COPPE UFRJ
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

ESTUDO DA TÉCNICA DE RADIOGRAFIA DIGITAL TANGENCIAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS EM DUTOS COM ISOLAMENTO

Bruno Bejarano Bazi

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

Orientador: Davi Ferreira de Oliveira

Rio de Janeiro
Outubro de 2023

ESTUDO DA TÉCNICA DE RADIOGRAFIA DIGITAL TANGENCIAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS EM DUTOS COM ISOLAMENTO

Bruno Bejarano Bazi

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

Examinada por:

_____
Prof. Davi Ferreira de Oliveira

_____
Prof. Ricardo Tadeu Lopes

_____
Profª Gabriela Ribeiro Pereira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2023

Bazi, Bruno Bejarano

Estudo da Técnica de Radiografia Digital Tangencial para o Dimensionamento de Defeitos em Dutos com Isolamento / Bruno Bejarano Bazi. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

X, 52 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Davi Ferreira de Oliveira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 53 – 56.

1. Radiografia Digital Tangencial. 2. Inspeção de Dutos com Isolamento. 3. Defeitos de Corrosão. 4. Radiografia Industrial.

I. Oliveira, Davi Ferreira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Estudo da Técnica de Radiografia Digital Tangencial para o Dimensionamento de Defeitos em Dutos com Isolamento.

Dedico este trabalho aos meus pais, Elzira Bazi e Porfírio Bejarano.

AGRADECIMENTOS

É incabível, neste pequeno trecho de agradecimentos, a gratidão que tenho pelo imenso suporte que minha família sempre me forneceu para que eu pudesse realizar meu sonho de estudar. Agradeço aos meus pais, Porfirio e Elzira, que são minha fortaleza para todos os assuntos, me proporcionando sempre perspectivas muito positivas, mesmo quando por algum motivo ocasional, estudar ou ser pesquisador não parecesse um caminho viável. Aos meus irmãos, Felippe, Scarlet e Michel, por cada vez que quando eu mais precisava, não hesitavam em me ligar para saber como eu estava ou como poderiam me ajudar, especialmente a Scarlet. Agradeço por ter em minha família, não apenas pais e irmãos, mas também meus melhores amigos.

Aos meus amigos, pelas diversas mensagens de apoio, dicas, sugestões e quaisquer formas que poderiam utilizar para me animar a continuar e não desistir de seguir estudando.

As pessoas incríveis que conheci no Laboratório de Instrumentação Nuclear, as quais me ajudaram não só com este trabalho, mas para além disso, compartilhando de suas vastas experiências de pesquisadores e de vida. Também agradeço pelos ótimos momentos de descontração que me proporcionaram trabalhando ou na hora do cafezinho. Portanto, muito obrigado: Olga, Soraia, Alessandra, Aline, Carlos Augusto, Osmar, André, Andreia, Zé Lopes, Otacílio e todos os demais que conheci durante o período que passei no LIN.

Aos amigos de pós-graduação que também trabalhavam no laboratório, Ana Paula, Clarissa, Eduardo, Gabriel, Isis, Luan, Renan, Marcus, Caio e Anderson.

Ao meu orientador Davi, por todo o conhecimento que me passou, me tirando todas as dúvidas que tinha de trabalho e curso de mestrado, sendo sempre muito solicito. Muito obrigado Davi, e saiba que vejo em você minha inspiração profissional.

Ao chefe do Laboratório, Ricardo Tadeu Lopes, por todas as oportunidades que me proporcionou, de trabalho e pesquisa, e que com toda certeza auxiliaram no crescimento e desenvolvimento do meu conhecimento, sobre a área nuclear, indústria e trabalho de equipe.

“Todos os caminhos levam a morte. Perca-se!” – Jorge Luis Borges

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 TÉCNICA DE RADIOGRAFIA DIGITAL TANGENCIAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE DEFEITOS EM DUTOS COM ISOLAMENTO

Bruno Bejarano Bazi

Outubro/2023

Orientador: Davi Ferreira de Oliveira

Programa: Engenharia Nuclear

A identificação da degradação de uma tubulação por mecanismos de corrosão é uma tarefa que já é feita na indústria utilizando diferentes técnicas não destrutivas. Neste trabalho é abordada a técnica de Radiografia Digital Tangencial para a identificação e medição de defeitos de corrosão presentes em tubos de aço, com o objetivo de determinar quais os fatores geométricos dos defeitos são limitantes em uma detecção de corrosão e determinação da espessura de parede perdida. Foram realizados ensaios com dois grupos de tubos de aço diferentes. Os Corpos de prova (CPs) que compõem o grupo 1 têm defeitos localizados nas paredes internas dos tubos e foram fabricados com reparos por compósitos em fibra de vidro e resina polimérica na parede externa. Os CPs do grupo 2, que têm defeitos localizados na parede externa dos tubos, possuem mantas de isolamento térmico que recobrem o tubo de aço. Foram produzidas radiografias digitais usando a Técnica Tangencial para cada CP, conforme Norma ISO 20769-1. Em cada CP foram fabricados oito defeitos (entalhes), com dimensões e profundidades distintas. Para produzir as radiografias foi utilizado um detector flat panel DXR250U-W da GE, de 14 bits, uma fonte de raios X Eresco MF4 300 e também uma fonte de raios γ de Ir-192 com atividade de 34 Ci. Através de um gráfico de PoD/Hit Miss foi possível verificar limitações na detecção de defeitos que possuíam pequenas larguras e comprimentos, mas grandes profundidades e identificar também um possível limite de dimensões que são passíveis de detecção com precisão e outras que são invisíveis à técnica.

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 TANGENTIAL DIGITAL RADIOGRAPHY TECHNIQUE FOR THE SIZING OF DEFECTS IN INSULATION PIPES

Bruno Bejarano Bazi

October/2023

Advisor: Davi Ferreira de Oliveira

Department: Nuclear Engineering

The identification of the degradation of a pipeline by corrosion mechanisms is a task that is already done in the industry using different non-destructive techniques. In this work, the technique of Tangential Digital Radiography is approached for the identification and measurement of corrosion defects present in steel tubes, with the objective of determining which geometric factors of the defects are limiting in a corrosion detection and determination of the lost wall thickness. Tests were carried out with two groups of different steel tubes. The specimens (CPs) that make up group 1 have defects located on the inner walls of the tubes and were manufactured with repairs using fiberglass composites and polymeric resin on the outer wall. Group 2 CPs, which have defects located on the outer wall of the tubes, have thermal insulation blankets that cover the steel tube. Digital radiographs were produced using the Tangential Technique for each CP, according to ISO 20769-1. In each CP, eight defects (notches) were manufactured, with different sizes and depths. To produce the radiographs, a 14-bit DXR250U-W flat panel detector, an Eresco MF4 300 X-ray source and an Ir-192 γ-ray source with 34 Ci activity were used. Through a PoD/Hit Miss chart, it was possible to verify limitations in the detection of defects that had small width and length, but great depths and also identify a possible limit of dimensions that can be accurately detected and others that are invisible to the technique.

Keywords: Radiograph, Corrosion, Tangential Radiography, Digital Radiograph

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 9

3.1 Processo Radiográfico 9

3.1.1 Formação da Imagem Radiográfica 9

3.1.2 Interação Radiação Eletromagnética com a Matéria 10

3.1.2.1 Efeito Fotoelétrico 11

3.1.2.2 Espalhamento Compton 11

3.1.3 Radiografia Industrial 12

3.2 Radiografia Digital 12

3.2.1 Imagem Radiográfica Digital 13

3.2.2 Qualidade da Imagem 13

3.2.2.1 Resolução Espacial 14

3.2.2.2 Resolução em Contraste 14

3.2.3 Ruídos 15

3.3 Técnicas de Radiografia Digital 15

3.3.1 Radiografia digital tangencial 16

3.3.2 Análise de Radiografia Digital 17

3.3.2.1 Parâmetro de Medição do tipo *Step* Tubular 17

3.4 Curvas PoD 18

3.4.1 PoD/Hit Miss 19

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 22

4.1. Corpos de Prova 22

4.1.1 Software Isee! 24

4.3 Metodologia de Execução 24

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISES 28

5.1. Profundidade dos Defeitos dos CPs do Grupo I 28

5.2. Altura e Largura dos Defeitos dos CPs do Grupo I 30

5.3. Discussão dos Resultados do Grupo I 32

5.4. Profundidades dos Defeitos dos CPs do Grupo II 38

5.5. Discussão dos Resultados do Grupo II 40
5.6. Profundidades dos Defeitos dos CPs do Grupo II utilizando fonte de Ir-192 45
5.7. Discussão dos Resultados do Grupo II utilizando fonte gama de Ir-192..... 47

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES 52

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53

ANEXO A – Imagens das Medidas de Espessura Remanescente dos Defeitos dos CPs do Grupo I 57

ANEXO B – Imagens das Medidas de Altura e Largura dos Defeitos dos CPs do Grupo I 66

ANEXO C – Imagens das Medidas de Espessura dos Defeitos dos CPs do Grupo II – Com fonte de Raio X 74

ANEXO D – Imagens das Medidas de Espessura dos Defeitos dos CPs do Grupo II – Com fonte de Iridio-192. 87

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Avaliar a integridade e qualidade de uma estrutura que será utilizada na indústria é de suma importância, para garantir o bom funcionamento do sistema, equipamento ou material que será utilizado, durante a vida útil do mesmo. Para as boas práticas de garantia de qualidade, então, são utilizados métodos de análise desses produtos, dentre os quais, podemos citar os ensaios não destrutivos, devido a capacidade de avaliação no estágio final de produção e previamente ao início do uso do material.

Quando falamos de ensaios não destrutivos, estamos avaliando métodos que podem utilizar fontes de radiação e também métodos que não precisam de radiação. Exemplificando alguns métodos convencionais e de baixo custo, temos a inspeção visual, o uso de líquido penetrante ou partículas magnéticas, que são ENDs que não utilizam fonte de radiação e que trazem resultados excelentes, limitando-se ao fato de avaliarem a integridade do material apenas em sua superfície externa. Alguns exemplos de aplicações mais robustas de ENDs são a utilização de ultrassom, correntes parasitas ou termografia; e, quando se fala da aplicação de radiação ionizante, existe a radiografia convencional, radiografia computadorizada, radiografia digital e microtomografia (MicroCT).

Todas as ENDs tem a mesma finalidade, que é o estudo de qualidade do produto que está sendo inspecionando. As áreas de aplicação de END na indústria são vastas, pode ser aplicada na indústria naval, aeroespacial, energia nuclear, automobilística, metalúrgica, petróleo e gás, construção civil e ferroviária.

A radiografia Industrial aplicada como um END já é um nicho amplamente disseminado por todos os setores industriais anteriormente citados, e sua ampla escala de utilização é devido principalmente aos resultados positivos que tem demonstrado em todos os anos que vem sendo utilizada, desde seus primórdios.

Tendo em vista os bons resultados da utilização da radiografia na indústria, muitas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos, para ampliar seu espectro de utilização e assim, permitindo cada vez mais adentrar em variadas modalidades de inspeções imagináveis. Nesse aspecto, uma técnica de radiografia digital aplicada a indústria é a

técnica tangencial para determinação de defeitos de corrosão, que teve seus primeiros estudos no início do Século XXI (HARARA, 2003).

Embora os estudos apontassem excelentes resultados quanto a utilização da técnica de radiografia digital tangencial na medição de espessuras de parede em dutos de aço (HARARA, 2008), ainda havia a necessidade de comprovar sua aplicabilidade a partir de métodos estatísticos para estudos de confiabilidade. Com isso, estudos recentes trazem tais métodos estatísticos, como por exemplo, as curvas de PoD/HitMiss (Probability of Detection) aplicados em END. As curvas PoD/HitMiss apresentaram seus primeiros estudos em meados da década de 60, liderados por Georges Matheron e Jean Serra, da universidade de Mines ParisTech, na França (FRANCIS, 1998). Devido a essa importante contribuição estatística, quando aplicada aos END, é possível gerar uma avaliação de confiabilidade para as diversas técnicas conhecidas.

O conceito de PoD/HitMiss, aplicado à radiografia industrial é algo relativamente novo, ganhando espaço nas últimas décadas, devido a novas técnicas de inspeção usando a radiografia que vem sendo desenvolvidas ao longo dos anos (FRANCIS, 1998, ACHENBACH, 2000). Esta abordagem busca, basicamente – atrelar a dimensão geométrica: profundidade, largura ou comprimento da descontinuidade – com a sua detecção,

Neste trabalho é utilizada a radiografia industrial atrelada ao conceito de curvas de PoD/HitMiss, com o objetivo de determinar os defeitos detectáveis e suas dimensões onde a probabilidade de detecção a95 e a90/95 são mais prováveis.

No capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica para a compreensão do estado da arte atual.

No capítulo 3 é apresentado a fundamentação teórica necessária para a boa compreensão do trabalho realizado, desde a apresentação das principais interações radiação com a matéria para compreensão da radiografia, formação da imagem radiográfica, alguns conceitos de imagem digital (resolução espacial, contraste e ruído), técnica de radiografia digital tangencial e software de análise radiográfica utilizado. Também é apresentado a metodologia básica de produção de uma Curva PoD/HitMiss.

No capítulo 4 é apresentado todo o procedimento experimental para a realização do estudo. Os corpos de prova utilizados, a geometria de exposição tangencial, as fontes

de radiação utilizadas, os parâmetros de calibração (*step* tubular) para a aferição dos resultados.

No capítulo 5 e 6 são apresentados todos os resultados obtidos, discussões e conclusão.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No trabalho de HARARA (2003), é apresentada a técnica de radiografia tangencial com filmes radiográficos, utilizando Co-60 como fonte de raios γ. Foram utilizados dois tubos, o primeiro com 8” de diâmetro (219 mm) externo e espessura de parede de 18 mm e o segundo tubo com 12” de diâmetro (324 mm) externo e espessura de parede de 11 mm. Para cada tubo foram entalhadas 7 regiões na parte de dentro e 7 na parte de fora para simular defeitos de corrosão internos e externos. Cada região de entalhe possui 25 mm de comprimento e espessuras que variam de 0,3 mm à 0,9 mm da espessura da parede do tubo. As medidas realizadas nas radiografias foram comparadas com as medidas realizadas nos tubos após estes terem sido utilizados em testes destrutivos. Desta comparação foi obtida uma precisão de 96% na determinação de parede remanescente.

O estudo realizado por HARARA (2008), avalia a técnica de radiografia tangencial utilizando filmes radiográficos para a avaliação de deposição de sedimentos em tubos. Como corpos de prova para o estudo foram utilizados dois tubos fabricados em aço com degraus de 25 mm de comprimento cada e espessuras variando de 0,3 à 0,9 mm com incerteza de 0,1 mm nas espessuras dos degraus. Estes mesmos tubos tiveram sua parte interna preenchida por betumem e cimento, afim de simularem incrustações provenientes do transporte de óleo. A técnica tangencial foi aplicada para verificar as espessuras limites onde a energia de fontes de raios gama, como o cobalto 60 e o irídio 192 seriam capazes de realizar medições nos tubos. A técnica de radiografia tangencial, usando Co-60, foi aplicada com sucesso para detectar depósitos de betume e cimento em tubos e medir suas espessuras. Verifica-se que, ao aplicar a técnica de radiografia tangencial, a sensibilidade, a espessura mínima de detecção do depósito, está relacionada apenas pelo tipo de depósito e pela espessura do metal penetrado pela radiação na área tangencial seja qual for o diâmetro do tubo em teste. Isso ajuda a traçar uma curva padrão para a relação entre a espessura mínima detectável do depósito e a espessura do metal penetrado para cada tipo de depósito.

O trabalho que EWERT *et al.* (2016) realizou, apresenta o estudo da técnica de radiografia digital tangencial para monitoramento de defeitos de corrosão. No trabalho é utilizado como corpo de prova um tubo de 327 mm de diâmetro externo e 24 mm de espessura de parede, um detector DDA e uma fonte de Raios X betatron de 7.5 MeV de

energia, para a realização das radiografias. Neste trabalho é aplicada a reconstrução tomográfica como forma de avaliar a qualidade da detecção. Os resultados apresentados pela técnica de radiografia digital tangencial foram mais precisos quando comparados com a técnica de inspeção de parede dupla.

