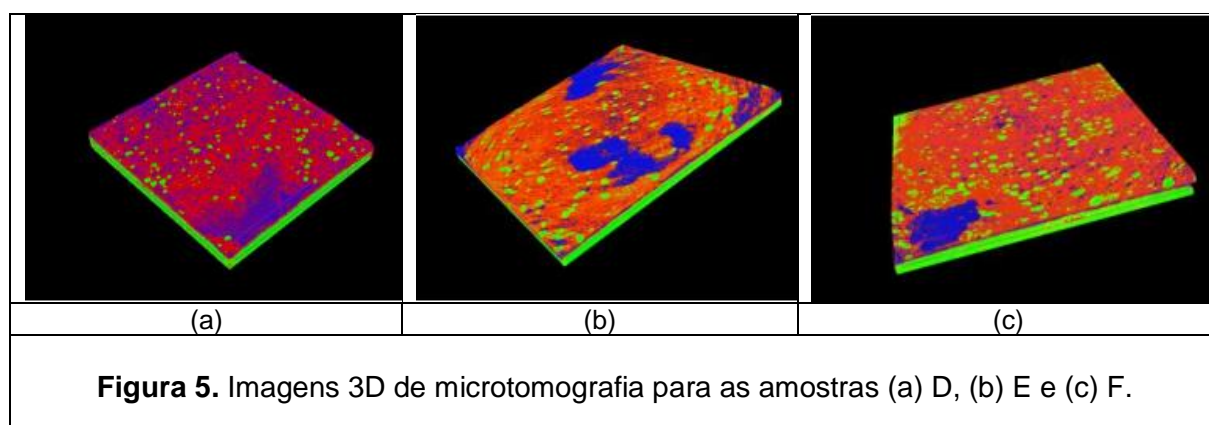
A Figura 4 apresenta os resultados de microCT para as amostras A, B e C. A caracterização do interior do corpo de prova é possível, e observado a medida que camadas (fatias) são removidas virtualmente. De acordo com a densidade do material, diferentes graus de atenuação são observados e estes estão representados nas imagens através de diferentes cores, onde o duto está representado pela cor verde, o adesivo pela cor vermelha e os vazios/poros pela cor azul.

A amostra A, indicada como não defeituosa pelo ultrassom, está essencialmente íntegra de acordo com a imagem da microCT (Figura 4a), apresentando apenas os vazios intrínsecos à estrutura polimérica. A amostra B, apontada como defeituosa pelo ultrassom, possui um volume considerável com ausência de adesivo, conforme observado na imagem da Figura 4b. Na Figura 4c a técnica de ultrassom denominou

como uma região de transição, no entanto, a microCT revela regiões com falta de adesivo considerável.



Os resultados de microCT referente as amostras D, E e F podem ser observados na Figura 5. Todas as referidas amostras possuem o defeito falta de adesão simulado conforme explicado anteriormente. Os resultados provenientes da inspeção por ultrassom, para as amostras D, E e F são região defeituosa, de transição e não defeituosa, respectivamente. No entanto, a microtomografia demonstrou que regiões com falta de adesivo somam-se a falta de adesão nas amostras E e F (Figuras 5b e 5c).

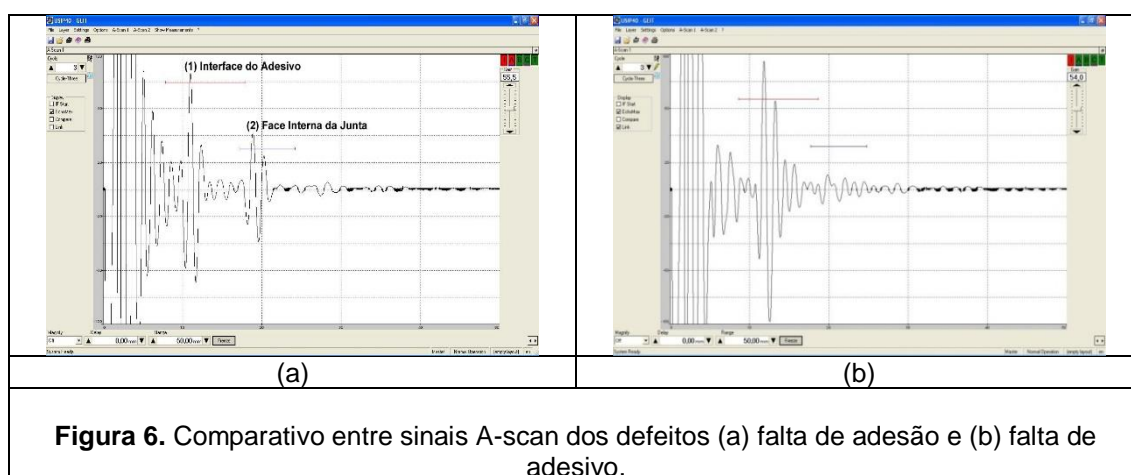


Os resultados apresentados demonstraram uma boa convergência entre as técnicas no que tange a detecção do defeito de falta de adesivo. A análise quantitativa da ausência de adesivo por microCT revelam que as amostras A, B e C possuem, respectivamente, um volume percentual de vazios de 1,54%, 20,02% e 16,02%. Estes valores podem futuramente ajudar a identificar o limite da técnica ultrassônica para a detecção deste tipo de defeito, permitindo o refino dos limiares de detecção estabelecidos e uma eventual eliminação da região de transição.