O trabalho de MISTY *et al.* (2008) investiga a precisão de um modelo de simulação radiográfica para imagens de dutos submarinos. Um conjunto de dados experimentais foi obtido e utilizado para ajustar parâmetros de simulação, visando adequar os resultados simulados aos experimentais. Descobriu-se que o modelo produz relações sinal-ruído correspondentes e a tendência correta de contraste-ruído. No entanto, foram encontradas diferenças no perfil da radiografia e nos valores do CNR. Uma possível causa das discrepâncias, sugerida pelo trabalho, é a dispersão de objetos na área de exposição experimental, que podem ter gerado um efeito de espalhamento. Como a dispersão Compton é o efeito dominante nas faixas de energia mais comum no espectro do betatron, que foi utilizado, isto significa que a contribuição da dispersão não colimada pode ter influenciado bastante. Simulações adicionais foram realizadas para testar esta possibilidade. Com este estudo foi identificado que a dispersão de objetos periféricos fora de configuração, tem um efeito significativo na imagem resultante, em particular reduzindo o contraste. Estes resultados mostram que a dispersão adicional de objetos que não foram incluídos no modelo provavelmente causou as diferenças encontradas na simulação e nos dados experimentais. A implicação é que, para uma modelagem precisa de um cenário de inspeção, uma área ao redor da configuração deve ser incluída no modelo para levar em conta a dispersão adicional. Uma alternativa sugerida pelo trabalho é calibrar o modelo utilizando um conjunto de dados experimentais da inspeção real que está sendo modelada. Contudo, continuarão a existir incertezas inevitáveis, especialmente nas interpretações baseadas na intensidade

Uma das aplicações das curvas PoD é no controle de qualidade de juntas soldadas (AMIRAFSHARI *et al.*, 2022). A qualidade de uma solda é frequentemente caracterizada pelo número de defeitos encontrados e seu tamanho. No entanto, esses fatores são dependentes da confiabilidade do END utilizado. Assim, uma curva PoD genérica predefinida apresenta certas limitações. No estudo de AMIRAFSHARI *et al.* (2022)., é proposto um método para estimar as curvas PoD com base no teorema bayesiano de probabilidade condicional. A aplicabilidade desse método é validada por meio da análise de um banco de dados existente, comparando tanto o método Bayesiano quanto o hit/miss.

Em geral, o PoD estimado pelo teorema bayesiano alinha-se com o modelo hit/miss. O modelo Bayesiano é aplicado para estimar o PoD, o tamanho real do defeito na solda e a frequência em dois estaleiros de construção naval. As estimativas de tamanho do defeito na solda e os modelos de frequência fornecem insights valiosos para a avaliação da confiabilidade em relação à fadiga e fratura de navios e estruturas offshore. Como resultado deste trabalho, foi observado que com a aplicação dos métodos de confiabilidade, evidenciou-se que um dos estaleiros apresenta uma qualidade superior de soldagem.

No trabalho (XU *et al.*, 2018) é apresentado uma avaliação dos perfis de espessura de parede utilizando um tubo de aço teste com 9 espessuras de parede diferentes. O estudo utilizou algumas energias de raio X e diferentes materiais como filtros, tanto no tubo de raio X quanto entre o objeto e o detector. Com o objetivo de identificar a influência de diferentes qualidades de radiação na precisão da avaliação automatizada da espessura de parede, levando em consideração a espessura da parede penetrada do tubo de aço. Foi comparado os resultados da análise de imagens em três aspectos: 1. Influência do tempo de exposição. 2. A variação da Energia da fonte de raios X. 3. A influência do filtro do feixe (na porta do tubo e entre o objeto e o detector). Foi identificado que para a utilização de fonte de raios X de 600 kV e filtro de Sn de 3 mm; tubos de aço de até 8 mm de espessura e diâmetro externo de 148 mm podem ser inspecionados pela radiografia tangencial. Para valores de energia inferiores a este e menores espessuras de filtro, a qualidade da inspeção fica comprometida, principalmente pela falta de capacidade de determinar a borda da parede interna do tubo na radiografia tangencial, gerando assim valores imprecisos ou não mensuráveis.

Neste estudo (PRASETYO *et al.*, 2020) testou-se a TRT (técnica de radiografia tangencial) usando uma fonte de raios-X, que tem boa controlabilidade (ou seja, intensidade e tempo de exposição) em um tubo de aço com degraus e entalhes em seus degraus que simulam pites de corrosão. Os pesquisadores focaram na comparação nas medições de densidade dos filmes e para isso utilizaram um medidor de densidade e um medidor de luz. A magnificação do diâmetro do pite de corrosão foi usada para obter uma equação para pequenos diâmetros de tubos (isto é, com diâmetro inferior a 50 mm). A tensão de trabalho foi variada (200, 230 e 260 kV) com a finalidade de gerar energias de raios-X apropriadas para medir várias profundidades dos pites (20, 40 e 60%, receptivamente) de um corpo de prova de tubular, de aço e entalhado (*stepped tube*). As

medições de densidade do filme usando os medidores, de densidade e de luz, mostraram resultados semelhantes; no entanto, o resultado da densidade do filme usando o medidor de densidade foi mais preciso. Os graus de ampliação (1,0123, 1,0254 e 1,0379) variaram em função da distância do ponto médio do alvo de raios-X (30, 60 ou 90 mm, respectivamente). Usando os resultados, uma equação linear com três variáveis foi obtida para determine o diâmetro real do *pitting*: 0,000385436a + 0,038350128b + 0,000467083c = d; onde o diâmetro real = diâmetro do filme/d. Verificou-se que alta tensão de trabalho produziu baixo contraste, alta definição e baixo espalhamento. Baixa tensão de trabalho produziu alto contraste, baixa definição e alto espalhamento. Com base nos resultados obtidos por este trabalho, é possível afirmar que os parâmetros mais apropriados para se conseguir a análise mais efetiva está na utilização de uma fonte de raio X operando em energia de pico de 260 kV.

A medição da espessura de parede de um tubo de aço é muito importante do ponto de vista de integridade estrutural. O método de radiografia tem uma vantagem devido à capacidade de penetrar no tubo isolado. Seja na radiografia convencional ou na radiografia digital, a técnica de radiografia tangencial (TRT) já é muito utilizada para a medição da espessura de parede remanescente. No caso de tubos com grandes diâmetros, a determinação da espessura máxima da parede penetrada deve ser levada em consideração. HAMZAH *et al.* (2007) realizou a derivação matemática da medição da espessura da parede com base em técnica de radiografia tangencial (TRT). No trabalho é utilizada uma abordagem matemática baseada no Teorema de Pitágoras e em princípios geométricos, para obter a equação de espessura máxima penetrada. Os resultados obtidos levaram a seguinte equação que determina a distância máxima penetrada (L_{max}) pela fonte de radiação, dada por: $L_{max} = 2W\sqrt{\frac{D_a}{W} - 1}$; onde D_a é o diâmetro externo do tubo e w a espessura do tubo.

No trabalho (LEWIS *et al.*, 1978), 60 inspetores membros da força aérea usaram a mesma técnica de correntes parasitas para inspecionar 41 rachaduras conhecidas ao redor de furos escareados de fixadores em um comprimento de 1,5 m de uma caixa de asa. Os resultados em termos de percentagem de detecção (ou seja, o número de vezes que uma fissura foi detectada em relação ao número de tentativas de detecção), mostraram que as chances de detectar as trincas aumentam com o tamanho da trinca, como seria de se esperar, mas nenhuma das trincas foi detectada 100% das vezes e diferentes trincas

com o mesmo tamanho têm porcentagens de detecção bastante diferentes. Foi então identificada que uma curva de probabilidade de distribuição de ‘log-odds’ se ajusta razoavelmente a esses dados e ilustra porque o PoD é considerado uma medida apropriada da capacidade de detecção.

BARTHOLO (2011), utilizou as curvas PoD com a finalidade de avaliar a confiabilidade para a técnica de ultrassom convencional. No trabalho (BARTHOLO, 2011) são inspecionadas soldas circunferenciais de tubos de aço com descontinuidades do tipo falta de fusão e penetração, e de dimensões variadas. Os dados obtidos da inspeção foram comparados com a importância através do procedimento ECA (*“engineering critical assestement”*). Constatou-se que a combinação da confiabilidade com a mecânica da fratura, permite determinar demiensões de defeitos que são admissíveis pelo ECA e que tem 90% de PoD.

A utilização de curvas PoD para a avaliação da confiabilidade de radiografias permite quantificar a qualidade dos ensaios radiográficos bem como expandir a aplicação da técnica para até seus limites de confiabilidade dentro de seu intervalo de confiança exigido.

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Processo Radiográfico

A radiografia consiste na técnica de formação de imagem a partir da interação da radiação com um material atenuador, o qual se busca analisar, e um outro material sensível a radiação (detector). Da interação da radiação com o atenuador (Corpo de prova), os fótons resultantes que atravessaram o material atenuador irão interagir com o material sensível a radiação e nele serão absorvidos parcial ou totalmente. A este processo atribuímos o nome de radiografia (CARTER *et al.*, 2010).

3.1.1 Formação da Imagem Radiográfica

A formação da imagem radiográfica pode ser obtida por alguns métodos distintos. Existe a radiografia convencional, precursor dos processos de radiografia industrial e com resultados muitos importantes para aplicação na indústria, este tipo de radiografia consiste na utilização de filmes radiográficos, compostos de placas poliméricas planas com uma fina camada de brometo de prata, que são sensibilizados pela radiação e então produzem uma imagem (BAZI *et al.*, 2022, CHAVERRI *et al.*, 2017). Também há a radiografia computadorizada, que utiliza placas de imagem radiográficas (image plates). Estas placas são feitas de compostos cristalinos que têm a capacidade de armazenar energia quando expostos à radiação ionizante, como raios X. A estrutura básica dessas placas de imagem consiste de uma camada de cristais incorporados em uma base transparente. Quando a placa é exposta à radiação durante um procedimento radiográfico, os cristais absorvem a energia da radiação, criando regiões foto estimuladas que retêm a informação da exposição. Posteriormente, para obter a imagem radiográfica, a placa de imagem é colocada em um scanner específico para radiografias computadorizadas. Nesse scanner é realizado o processo de leitura. O processo de leitura consiste de um laser ou luz visível para estimular os cristais, fazendo com que eles liberem a energia armazenada na forma de luz. Um detector converte essa luz em sinal elétrico, que é então digitalizado para criar a imagem radiográfica (CARTER *et al.*, 2010, KNOLL, 2000).

Por último existe a radiografia digital, que é a tecnologia mais avançada no que concerne a radiografia; consistindo da utilização de um detector digital conectado a um computador, onde este detector é sensibilizado pela radiação e transmite a interação da

radiação com o material foto sensível do detector para o computador. Esta sensibilização pode ocorrer de forma direta ou indireta. Para os detectores digitais de conversão indireta (detectores cintiladores), a radiação incidente é convertida em luz por meio de uma camada de fósforo. Essa luz é, então convertida em sinais elétricos para criar uma imagem digital. No detector de conversão direta, a radiação incidente é convertida pelo material do detector em sinais elétricos eliminando a necessidade de uma camada intermediária, como no caso do detector de silício amorfo.

3.1.2 Interação Radiação Eletromagnética com a Matéria

Para entender melhor o conceito de formação da imagem radiográfica, é necessário conhecer alguns dos tipos de interação da radiação com a matéria, como o efeito fotoelétrico e o efeito Compton. Estes são os principais efeitos que influenciam na imagem radiográfica. O efeito de espalhamento Compton ocorre com maior probabilidade em situações de interação de fótons de energias médias entre1 MeV e 5 MeV, com os orbitais atômicos. Este tipo de interação tem um efeito negativo na formação da imagem radiográfica, produzindo ruído e por consequência, causando uma baixa qualidade na imagem produzida para os algoritmos computacionais interpretarem (CARTER *et al.*, 2010).

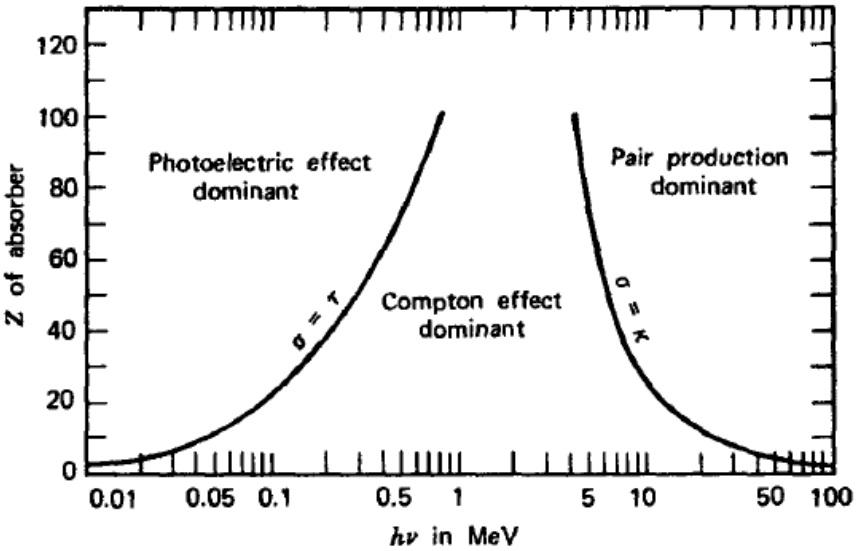


Figura 3.1: Relação interação radiação com a matéria para Número atômico(Z) x Energia (hv). Adaptado de KNOLL (2000).

3.1.2.1 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um fenômeno em que elétrons são ejetados de um material quando este é exposto à radiação eletromagnética. Os fótons incidentes colidem com o material, transferindo energia suficiente para liberar elétrons da camada mais interna do átomo. Esta vacância rapidamente é preenchida por um elétron de uma camada mais energética do átomo, emitindo um fóton com a energia excedente e retornando então para um nível de energia inferior.

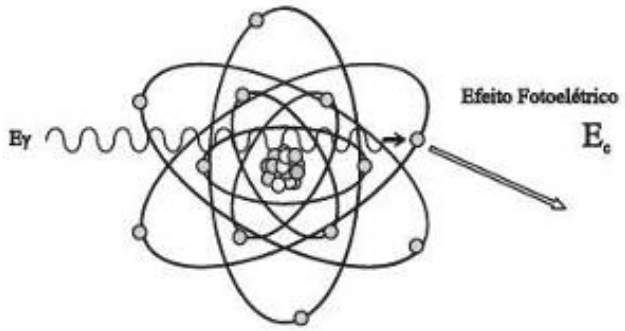


Figura 3.2: Representação do Efeito Fotoelétrico em um átomo. Adaptado de KNOLL (2000).

3.1.2.2 Espalhamento Compton

No espalhamento Compton um fóton incidente colide com um elétron, resultando na alteração do comprimento de onda e na mudança de direção do fóton incidente. O fóton de uma fonte de raio X é desviado de sua trajetória, podendo interagir com outros átomos e sofrer outras colisões semelhantes (KNOLL, 2010). Ao final dessas interações o fóton não está mais em trajetória retilínea. A consequência deste efeito, na radiografia, é uma má interpretação das diferenças de densidade do material que foi radiografado.

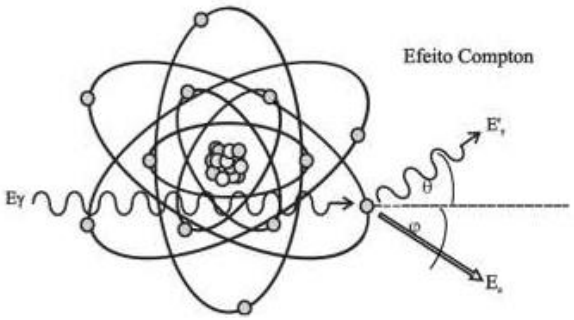


Figura 3.1: Representação do Espalhamento Compton. Adaptado de KNOLL (2000).

3.1.3 Radiografia Industrial

A radiografia industrial é uma técnica de Ensaio Não Destrutivo (END), que permite avaliar a integridade e qualidade de um equipamento ou material, após, durante ou antes de seu uso em determinado serviço para o qual foi projetado (ASNT, 2021). A técnica consiste na utilização de uma fonte de radiação, um material atenuador (objeto que se busca inspecionar) e um detector (filme radiográfico convencional, placas de imagem ou detector digital). A técnica de radiografia é empregada nos setores, aeroespacial, petroquímico, construção naval, setor automotivo, nuclear, etc. (RUMMEL *et al.*, 2010)

3.2 Radiografia Digital

A radiografia digital consiste na utilização de uma fonte de radiação, um detector e um corpo de prova a ser radiografado (RUMMEL *et al.*, 2010, XU *et al.*, 2018).

A utilização da RD permite obter resultados acerca da estrutura física do material inspecionado tanto internamente quanto externamente e de forma rápida (BAZI *et al.*, 2022). A RD industrial é amplamente utilizada, tanto na indústria como na radiologia médica. Na indústria, sua ampla utilização é devido aos seus resultados eficazes na identificação de trincas, porosidades, corrosões, incrustações, entre outras descontinuidades. Existem dois tipos de radiografia digital, a RD por conversão indireta, que consiste na absorção da radiação por um material cintilador, que é parte do detector e que posteriormente converte esta energia em luz e a luz produzida é detectada por uma região de CCD (charged Coupled device) para depois ser convertida em sinal elétrico que é enviado para o computador para o processamento da imagem (CARTER *et al.*, 2010). Existe também A RD por conversão direta, que se resume em conversão direta da energia da radiação que interage com o material do detector, como por exemplo, um arranjo de TFT (Thin Film Transistors), que converte a radiação incidente em sinal elétrico que é enviado ao computador para o processamento e visualização da imagem formada (CARTER *et al.*, 2010).

3.2.1 Imagem Radiográfica Digital

Após a obtenção da radiografia digital, cabe a análise da imagem produzida e para tal é necessário que se tenham os requisitos adequados para poder avaliar a imagem e ter uma análise conclusiva. Estes requisitos mínimos podem ser, contraste, resolução espacial, ruído, níveis de cinza, etc.

3.2.2 Qualidade da Imagem

Quando um feixe de raios X ou raios gama atinge qualquer objeto, parte da radiação é absorvida, parte é espalhada e parte passa diretamente (Figura 3.4). Os elétrons dos átomos que constituem o objeto espalham a radiação em todas as direções. Os comprimentos de onda de grande parte da radiação são aumentados pelo processo de espalhamento e, portanto, a dispersão tem comprimento de onda mais longo e é um pouco mais suave, ou menos penetrante, do que a radiação primária não espalhada. Qualquer material – seja amostra, cassete, mesa, paredes ou piso – que receba radiação direta é uma fonte de radiação espalhada. A menos que sejam tomadas medidas adequadas para reduzir os efeitos do espalhamento, haverá redução do contraste em toda a imagem ou em partes dela. O espalhamento causa uma não uniformidade na distribuição de densidade. A dispersão da radiação ocorre e é um problema na radiografia tanto com raios X quanto com raios gama (BOSSI, 2002). A qualidade da imagem radiográfica é de suma importância para poder gerar um resultado fidedigno do que se está inspecionando e para tal, algumas exigências devem ser cumpridas [ISO 17636-2, 2013, ISO 20769-1].

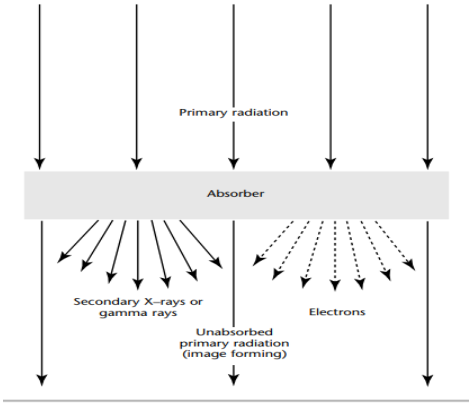


Figura 3.4: Interação radiação com a matéria. Espalhamento, absorção e radiação não absorvidos. Adaptado de KNOLL (2000).

3.2.2.1 Resolução Espacial

A resolução espacial é um dos fatores cruciais que determinam a qualidade de uma imagem digital. Ela se refere à mínima distância entre dois pontos distintos na imagem que podem ser claramente identificados (OLIVEIRA, 2010). Em imagens radiográficas, vários elementos podem influenciar essa resolução, levando à degradação do sinal e resultando em uma imagem menos nítida, fenômeno conhecido como desfocagem geométrica. A quantificação dessa resolução é geralmente expressa pela curva de MTF (Curva de Transferência de Modulação). Esta curva representa a relação entre as intensidades de entrada e saída das modulações. Em essência, a MTF ilustra a capacidade dos sistemas de aquisição de imagem de produzir contraste com base no detalhe ou resolução espacial do objeto em estudo (HALMSHAW, 1995, SESSIM, 2015). Outra forma de identificação da resolução espacial é utilizando os métodos diretos como padrões de furos e barra. Especificamente em uma imagem digital obtida com a utilização de Fósforo foto estimulante, a SRb (Resolução Espacial Básica) está atrelada a uma série de fatores que contribuem para a degradação do sinal, o que implica na perda de definição na imagem gerada e, entre eles, podem ser destacadas as limitações físicas impostas pela composição do material, a espessura dos cristais das placas de imagem radiográfica, o tamanho finito do diâmetro do foco do laser incidente na camada dos cristais, o atraso temporal do processo de luminescência e seu espalhamento (HALMSHAW, 1995).

3.2.2.2 Resolução em Contraste

O contraste é função da espessura e da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto, e pode ser dividido em dois tipos, contraste sujeito e contraste imagem (HALMSHAW, 1995). O contraste representa uma medida de diferenciação entre dois pontos da imagem. Alguns parâmetros são importantes para se obter uma boa resolução em contraste, tais quais, a composição química das amostras, qualidade do detector (filme, placas ou detector digital), o espectro de energia do feixe de raios X, se há ou não radiação de espalhamento, entre outros. Apesar dos vários parâmetros condicionadores da resolução em contraste, geralmente, o que tem mais influência no resultado final é a tensão, devido ao fato de a tensão controlar a capacidade de penetração do feixe primário no corpo. Quanto maior o kV, maior a energia do feixe e a sua penetração no corpo, sendo que menor será a diferença entre a intensidade de fótons

provenientes das várias densidades do corpo inspecionado, produzindo assim menor variação na atenuação (HALMSHAW, 1995). O aumento da tensão provoca, também, aumento da energia e quantidade de raios X que chegam ao detector, causando aumento de densidade radiográfica.

3.2.3 Ruídos

O ruído na imagem tem principalmente dois fatores importantes: o ruído estatístico ou ruído quântico de raios X, que é proveniente da forma aleatória que os fótons são distribuídos na formação da imagem e o ruído estrutural que resulta principalmente da não uniformidade dos pixels do DDA – *Digital Detector Array* – (OLIVEIRA, 2010). O nível de ruído em uma imagem é quantificado pela relação entre o desvio padrão e a média das intensidades em uma região homogeneamente exposta da imagem. Para que um detalhe seja discernível na imagem, seu contraste precisa superar o nível de ruído presente. Um ruído reduzido é essencial para garantir imagens de alta qualidade com doses de exposição aceitáveis, especialmente quando o objetivo é identificar pequenos objetos com contraste sutil. A intensidade desse ruído pode ser ajustada por meio da corrente (SESSIM, 2015). O ruído, então, pode ser avaliado através da Relação Sinal-Ruído (SNR) que fornece uma estimativa da proporção do ruído frente o sinal da imagem (SNR = sinal / ruído). A SNR é então utilizada para descrever a relação entre a amplitude do sinal e o tamanho do ruído. Quanto maior for a razão SNR maior a qualidade de visualização de detalhes na imagem, pois menor será o ruído presente (SESSIM, 2015).

3.3 Técnicas de Radiografia Digital

Na indústria existem diversas técnicas de arranjo do sistema: Fonte de radiação, Objeto a ser inspecionado e detector, que podem ser utilizadas para produção de uma radiografia, distinguindo-se umas das outras pela finalidade do processo. Para avaliação de defeitos de solda, descontinuidades de um material ou equipamento, existem técnicas como a radiografia PDVD e a PDVS (BAZI *et al.*, 2022), que são muito aplicadas para inspeção de solda de tubos de aço. Assim como, as aplicadas em placas planas, como a PSVS (CHAVERRI-QUIROS *et al.*, 2017).

3.3.1 Radiografia digital tangencial

A técnica de RD Tangencial é utilizada quando há necessidade de mensurar a espessura de parede perdida em algum objeto cilíndrico (HARARA, 2003, EWERT, 2016). Esta técnica pode ser utilizada para medir espessura de corrosão em tubos de aço. Para aplicação da técnica é importante montar um *setup* adequado, de forma que a RD permita medir da melhor maneira possível a espessura de parede perdida (ISO 20769-1, 2018). Este *setup* adequado é apresentado nas Figuras 3.5 e 3.6.

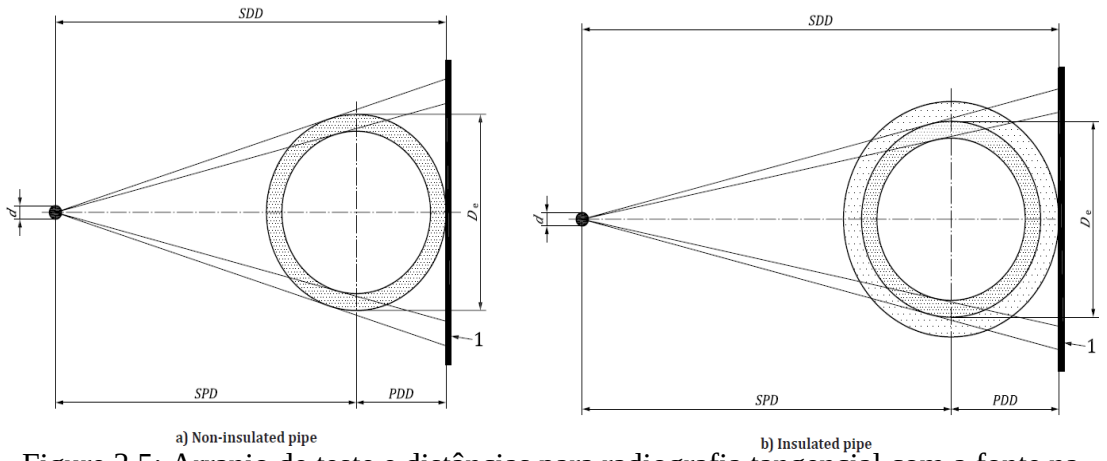


Figure 3.5: Arranjo de teste e distâncias para radiografia tangencial com a fonte na linha central do tubo. Adaptado de ISO 20769-1 (2018).

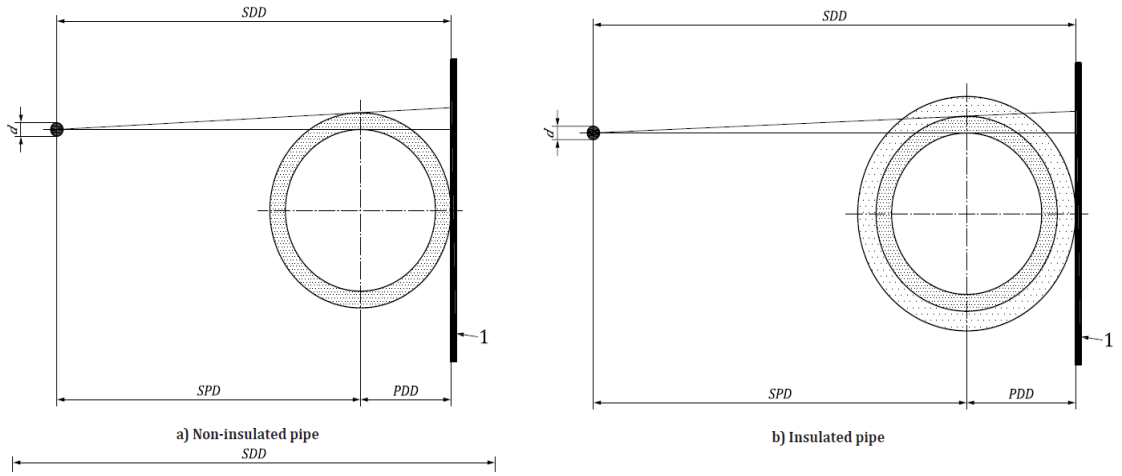


Figure 3.6: Arranjo de teste e distâncias para radiografia tangencial com a fonte deslocada da linha central do tubo. Adaptado de ISO 20769-1 (2018).

Ambos os arranjos (Fig. 3.5 e 3.6) podem ser utilizados, observando que para o arranjo da Figura 3.5, é possível obter a imagem tanto da tangente superior quanto a inferior. No entanto, para tubos de grandes dimensões o arranjo da Figura 3.6 é mais comumente utilizado, devido ao fato de apenas uma tangente do tubo caber na região do detector. Depois de escolhido o arranjo que será utilizado para a realização da técnica, é imprescindível que seja calculada a espessura máxima penetrada para que seja possível determinar qual será a fonte de radiação mais adequada para a aplicação da técnica. A expressão da espessura máxima penetrada é dada pela equação (3.1):

$$W_{max} = 2\sqrt{t(D_e - t)} \tag{3.1}$$

Onde **t** é a espessura nominal do tubo e $\mathbf{D_e}$ é o diâmetro externo do tubo.

3.3.2 Análise de Radiografia Digital

A análise da RD vai depender da técnica utilizada, ou seja, para cada técnica serão utilizadas informações de imagem distintas. Em uma radiografia digital podem ser avaliados, parâmetros de qualidade de imagem, como por exemplo: Contraste, Resolução espacial básica, ruído, etc (CARTER *et al.*, 2010). Estes parâmetros são identificados em softwares de análise de imagem radiográfica. O processamento de imagens radiográficas é especialmente utilizado para melhorar a qualidade da imagem, facilitando o processo de análise, que consiste em detectar e classificar defeitos na imagem radiográfica. No método convencional a análise é feita exclusivamente pelo inspetor de raios X, que avalia o filme radiográfico (CHAVERRI-QUIROS *et al.*, 2017). Os avanços na ciência da computação e nas técnicas de inteligência artificial têm permitido que a classificação de defeitos seja realizada por meio de ferramentas de reconhecimento de padrões (GONZALEZ *et al.*, 2018, LOPES, 2022).

3.3.2.1 Parâmetro de Medição do tipo *Step* Tubular

Quando a RD é realizada em tubos de aço em especial com a utilização da técnica Tangencial, para poder aferir as dimensões dos defeitos identificados, faz-se necessário a utilização de um parâmetro para calibração do sistema de detecção. Este parâmetro deve

ser tubular com degraus ou uma esfera, ambos de mesmo material do que se busca inspecionar. Estes parâmetros devem ter dimensões conhecidas. O parâmetro tubular com degraus deve ter suas dimensões dos degraus conhecidas e a esfera deve ter seu diâmetro conhecido. O conhecimento das dimensões é necessário para que o sistema radiográfico possa ser calibrado e então seja possível medir as dimensões dos defeitos detectados.