As inspeções para os corpos de prova D, E e F, ou seja, com falta de adesão, demonstraram certa divergência entre as técnicas. A microtomografia foi capaz de detectar que todos os corpos de prova possuíam este defeito; entretanto, o ultrassom falhou na detecção da falta de adesão no corpo de prova F. Adicionalmente, a microCT apontou que, em adição à falta de adesão, todos estes corpos de prova apresentam

o defeito de falta de adesivo, com volume percentual de vazios variando entre 6,32% e 13,32%. Não é possível afirmar se a técnica de ultrassom detectou a falta de adesão ou a falta de adesivo nos referidos corpos de prova. Ainda assim, estes resultados podem ser utilizados para o refino dos parâmetros ultrassônicos tendo em vista que a microtomografia é capaz de representar o estado real da junta.

O resultado para o corpo de prova F é particularmente interessante, uma vez que a microCT comprovou a existência da fita adesiva e o ultrassom não indicou a presença de defeito nesta região. Uma avaliação mais detalhada do sinal ultrassônico está apresentada na Figura 6. Há uma diferença tênue, porém importante, no comportamento do sinal ultrassônico quando a detecção dos defeitos de falta de adesão e falta de adesivo é confrontada. A Figura 6a apresenta uma região com falta de adesão e a Figura 6b apresenta uma região com falta de adesivo. O defeito de falta de adesivo proporciona uma queda significativa na amplitude do eco de fundo, enquanto o defeito de falta de adesão permite a chegada de uma parcela da onda sonora até o fundo da junta. Isto indica que o casamento de impedâncias entre o material da junta e o material da fita adesiva utilizada para simular este defeito admite a passagem da energia sonora, dificultando a detecção da falta de adesão em alguns pontos defeituosos.



Os resultados demonstram que ambas as técnicas empregadas são indicadas para a detecção de defeitos típicos de juntas coladas em material PRFV, porém, também apresentam suas limitações. O ultrassom produz resultados em tempo real, sem a necessidade de qualquer pós-processamento, necessitando de acesso a apenas uma superfície do material para realizar a inspeção. Porém, a geometria e a condição superficial dos corpos de prova impedem o acoplamento ideal entre o transdutor e a superfície das juntas e, conseqüentemente, uma varredura contínua por contato direto; adicionalmente, um maior refino dos limiares estabelecidos para o critério de aceitação ainda é necessário (*i.e.* eliminar a região de transição e identificar os limites de detecção da técnica), o que pode ser realizado comparando-se mais resultados de ultrassom e microCT na inspeção deste material.

A microtomografia, por se tratar de uma técnica de alta resolução, permite identificar com segurança as diferentes regiões presentes na estrutura da junta; exemplo disto são os resultados apresentados para a amostra A (sem defeitos), na qual a técnica foi capaz de quantificar a porosidade inerente ao material, assim como para as amostras

com falta de adesão, na qual o ultrassom não foi capaz de detectar o defeito existente de falta de adesão, a microCT detectou claramente. No entanto, a microtomografia não produz resultados em tempo real, exigindo a dedicação de certo tempo no pós-processamento dos dados. Adicionalmente, há a dificuldade para transportar esta tecnologia para ensaios de campo, visto que é necessário um microtomógrafo portátil e que todos os lados da amostra estejam acessíveis durante o ensaio.

## 4 CONCLUSÃO

A microtomografia foi capaz de identificar e quantificar os defeitos tipicamente encontrados em juntas adesivas (falta de adesão e falta do adesivo) aplicado na união destas juntas, apresentando uma alta resolução nos resultados gerados. Porém, sua aplicação em campo depende de um microtomógrafo portátil e acesso a ambos os lados da amostra.

O ultrassom, por sua vez, detectou os defeitos estudados, apresentando uma maior dificuldade na detecção do defeito de falta de adesão. É uma técnica indicada para as inspeções de campo, porém, ainda necessita de maior refino sobre os critérios de aceitação adotados, o que pode ser realizado futuramente através da comparação entre seus resultados e os resultados gerados pela técnica de microCT.

A combinação das técnicas de ultrassom e microtomografia mostrou-se promissora na inspeção de defeitos em juntas adesivas afim de determinar qualitativa e quantitativamente o risco oferecido a estrutura visto que o ultrassom permite a realização do ensaio em campo e a microtomografia possui elevada confiabilidade qualitativa e quantitativa dos defeitos: falta de adesão e falta de adesivo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Petrobras, do LNNano, da CAPES, do CNPq e da Faperj.

## REFERÊNCIAS

- 1 Oliveira, D.F. *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; 2010.
- 2 Souza, M.P.V. *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; 2014.
- 3 Fontes, A.V., Machado, A.C., Machado, A.S., Lopes, R.T., Lima, I., Pereira, G.R., “Non-destructive inspection using 3D microtomography of adhesive joints on composite pipes”, In: European Conference on X-ray spectrometry (EXRS), Bologna, 2014.
- 4 SKYSCAN, 2011a. *SkyScan 1173 User Guide*. Fonte: <http://www.skyscan.be>
- 5 SKYSCAN, 2011b. *NRecon User Guide*. Fonte: <http://www.skyscan.be>
- 6 SKYSCAN, 2013a. *The user's guide CT-Analyser*. Fonte: <http://www.skyscan.be>
- 7 SKYSCAN, 2013b. *Morphometrics Parameters in CT-Analyser*. Fonte: <http://www.skyscan.be>.