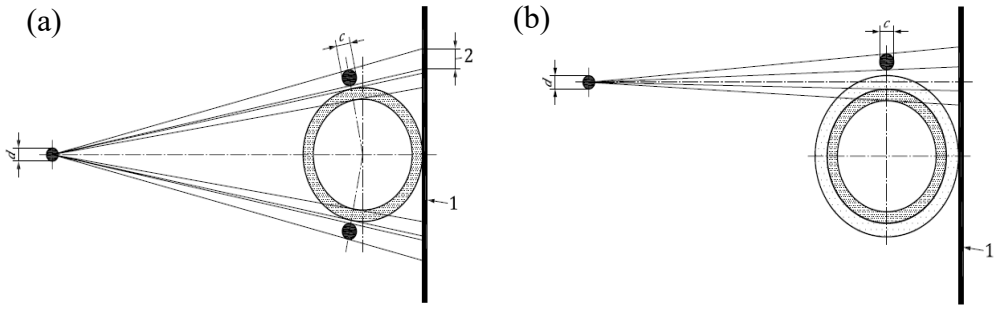


Figura 3.7: Radiografia tangencial e comparadores para calibração dimensional. (a) – sem isolamento; (b) – com isolamento). Adaptado de ISO 20769-1 (2018)

3.4 Curvas PoD

A confiabilidade de um ensaio não destrutivo (END) pode ser definido como "a probabilidade de detectar uma descontinuidade em um dado grupo de tamanhos, sob condições e procedimentos específicos" (GEORGIOU, 1999). Há outras definições parecidas, mas o cerne está no parâmetro estatístico existente, que é o PoD; é a medida formal aceita para quantificar a confiabilidade de um END. O PoD é comumente utilizado por uma função do tamanho da falha (isto é, comprimento ou profundidade), contudo, sendo também uma função de outros parâmetros físicos e operacionais, como o material, a geometria, o tipo de falha, o tipo de END, as condições do ensaio e o operador do ensaio como por exemplo: sua qualificação, educação e experiência (GEORGIOU, 1999).

Inspeções repetidas do mesmo tamanho de falha ou do mesmo tipo de falha não resultarão necessariamente em indicações consistentes de acerto ou erro. Portanto, há uma dispersão de resultados de detecção para cada tamanho de falha e tipo de falha e é precisamente por isso que a capacidade de detecção é expressa em termos estatísticos como o PoD (AMIRAFSHARI *et al.*, 2008). As funções PoD, para descrever a confiabilidade de um método ou técnica de END, têm sido objeto de muitos estudos e passaram por um desenvolvimento considerável desde o final dos anos 1960 e início dos

anos 1970, onde a maior parte do trabalho pioneiro foi realizada na indústria aeroespacial (AGARD LECTURE SERIES, 1993, RUMMEL, 2010).

A fim de garantir a integridade estrutural de componentes críticos tornava-se cada vez mais evidente que era mais apropriado, do ponto de vista da mecânica da fratura, identificar qual é a maior falha que pode não ser detectada, ao invés do menor defeito detectável. Nas últimas duas décadas houve um crescimento na aplicação de END nas indústrias e, portanto, viu-se necessário a adoção de métodos de confiabilidade com base em PoD. Em meados da década de 1980, a abordagem era assumir um modelo mais geral para o PoD x tamanho da falha. Várias análises de dados de experimentos de confiabilidade surgiram em métodos END.

3.4.1 PoD/Hit Miss

As curvas PoD são ferramentas para quantificar a confiabilidade de detecção de uma técnica de ensaio não destrutivo (END). Seus resultados buscam atrelar a probabilidade de detecção com a variabilidade de fatores que podem ser impostos em um ensaio, como por exemplo, a experiência de diferentes especialistas, calibração do equipamento, tipo de aparelho e posicionamento do objeto que se busca inspecionar.

A metodologia de análise de dados *Hit/Miss* se resume em avaliar o banco de dados das inspeções e atribuir às detecções o nome de *Hit* e aos defeitos não detectados o nome de *Miss*. Sendo assim, os defeitos detectados recebem o valor de 1 e os não detectados de 0. Desta discretização binária podemos então produzir uma tabela (Tabela 3.1)

Tabela 3.1: Dados de Análise Hit/Miss

Defeito	Hit/Miss	Largura do Defeito (mm)
1	0	1,2
2	1	4,3
3	1	3,5
...	...	...
100	0	1,8

A partir dos resultados hit/miss, podemos utilizar as Equações (3.2 e 3.3).

$$Hit: PoD(a) = 1 \tag{3.2}$$

$$Miss: PoD\ (a) = 0 \tag{3.3}$$

O resultado dessa inspeção pode ser ilustrado na Figura 3.9, onde é apresentado o gráfico de detecção e não detecção das descontinuidades. A expectativa razoável é encontrar uma relação de não detecção para defeitos com menores dimensões e maior probabilidade de detecção para defeitos de maiores dimensões. A figura 3.9 ilustra as regiões com defeitos que são indetectáveis (Região I) e defeitos sempre detectáveis (Região II). Além dessas duas regiões existe ainda uma terceira região, onde nesta, há probabilidade de que algum defeito nem sempre seja detectado (Região III).

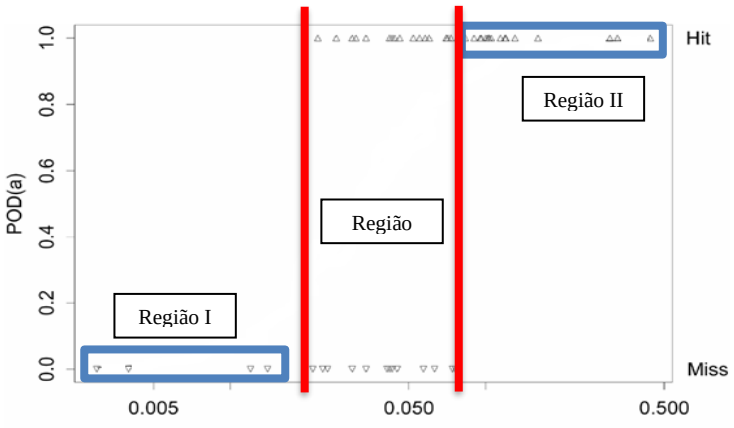


Figura 3.9: Regiões de detecção e não detecção [10]

Para os dados do tipo PoD/HitMiss verificou-se que a distribuição log-logística(log-odds) foi a que melhor se ajustou (ZHAO *et al.*, 2002, BARTHOLO, 2011, YEW-MENG, 2017). Sendo assim, a função que descreve essa distribuição é dada por:

$$PoD = \frac{e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{(\ln a - m}{\sigma}\right)}}{1 + e^{\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{(\ln a - m}{\sigma}\right)}} \tag{3.4}$$

Onde a é a largura do defeito, m é a média e **σ** é o desvio padrão (GEORGIOU, 1999).

Com a modelagem curva PoD para a análise hit/miss podemos verificar a curva de ajuste (Figura 3.10). A curva representa a confiabilidade dos resultados obtidos na

inspeção. A região pela qual o ajuste da função inicia é a de não detecção, crescendo até a região de completa detecção.

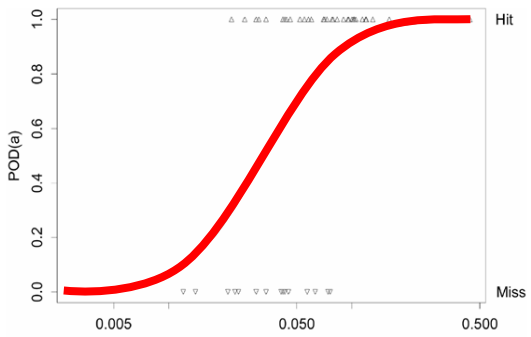


Figura 3.10: Curva PoD (análise hit/miss). Adaptado de YEW-MENG *et al.*, (2017).

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Corpos de Prova

Os CPs são constituídos por tubos em aço carbono e revestidos por reparos em material compósito ou isolamento térmico. Os mesmos são classificados em dois grupos, a saber: Grupo I e II. O conjunto de CPs que constitui o Grupo I foi fabricado com reparos por compósitos em fibra de vidro e resina polimérica na parede externa do tubo, conforme é descrito na Tabela 4.1. No tocante ao Grupo II, o corpo do tubo metálico foi coberto por mantas de isolamento térmico, conforme descrito na Tabela 4.2. Em cada CP foram usinados 8 defeitos: na parede interna ao tubo nos CPs do Grupo I e na parede externa ao tubo nos CPs do Grupo II. A Figura 4.1 mostra fotos dos CPs com reparo por materiais compósitos (Grupo I), que foram cortados ao meio para facilitar a usinagem dos defeitos. A Figura 4.2 mostra fotos dos CPs com isolamento térmico (Grupo II).

Tabela 4.1: CPs com reparo por materiais compósitos (Grupo I).

CP	**DN[1] (pol)**	**t[2] (mm)**	**Comprimento do tubo (m)**	**Tipo de reparo**	**Espessura do reparo (mm)**	**Comprimento do reparo (m)**	**N[3]**
1	8	8,2	2	Epóxi	6	1	8
2	8	8,2	2	PU	12	1	8
3	8	8,2	2	PU	6	1	8
4	8	8,2	2	Epóxi	18	1	8

Tabela 4.2: CPs com isolamento térmico (Grupo II).

CP	**DN[1] (pol)**	**t[2] (mm)**	**Comprimento do tubo (m)**	**Tipo de isolamento térmico**	**T_{iso}[4] (mm)**	**L_{iso} (m)**	**N[3]**
5	8	8,2	2	Silicato de Cálcio	38	2	8
6	8	8,2	2	Silicato de Cálcio	38	2	8
7	8	8,2	2	Silicato de Cálcio	25	2	8
8	8	8,2	2	Silicato de Cálcio	25	2	8

[1] Diâmetro nominal do tubo; [2] Espessura nominal do tubo; [3] Número de defeitos artificiais gerados para cada CP; [4]Espessura do isolamento térmico.

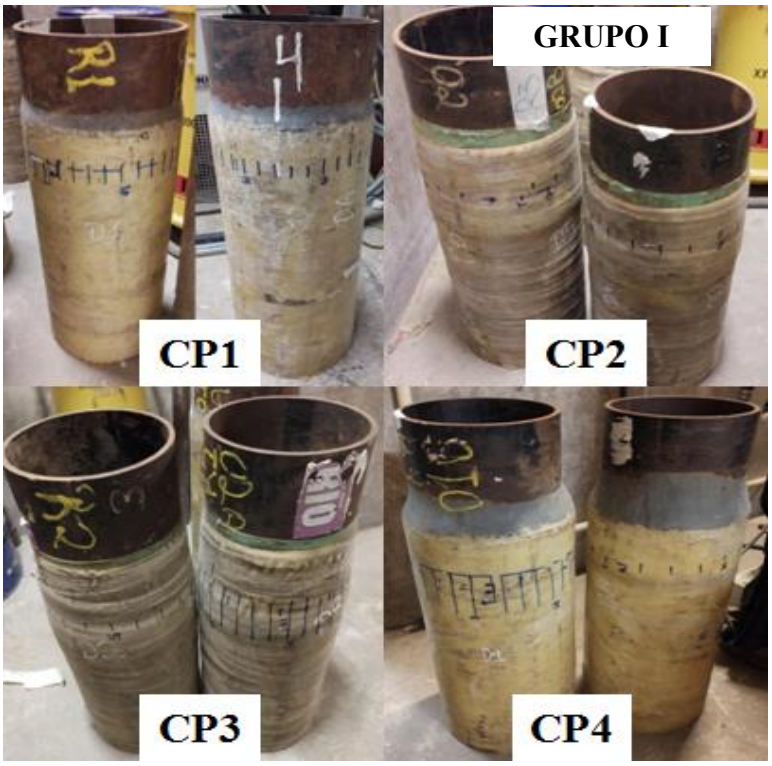


Figura 4.1: Fotos dos CPs com reparo por materiais compósitos – Grupo I.

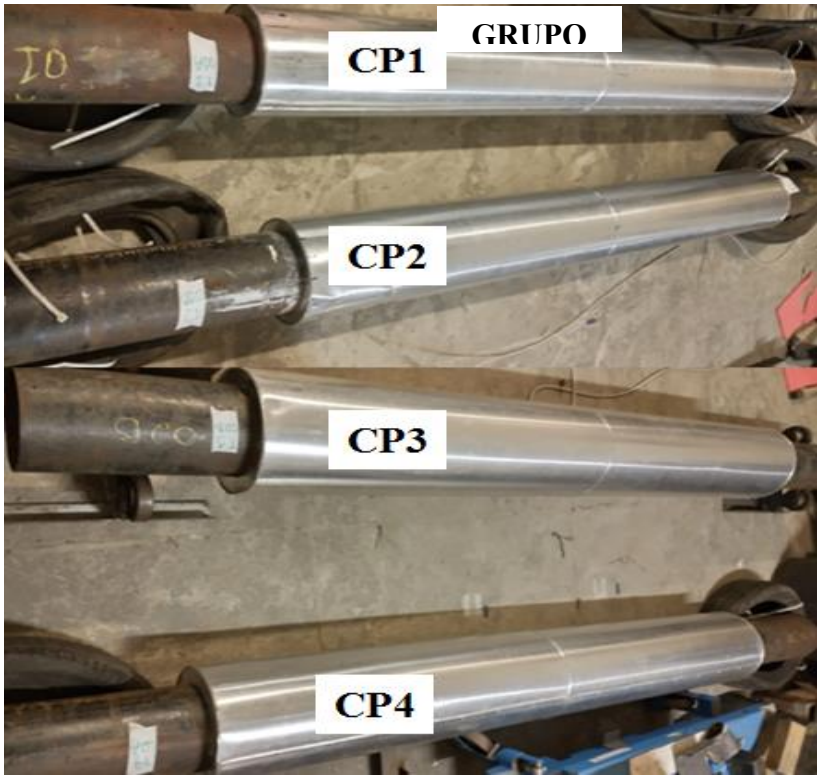


Figura 4.2: Fotos dos CPs com isolamento térmico – Grupo II.

4.1.1 Software Isee!

O Software Isee foi desenvolvido pela BAM (*Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung - Federal Institute for Materials Research and Testing*), com o propósito de realizar análises de imagens de radiografias industriais. Esta ferramenta pode ser utilizada em qualquer versão do Windows. Não é apenas um software de visualização de imagens, isso porque também carrega consigo algumas ferramentas que visam auxiliar na medição e documentação de radiografias industriais de alta resolução, para fins de estudo (SCHERPEL, 2023).

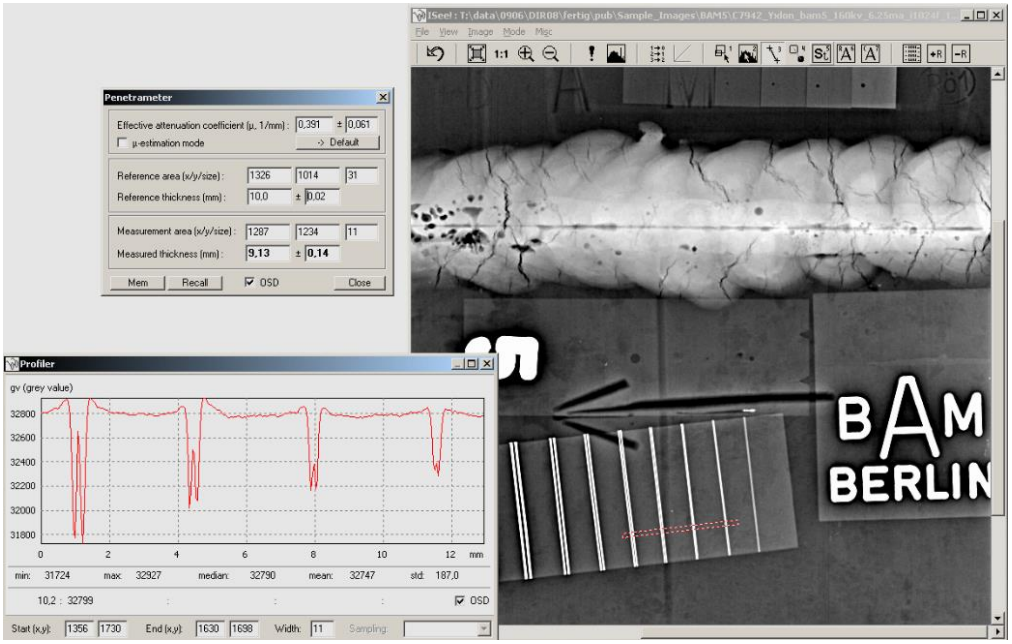


Figura 3.8: Software Isee!(BAM). Adaptado de SCHERPEL (2023)

4.3 Metodologia de Execução

Nos ensaios dos CPs do Grupo I foi utilizado fonte de Irídio-192, com atividade de 34 Ci e dimensão de 2,5 x 2,5 mm; detector DDA DXR250U-W (GE); distância fonte-detector de 1000 mm, com CP posicionado diretamente sobre o detector; e tempo de aquisição de 25 s e 5 *frames*, gerando um tempo total de aquisição de 125 s por imagem. A Figura 4.3 apresenta o esquema experimental para ensaios do Grupo I.

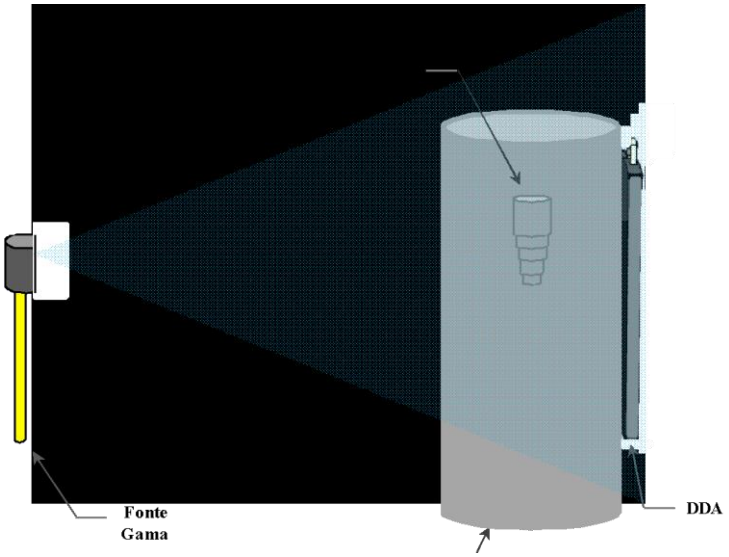


Figura 4.3: Setup experimental para ensaios do Grupo I.

Nos ensaios dos CPs do Grupo II foi utilizado equipamento de raios X Eresco 300 MF4-R (GE), com tamanho focal de 1,0 mm, operando com 290 kV de tensão, corrente de 0,5 mA e filtro de 5 mm de Cu; detector DDA DXR250U-W (GE); distância fonte-detector de 1000 mm, com CP posicionado diretamente sobre o detector; e tempo de aquisição de 1 s e 10 *frames*, gerando um tempo total de aquisição de 10 s por imagem. A Figura 4.4 apresenta o esquema experimental para ensaios do Grupo II.

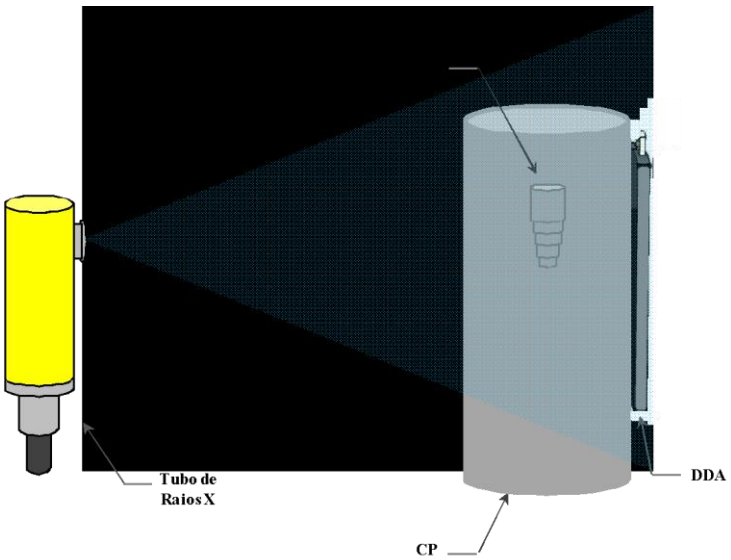


Figura 4.4: Setup experimental para ensaios do Grupo II.

Para ambos os grupos foram efetuadas um total de 8 radiografias por tubo, realizadas utilizando-se a técnica radiográfica tangencial, de acordo com a Norma de

referência (ISO 20769-1, 2018), conforme demonstrado na Figura 4.5. Como objeto padrão, para posterior medida de profundidade de defeito, foi utilizado um padrão S*tep* Tubular (Figura 4.6), cujas dimensões estão apresentadas na Tabela 4.3.

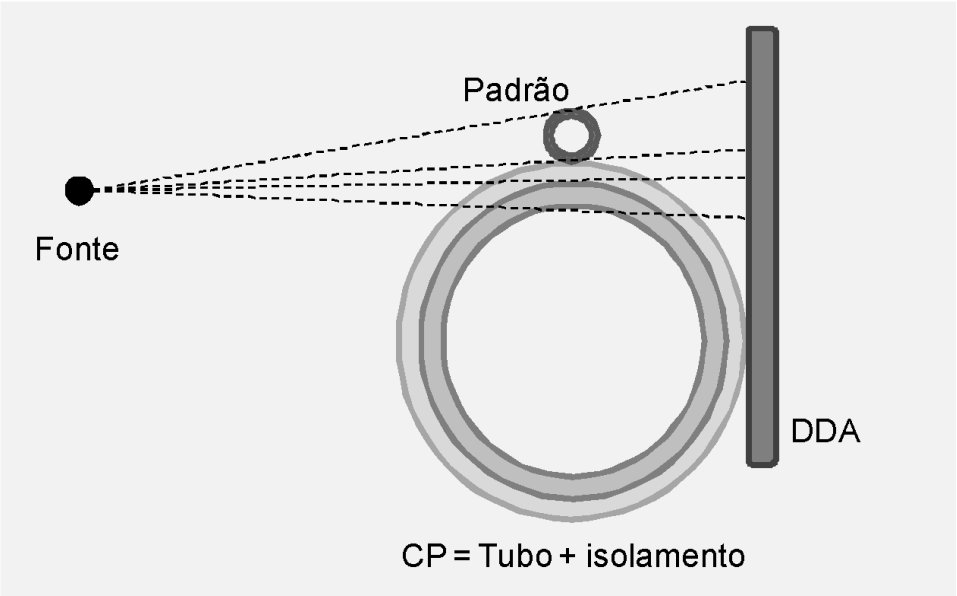


Figura 4.5: Esquema da vista superior da Radiografia Tangencial. Adaptado de ISO 20769-1 (2018).

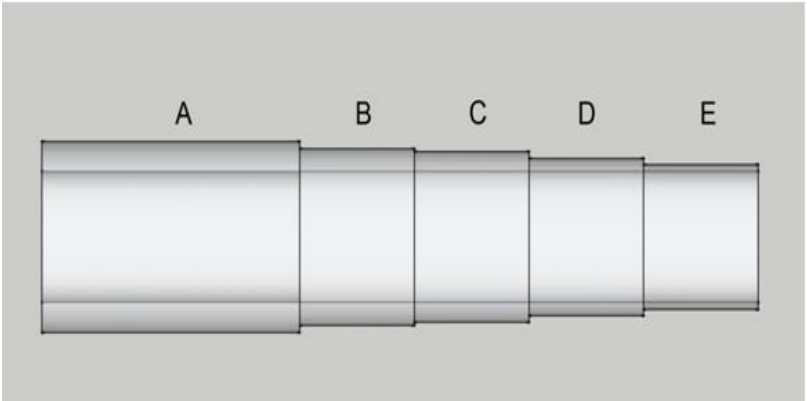


Figura 4.6. Esquema do Padrão *Step* Tubular utilizado na Radiografia Tangencial

Tabela 4.3. Dimensões do padrão *Step* Tubular utilizado.

Step	**Espessura (mm)**	**Diâmetro Externo (mm)**
A	4,25	27,0
B	3,25	25,0
C	2,80	24,1
D	1,85	22,2
E	1,00	20,5

Para a medida da profundidade do defeito, as imagens radiográficas dos tubos são analisadas no programa *Isee*! (BAM), onde um perfil de linha é traçado na imagem do padrão e, consequentemente, é feita uma calibração do tamanho de *pixel* da imagem, uma vez que o padrão tem dimensões conhecidas. Em seguida, um novo perfil de linha é traçado na região da descontinuidade para a medida de sua espessura. No caso dos CPs do Grupo I, primeiro mede-se a espessura remanescente do tubo e em seguida esse valor é subtraído da espessura de parede total, para determinação da profundidade do defeito. No caso dos CPs do Grupo II, essa profundidade é medida diretamente. A Figura 4.7 demonstra a medição de espessura remanescente, a partir da calibração da imagem pelo padrão.

Para avaliação da probabilidade de detecção da técnica radiográfica tangencial, os resultados encontrados foram comparados com as medidas efetuadas da confecção dos defeitos. Para os CPs do Grupo I, os defeitos, que eram internos ao tubo, foram dimensionados através de escaneamento 3D de moldes fabricados em equipamento de impressão 3D. Já os defeitos dos CPs do Grupo II, que eram externos ao tubo, devido a sua maior facilidade de confecção, são semelhantes entre si e, portanto, não foram submetidos ao escaneamento 3D. Na apresentação dos resultados, feita a seguir, esses valores estão denominados como “Valor Real”.

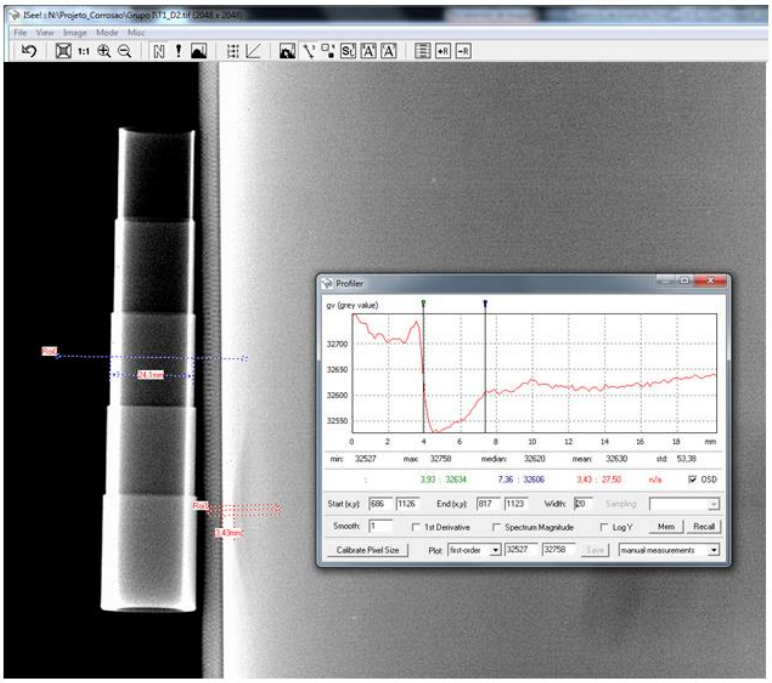


Figura 4.7: Demonstração da medida de espessura remanescente de parede do CP1- Grupo I, a partir da calibração da imagem pelo padrão

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISES

Neste item serão apresentados os resultados obtidos de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Para melhor entendimento, primeiramente serão apresentados os resultados alcançados a partir das radiografias digitais dos CPs do Grupo I, em seguida, das radiografias digitais dos CPs do Grupo II, em duas partes. Para o Grupo II foram realizadas radiografias com fonte de Raio X e fonte de Gama.

5.1. Profundidade dos Defeitos dos CPs do Grupo I

As Tabelas 5.1 a 5.4 apresentam os valores medidos por DDA da espessura remanescente e da profundidade de cada defeito dos CP1 a CP4 (Grupo I), respectivamente. Nelas constam também os valores das profundidades dos defeitos segundo a técnica Scanner 3D. As imagens das medidas de espessura remanescente dos defeitos encontrados pela técnica radiográfica tangencial estão apresentadas nas Figuras A1 a A18 do Anexo A.

A partir das imagens radiográficas digitais é possível observar ainda detalhes do reparo das amostras, inclusive a presença de defeitos nessa região, indicando que a técnica radiográfica tangencial também pode ser útil na avaliação do reparo em compósito.

Tabela 5.1: Espessura remanescente e profundidade dos defeitos medidos por DDA e profundidade dos defeitos medidos por Scanner 3D para o CP1 – Grupo I.

Defeitos	**DDA**		**Valo Real**	**Erro**
	Espessura Remanescente (mm)	**Profundidade do defeito* (mm)**	**Profundidade do defeito (mm)**	
D1	nd	nd	2,9	-
D2	3,4	4,1	5,4	25%
D3	4,3	3,2	5,5	41%
D4	nd	nd	6,3	-
D5	1,4	6,1	6,7	9%
D6	nd	nd	5,1	-
D7	1,3	6,2	6,3	2%
D8	4,2	3,3	2,3	45%

Tabela 5.2: Espessura remanescente e profundidade dos defeitos medidos por DDA e profundidade dos defeitos medidos por Scanner 3D para o CP2 – Grupo I.

Defeitos	**DDA**		**Valo Real**	**Erro**
	Espessura Remanescente (mm)	**Profundidade do defeito* (mm)**	**Profundidade do defeito (mm)**	
D1	nd	nd	3,5	-
D2	2,6	4,9	3,7	33%
D3	4,8	2,7	4,9	46%
D4	nd	nd	7,4	-
D5	6,1	1,4	7,1	81%
D6	nd	nd	6,0	-
D7	3,2	4,3	3,3	27%
D8	4,8	2,7	3,3	20%

Tabela 5.3: Espessura remanescente e profundidade dos defeitos medidos por DDA e profundidade dos defeitos medidos por Scanner 3D para o CP3 – Grupo I.

Defeitos	**DDA**		**Valo Real**	**Erro**
	Espessura Remanescente (mm)	**Profundidade do defeito* (mm)**	**Profundidade do defeito (mm)**	
D1	nd	nd	2,6	-
D2	4,4	3,1	2,0	56%
D3	5,3	2,2	3,3	35%
D4	nd	nd	5,1	-
D5	1,9	5,6	6,5	13%
D6	2,4	5,1	4,3	20%
D7	4,2	3,3	3,5	6%
D8	5,5	2,0	3,0	36%

Tabela 5.4: Espessura remanescente e profundidade dos defeitos medidos por DDA e profundidade dos defeitos medidos por Scanner 3D para o CP4 – Grupo I.

Defeitos	**DDA**		**Valo Real**	**Erro**
	Espessura Remanescente (mm)	**Profundidade do defeito* (mm)**	**Profundidade do defeito (mm)**	
D1	nd	nd	2,0	-
D2	5,5	2,0	2,1	8%
D3	5,6	1,9	2,1	10%
D4	nd	nd	4,3	
D5	nd	nd	7,5	-
D6	nd	nd	4,6	-
D7	nd	nd	2,1	-
D8	nd	nd	1,7	-

5.2. Altura e Largura dos Defeitos dos CPs do Grupo I

As Tabelas 5.5 a 5.8 apresentam os valores medidos da altura e largura de cada defeito obtidos pela técnica radiográfica tangencial e por Scanner 3D, do CP1 ao CP4 (Grupo I), respectivamente. As imagens das medidas de altura e largura dos defeitos encontrados pela técnica radiográfica tangencial estão apresentadas nas Figuras B1 a B8 do Anexo B.

Tabela 5.5: Valores medidos da altura e largura de cada defeito do CP1 – Grupo I.

Defeitos		**DDA**	**Valor Real**	
	Altura (mm)	**Largura (mm)**	**Altura (mm)**	**Largura (mm)**
D1	24,8	10,9	28,8	15,9
D2	70,1	60,1	61,1	60,5
D3	73,1	65,3	73,6	67,5
D4	30,5	16,5	28,2	21,8
D5	12,2	30,9	15,8	32,3
D6	60,1	26,6	53,6	30,1
D7	44,8	31,8	43,1	37,7
D8	51,8	41,4	48,4	46,1

Tabela 5.6: Valores medidos da altura e largura de cada defeito do CP2 – Grupo I.

Defeitos		**DDA**	**Valor Real**	
	Altura (mm)	**Largura (mm)**	**Altura (mm)**	**Largura (mm)**
D1	27,4	20,9	27,3	23,7
D2	56,6	54,9	54,1	51,5
D3	70,1	71,0	63,4	68,2
D4	30,0	17,4	32,6	17,7
D5	56,1	32,2	45,8	30,8
D6	58,0	24,0	55,9	24,8
D7	46,0	31,4	46,2	31,8
D8	58,4	41,9	52,7	40,9

Tabela 5.7: Valores medidos da altura e largura de cada defeito do CP3 – Grupo I.

Defeitos		**DDA**	**Valor Real**	
	Altura (mm)	**Largura (mm)**	**Altura (mm)**	**Largura (mm)**
D1	16,5	10,5	21,2	13,7
D2	64,4	56,1	37,6*	57,0
D3	66,2	64,4	63,7	63,2
D4	21,8	13,1	24,4	15,3
D5	18,3	32,2	16,2	34,6
D6	52,1	27,4	48,5	28,2
D7	41,8	36,6	38,7	36,8
D8	46,9	34,6	46,3	40,6

Tabela 5.8: Valores medidos da altura e largura de cada defeito do CP4 – Grupo I.

Defeitos		**DDA**	**Valor Real**	
	Altura (mm)	**Largura (mm)**	**Altura (mm)**	**Largura (mm)**
D1.1	20,0	14,4	24,1	16,9
D1.2	47,0	33,5	63,3	36,3
D2	62,7	52,2	64,0	52,0
D3.1	68,4	62,2	62,6	60,7
D3.2	18,3	27,0	18,0	25,8
D4	20,9	17,8	21,5	16,2
D5	77,3	22,8	65,7	21,6
D6	55,4	33,9	55,3	34,4
D7	47,9	42,7	40,4	39,9
D8	28,7	35,7	32,4	39,2

5.3. Discussão dos Resultados do Grupo I

Para um melhor entendimento dos resultados alcançados, a discussão será feita com base nas curvas apresentadas nas Figuras 5.1 a 5.4, que mostram gráficos comparativos das profundidades encontradas por DDA e Scanner 3D, e das larguras dos defeitos do CP1 ao CP4 (Grupo I), respectivamente.

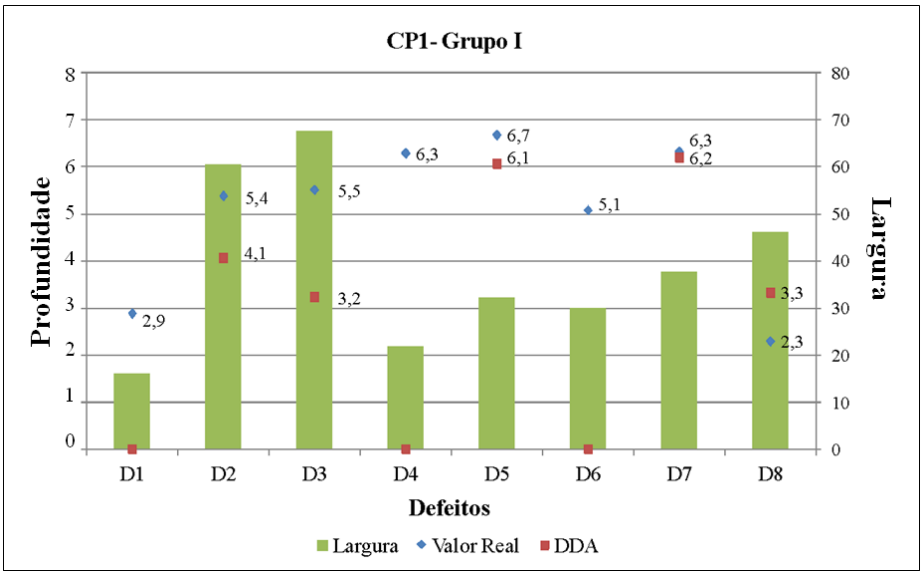


Figura 5.1: Gráfico comparativo das profundidades, encontradas por DDA e Scanner 3D, e das larguras dos defeitos do CP1 – Grupo I.

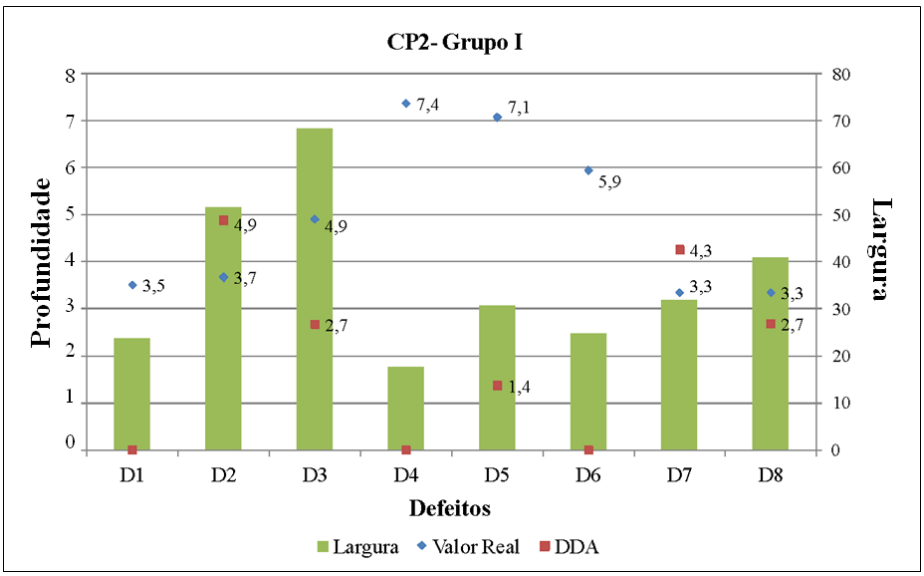


Figura 5.2: Gráfico comparativo das profundidades, encontradas por DDA e Scanner 3D, e das larguras dos defeitos do CP2 – Grupo I.

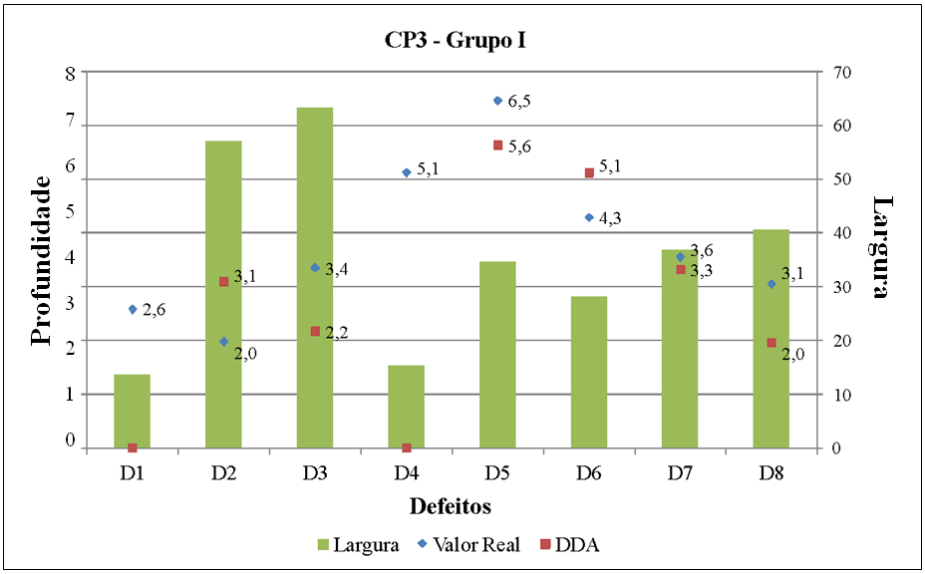


Figura 5.3: Gráfico comparativo das profundidades, encontradas por DDA e Scanner 3D, e das larguras dos defeitos do CP3 – Grupo I.

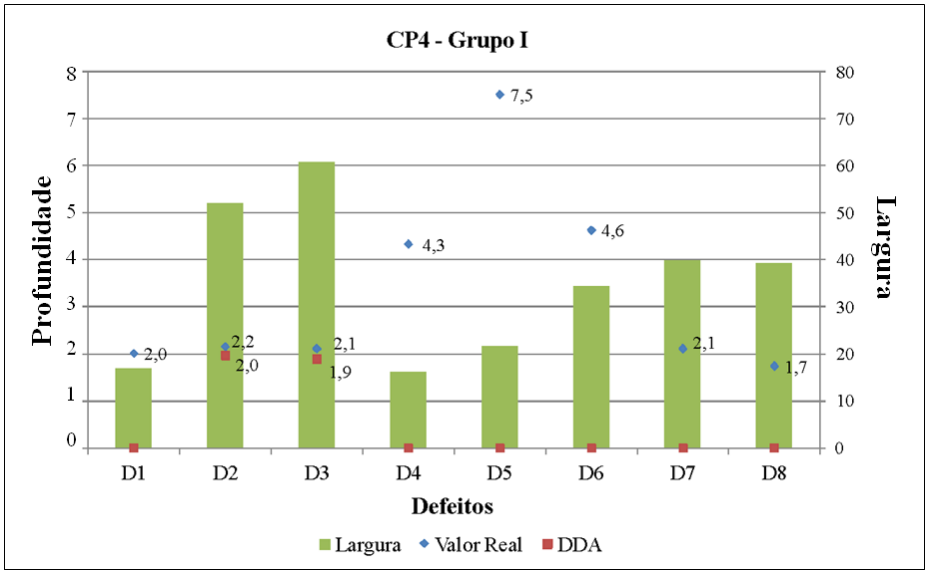


Figura 5.4: Gráfico comparativo das profundidades, encontradas por DDA e Scanner 3D, e das larguras dos defeitos do CP4 – Grupo I.

No CP1, os defeitos D1, D4 e D6 não foram detectados por DDA. O D1, além de possuir pequena profundidade (2,9 mm), apresenta também pequena largura (15,9 mm). Os defeitos D4 e D6, apesar de possuírem grande profundidade (6,3 mm e 5,1 mm, respectivamente), apresentam pequena largura (21,8 mm e 30,1 mm, respectivamente).

Ainda no CP1, os defeitos D5 e D7 foram detectados com boa precisão (9% e 2% de Erro Relativo, respectivamente), já os defeitos D2, D3 e D8 apresentaram imprecisão quantitativa da profundidade. O D2 e o D3 possuem formato com profundidades variáveis, como mostrado na imagem obtida pelo molde e comprovado pela PDVD (Anexo B: Figura B1 - b e c), onde pode ser visto pelo menos duas regiões macro com diferentes profundidades. O resultado quantitativo da radiografia tangencial pode ser referente à região de menor profundidade do defeito, o que causou um erro de 25% para o D2 e 41% para o D3 em relação ao valor especificado. Já o D8 é um defeito com grande largura, porém de pequena profundidade máxima (2,3 mm), sendo um defeito de difícil detecção e quantificação. O valor encontrado foi superestimado, gerando um erro relativo de 45%.

No CP2, também os defeitos D1, D4 e D6 não foram detectados por DDA. O D1, além de possuir pequena profundidade (3,5 mm), apresenta também pequena largura (23,7 mm). Os defeitos D4 e D6, apesar de possuírem grande profundidade (7,4 mm e 5,9 mm, respectivamente), apresentam pequena largura (17,7 mm e 24,8 mm, respectivamente). Os demais defeitos do CP2 foram detectados com imprecisão quantitativa da profundidade. O valor encontrado para a profundidade do D2 foi superestimado, com erro relativo de 33%. Porém, a avaliação da imagem apresenta coerência, inclusive visual, com a espessura do padrão usado para calibração. O D3 e o D8 são defeitos com profundidades variáveis, como mostrado na imagem obtida pelo molde e comprovado pela PDVD (Figuras B3 - c e B4 - d), onde pode ser vista mais de uma região macro com diferentes profundidades. O resultado quantitativo da radiografia tangencial pode ser referente à região de menor profundidade do defeito, o que causou um erro de 46% para o D3 e 20% para o D8 em relação ao valor especificado. Ainda no CP2, o D5 foi o defeito que apresentou maior imprecisão, por possuir um formato complexo com profundidades variáveis, com largura máxima limite (30,8 mm) e não uniforme ao longo da profundidade do defeito. Isso ocasionou uma perda de sensibilidade para a detecção e o valor da espessura remanescente obtido pela radiografia pode ser referente a uma região de menor profundidade, visto que o erro foi de 81% em relação ao valor máximo especificado. A imagem do defeito D7 apresentou baixo contraste, tornando difícil a sua detecção e quantificação, devido, principalmente, à uma largura limite (31,8 mm), gerando um resultado quantitativo da profundidade do defeito superestimado e com um erro de cerca de 27% em relação ao valor especificado.

No CP3, os defeitos D5 e D7 foram detectados com boa precisão (13% e 6%), mas os defeitos D1 e D4 não foram detectados por DDA. O D1, além de possuir pequena profundidade (2,6 mm), apresenta também pequena largura (13,7 mm). O defeito D4, apesar de possuir grande profundidade (5,1 mm), apresenta pequena largura (15,3 mm). Ainda no CP3, os defeitos D2, D3, D6 e D8 apresentaram imprecisão quantitativa da profundidade. O D6, que é um defeito de difícil detecção e quantificação, devido, principalmente, à sua largura limite (28,2 mm), apresentou um resultado quantitativo da profundidade do defeito superestimado, com um erro de 20% em relação ao valor especificado. Os defeitos D2 e o D8 possuem formato com profundidades variáveis, como mostrado na imagem obtida pelo molde e comprovado pela PDVD (Figuras B5 - b e B6 - d), onde pode ser vista mais de uma região macro com diferentes profundidades. O resultado quantitativo da radiografia tangencial gerou um erro de 56% para o D2 e de 36% para o D8 em relação ao valor especificado. No caso do D8, a medida por DDA pode ser referente à região de menor profundidade do defeito, o que causou o erro mencionado. Porém, no caso do D2, a avaliação da imagem apresenta coerência, inclusive visual, com a espessura do padrão usado para calibração. Já o D3, embora possua um valor de profundidade maior que o defeito D2, apresenta imagens obtidas pelo molde e pela técnica de PDVD (Figura B5 - c) que aparentam o contrário. O erro relativo para este defeito foi de 35%. Caso os valores de profundidade especificados para estes defeitos estejam invertidos, ou seja, D2 = 3,3 mm e D3 = 2,0 mm, o resultado obtido com a técnica de radiografia tangencial apresentaria maior coerência, com erros relativos de 10% e 8% para D2 e D3, respectivamente.

No CP 4, os defeitos D2 e D3 foram detectados com boa precisão, porém os demais defeitos não foram detectados por DDA. Foi observado que não foram detectados defeitos com larguras menores que cerca de 40 mm para este tubo. Isso pode ser devido à maior espessura e ao material usado no reparo. O D1 e o D4 apresentam pequena largura (16,9 mm e 16,2 mm, respectivamente). O D5 também possui pequena largura (21,6 mm) e um formato com grande variação de profundidades. Vale ressaltar que o valor máximo de profundidade especificado (7,5 mm) para esse defeito é maior que o valor da parede medido com o paquímetro (7,5 mm). O D6, o D7 e o D8 possuem larguras limite (34,4 mm, 39,9 mm e 39,2 mm), ou seja, próxima ao limite de 40 mm mencionado.

Os resultados quantitativos mostraram uma forte relação entre a largura do defeito e a detecção do mesmo, assim como a precisão do dimensionamento da profundidade. A Figura 5.5 mostra a relação entre o erro relativo médio e o range de largura dos defeitos para os corpos de prova do Grupo I.

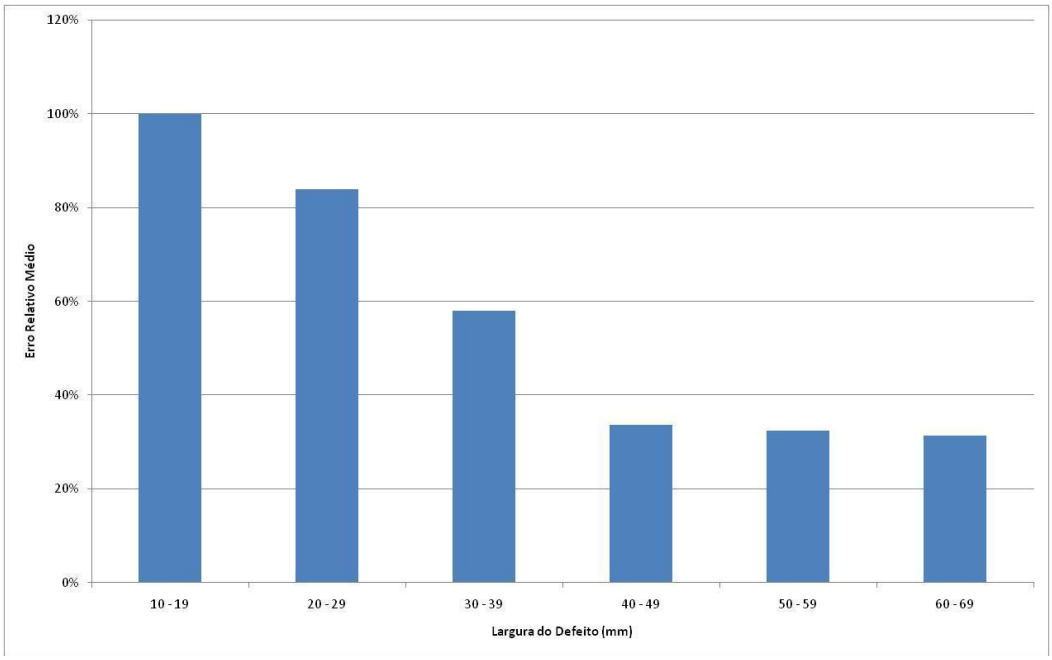


Figura 5.5: Erro relativo médio de dimensionamento da profundidade dos defeitos em função do range de largura para os corpos de prova do Grupo I.

Com os dados de largura dos defeitos foi realizada a análise da probabilidade de detecção (PoD) do tipo HIT/MISS, como mostra a Figura 5.6.

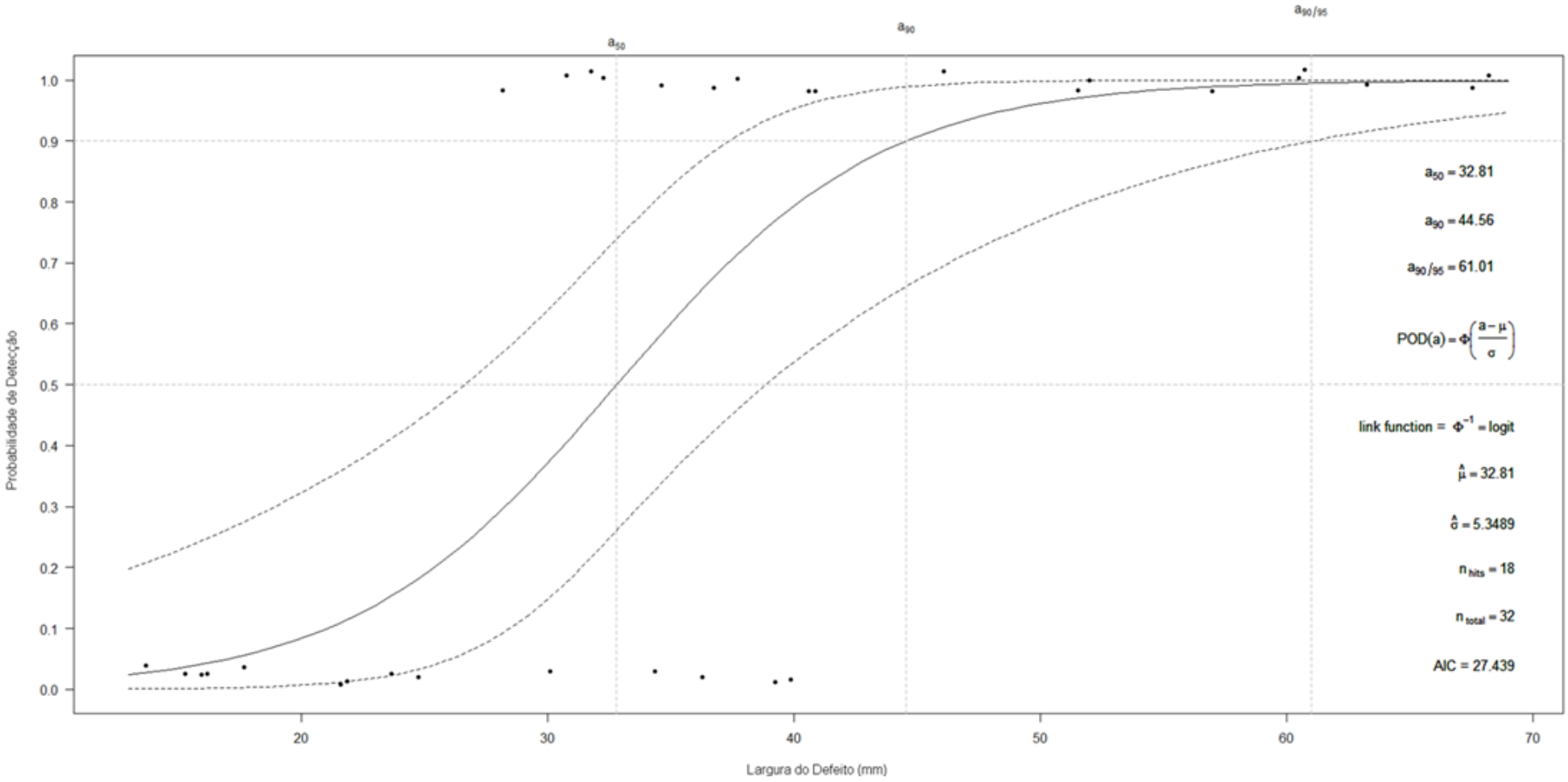


Figura 5.6: Gráfico de PoD (Probabilidade de Detecção) dos defeitos nos CPs do Grupo I.

O total de defeitos detectados e não detectados foram plotados em função da largura para obter a curva de PoD. Do total de 32 defeitos, foram detectados 18, obtendo um a_{90} de 44,56 mm e um $a_{90/95}$ de 61,01 mm. Essa grande diferença nos valores é devido à baixa quantidade de defeitos usados para plotar a curva. Esses dados indicam que 90% dos defeitos com largura maior ou igual a 61,0 mm podem ser detectados com um intervalo de confiança de 95%. A grande quantidade de defeitos não detectados se deve principalmente aos resultados do CP4, onde apenas 25% dos defeitos foram visualizados, enquanto que para os outros CPs esse valor foi de 65%. Esse resultado pode ter sido causado pela maior espessura do revestimento de epóxi (18 mm) em relação aos outros CPs. Se os dados do CP4 forem retirados da curva, o valor de a_{90} cai para 31,5 mm e de $a_{90/95}$ para 41,1 mm.

5.4. Profundidades dos Defeitos dos CPs do Grupo II

As Tabelas 5.8 a 5.11 apresentam os valores medidos por DDA da profundidade de cada defeito dos CP1 a CP4 (Grupo II), respectivamente. Nelas constam também os valores reais (aproximados) das profundidades e larguras dos defeitos. As imagens das medidas de espessura remanescente dos defeitos encontrados pela técnica radiográfica tangencial estão apresentadas nas Figuras C1 a C25 do Anexo C.

Tabela 5.8. Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP1 – Grupo II.

Defeitos	**DDA**	**Valor Real**		**Erro %**
	Profundidade (mm)	**Profundidade (mm)**	**Largura (mm)**	
D1	nd	2,4	10	-
D2	0,9	4,0	50	77%
D3	2,5	3,2	60	20%
D4	nd	7,2	10	-
D5	0,8	6,4	20	88%
D6	0,9	5,6	30	83%
D7	1,4	4,8	40	70%
D8	0,6	1,6	50	64%

nd – não detectável.

Tabela 5.9: Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP2 – Grupo II.

Defeitos	**DDA**	**Valor Real**		**Erro %**
	Profundidade (mm)	**Profundidade (mm)**	**Largura (mm)**	
D1	nd	2,4	10	-
D2	1,7	4,0	50	57%
D3	2,2	3,2	60	31%
D4	nd	7,2	10	-
D5	0,8	6,4	20	88%
D6	1,5	5,6	30	73%
D7	2,1	4,8	40	56%
D8	1,0	1,6	50	40%

nd – não detectável.

Tabela 5.10: Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP3 – Grupo II.

Defeitos	**DDA**	**Valor Real**		**Erro %**
	Profundidade (mm)	**Profundidade (mm)**	**Largura (mm)**	
D1	nd	2,4	10	-
D2	2,3	4,0	50	43%
D3	2,5	3,2	60	23%
D4	0,2	7,2	10	97%
D5	1,0	6,4	20	84%
D6	1,8	5,6	30	68%
D7	2,0	4,8	40	58%
D8	1,2	1,6	50	28%

nd – não detectável.

Tabela 5.11: Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP4 – Grupo II.

Defeitos	DDA	Valor Real		Erro %
	Profundidade (mm)	Profundidade (mm)	Largura (mm)	
D1	nd	2,4	10	-
D2	2,0	4,0	50	49%
D3	2,1	3,2	60	36%
D4	nd	7,2	10	-
D5	0,5	6,4	20	91%
D6	1,2	5,6	30	78%
D7	1,3	4,8	40	73%
D8	1,0	1,6	50	36%

nd – não detectável.

5.5. Discussão dos Resultados do Grupo II

Para um melhor entendimento dos resultados alcançados, a discussão será feita com base nos resultados apresentadas nas Figuras 5.7 a 5.12, que mostram gráficos comparativos das profundidades encontradas por DDA e o Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP1 ao CP4 (Grupo II), bem como a curva de ajuste PoD/HitMiss respectivamente.

Para os corpos de prova do Grupo II, os defeitos foram usinados na parede externa dos tubos, o que gerou um maior controle de formato (todos circulares) e profundidade. Como a espessura penetrada "L" aumenta quanto mais próximo da parede interna do tubo, há uma perda de contraste em maiores profundidades. Isso implica em uma perda de precisão no dimensionamento da profundidade dos defeitos, onde estes são apenas parcialmente detectados. Os maiores valores de profundidade medidos para cada tubo foram todos para o defeito D3, que tem também a maior largura (60 mm). O limite de profundidade medida com a técnica foi de 2,5 mm. Apenas 12,5% dos defeitos com 10 mm de largura foram detectados (1 de 8 defeitos), sendo que este único defeito apresentou um erro relativo no dimensionamento de 97%.

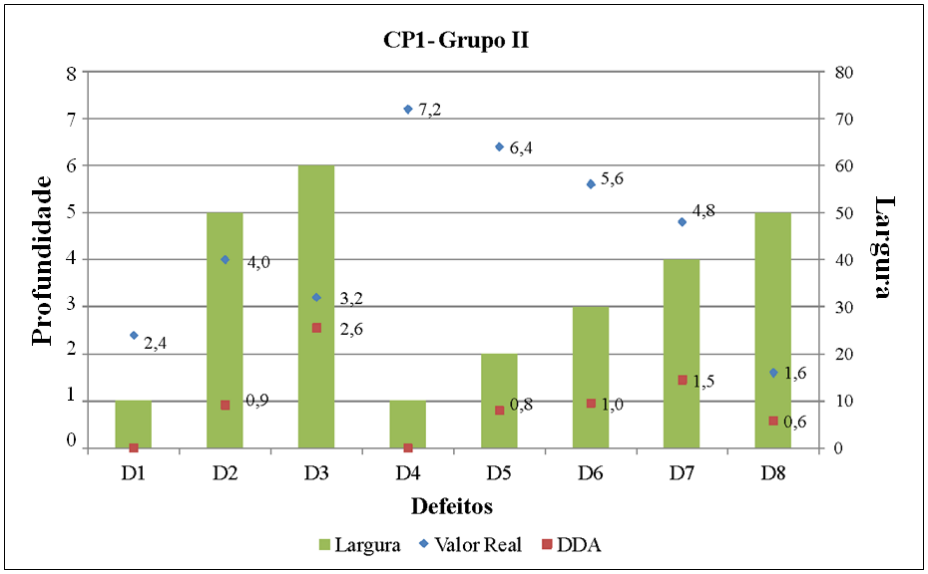


Figura 5.7: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP1 – Grupo II

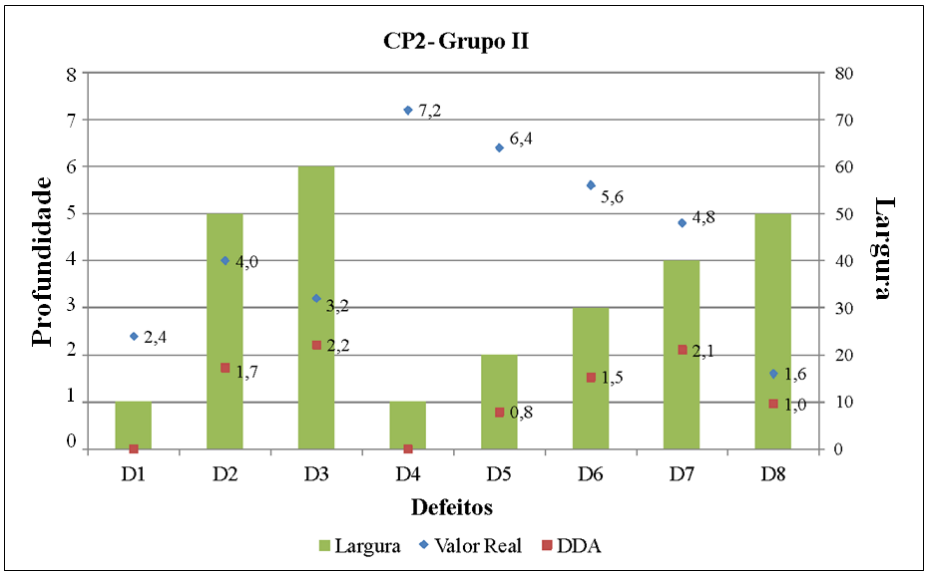


Figura 5.8: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP2 – Grupo II.

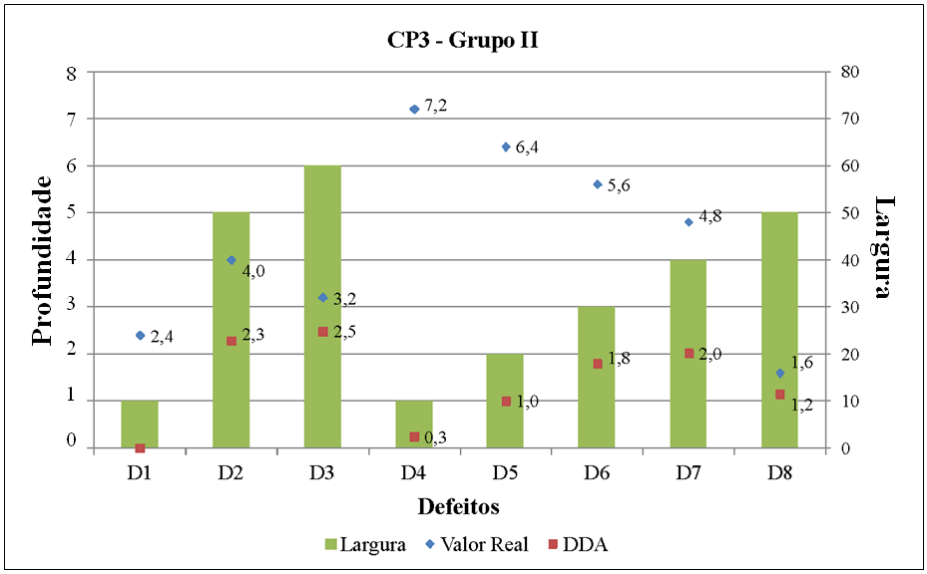


Figura 5.9: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP3 – Grupo II

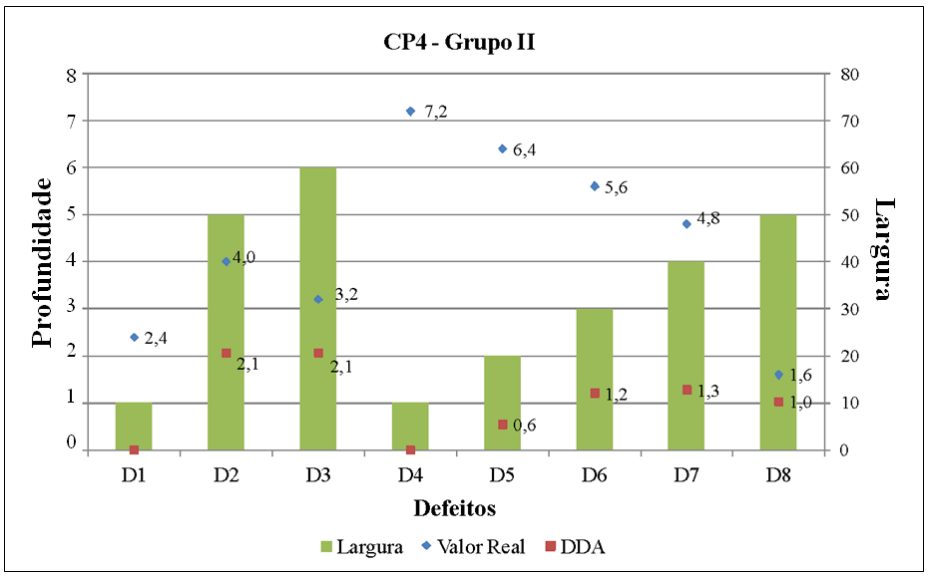


Figura 5.10: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP4 – Grupo II.

Assim como para os corpos de prova do Grupo I, os resultados quantitativos para o Grupo II mostraram também uma relação entre a largura do defeito e a detecção do mesmo, assim como a precisão do dimensionamento da profundidade. A Figura 5.11 mostra a relação entre o erro relativo médio e a largura dos defeitos para os corpos de prova do Grupo II.

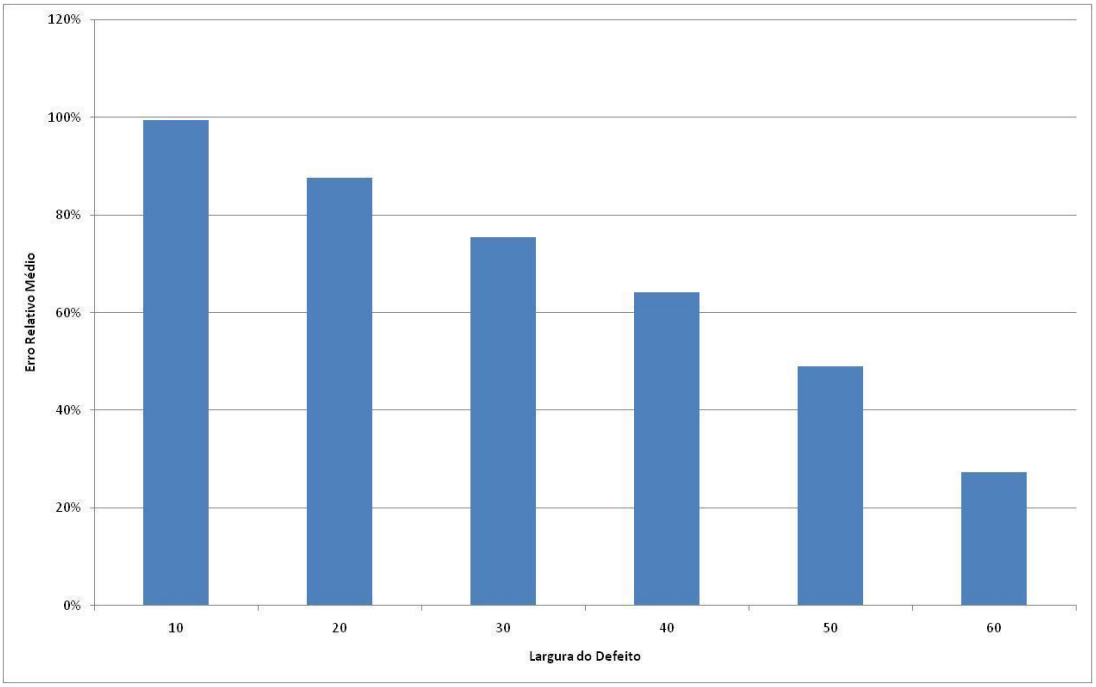


Figura 5.11: Erro relativo médio de dimensionamento da profundidade dos defeitos em função da largura para os corpos de prova do Grupo II.

Com os dados de largura dos defeitos foi realizada a análise da probabilidade de detecção (PoD) do tipo HIT/MISS, como mostra a Figura 5.12. O total de defeitos detectados e não detectados foram plotados em função da largura para obter a curva de PoD. Do total de 32 defeitos, foram detectados 25, obtendo um a_{90} de 11,91 mm e um $a_{90/95}$ de 13,77 mm. Esses dados indicam que 90% dos defeitos com largura maior ou igual a 13,77 mm podem ser detectados com um intervalo de confiança de 95%.

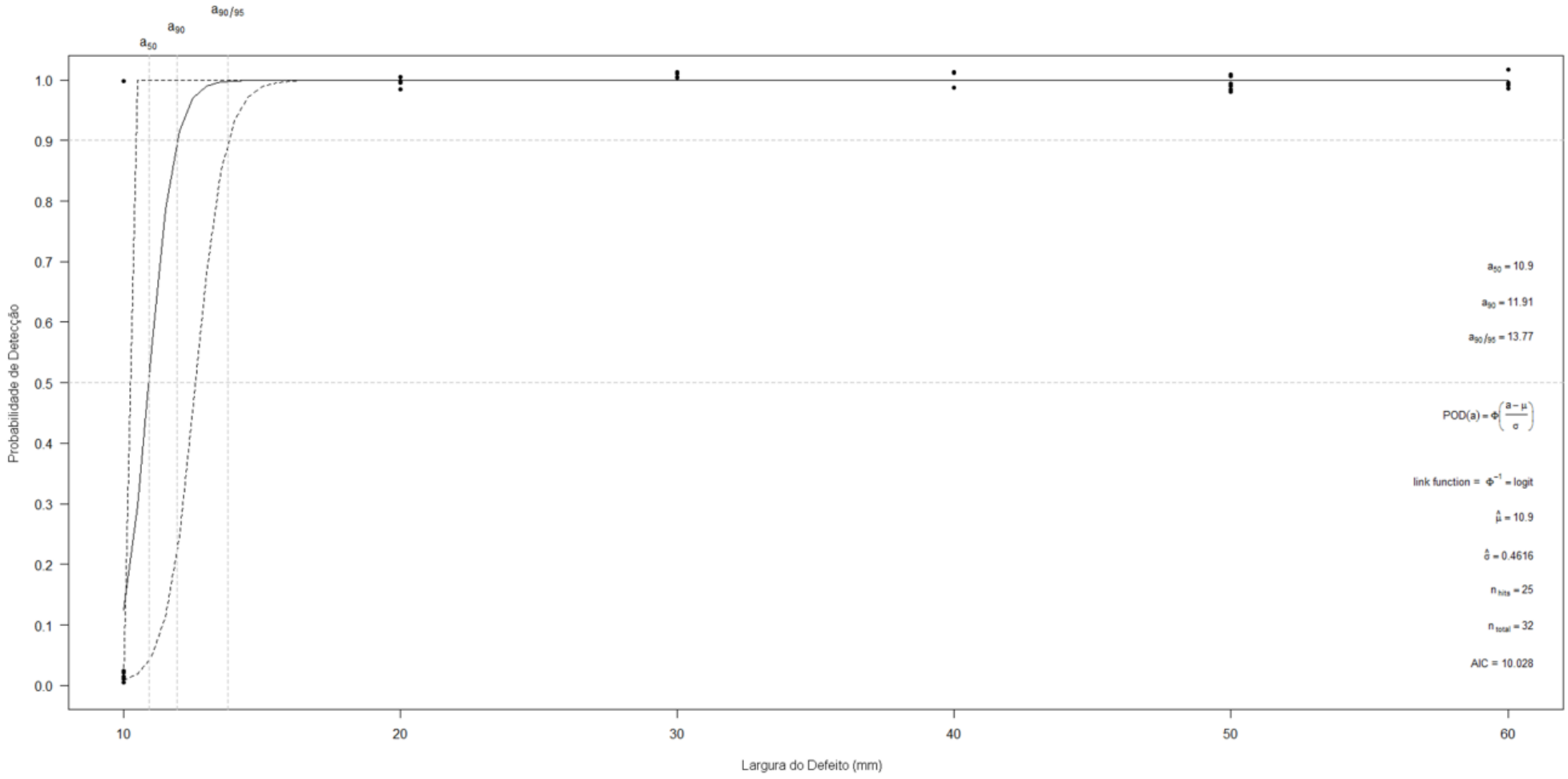


Figura 5.12 Gráfico de PoD (Probabilidade de Detecção) dos defeitos nos CPs do Grupo II

5.6. Profundidades dos Defeitos dos CPs do Grupo II utilizando fonte de Ir-192

As Tabelas 5.12 a 5.15 apresentam os valores medidos por DDA da profundidade de cada defeito dos CP1 a CP4 (Grupo II), respectivamente. Nelas constam também os valores reais (aproximados) das profundidades e larguras dos defeitos. As imagens das medidas de espessura remanescente dos defeitos encontrados pela técnica radiográfica tangencial estão apresentadas nas Figuras D14 a D19 do Anexo D.

Tabela 5.12. Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP1 – Grupo II

Defeitos	**DDA**	**Valor Real**		**Erro %**
	Profundidade (mm)	**Profundidade (mm)**	**Largura (mm)**	
D1	1,0	2,4	10	59%
D2	2,1	4,0	50	49%
D3	2,1	3,2	60	33%
D4	0,7	7,2	10	-
D5	1,5	6,4	20	90%
D6	1,5	5,6	30	76%
D7	1,8	4,8	40	73%
D8	0,5	1,6	50	71%

nd – não detectável.

Tabela 5.13: Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP2 – Grupo II.

Defeitos	**DDA**	**Valor Real**		**Erro %**
	Profundidade (mm)	**Profundidade (mm)**	**Largura (mm)**	
D1	nd	2,4	10	-
D2	1,7	4,0	50	59%
D3	2,1	3,2	60	33%
D4	0,5	7,2	10	94%
D5	0,9	6,4	20	86%
D6	1,5	5,6	30	74%
D7	0,9	4,8	40	65%
D8	0,9	1,6	50	44%

nd – não detectável.

Tabela 5.14: Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP3 – Grupo II.

Defeitos	**DDA**	**Valor Real**		**Erro %**
	Profundidade (mm)	**Profundidade (mm)**	**Largura (mm)**	
D1	nd	2,4	10	-
D2	0,8	4,0	50	80%
D3	2,0	3,2	60	38%
D4	0,0	7,2	10	-
D5	0,9	6,4	20	86%
D6	1,5	5,6	30	73%
D7	2,3	4,8	40	53%
D8	0,8	1,6	50	53%

nd – não detectável.

Tabela 5.15: Profundidade dos defeitos medidos por DDA e por Scanner 3D para o CP4 – Grupo II.

Defeitos	**DDA**	**Valor Real**		**Erro %**
	Profundidade (mm)	**Profundidade (mm)**	**Largura (mm)**	
D1	nd	2,4	10	-
D2	1,8	4,0	50	55%
D3	1,5	3,2	60	54%
D4	0,6	7,2	10	92%
D5	1,1	6,4	20	83%
D6	1,4	5,6	30	75%
D7	2,1	4,8	40	57%
D8	0,7	1,6	50	58%

nd – não detectável.

5.7. Discussão dos Resultados do Grupo II utilizando fonte gama de Ir-192

Assim como anteriormente, aqui serão utilizadas as Figuras 5.13 a 5.17, para ilustrar os resultados obtidos, que mostram gráficos comparativos das profundidades encontradas por DDA e o Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP1 ao CP4 (Grupo II), respectivamente.

Quando utilizada a fonte Gama, o limite de profundidade medida com a técnica passou a ser 2,3 mm. 50% dos defeitos com 10 mm de largura foram detectados (4 de 8 defeitos), sendo que estes defeitos detectados apresentaram um erro relativo no dimensionamento de cerca de 90% para o mais profundo (D4) e 59% para o menos profundo (D1). O defeito mais profundo teve uma detecção de 75% (3 de 4).

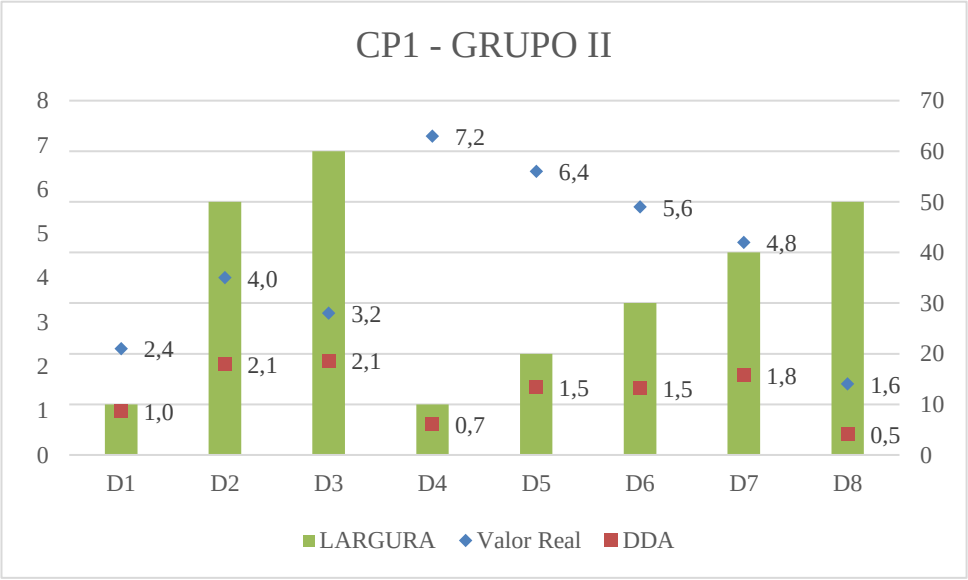


Figura 5.13: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP1 – Grupo II.

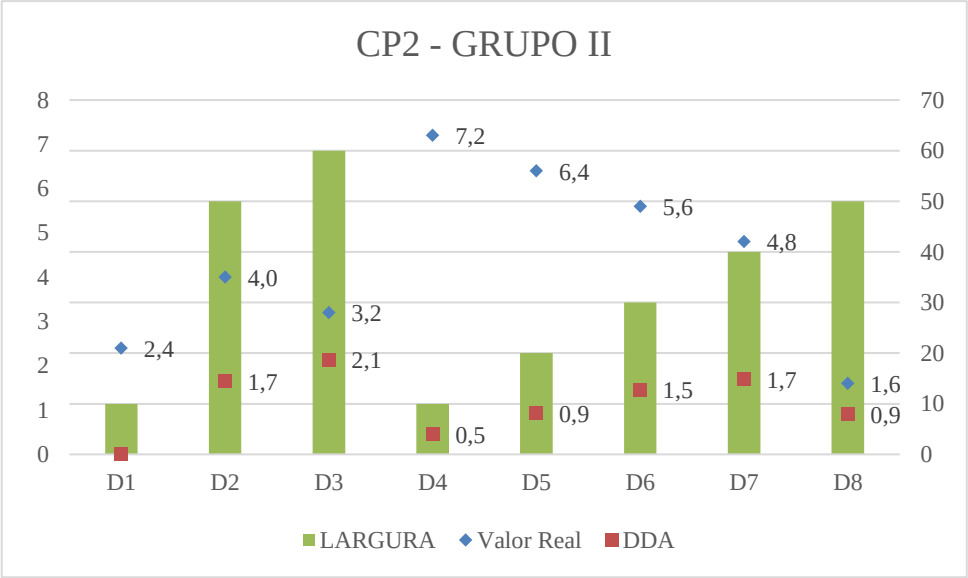


Figura 5.13: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP2 – Grupo II.

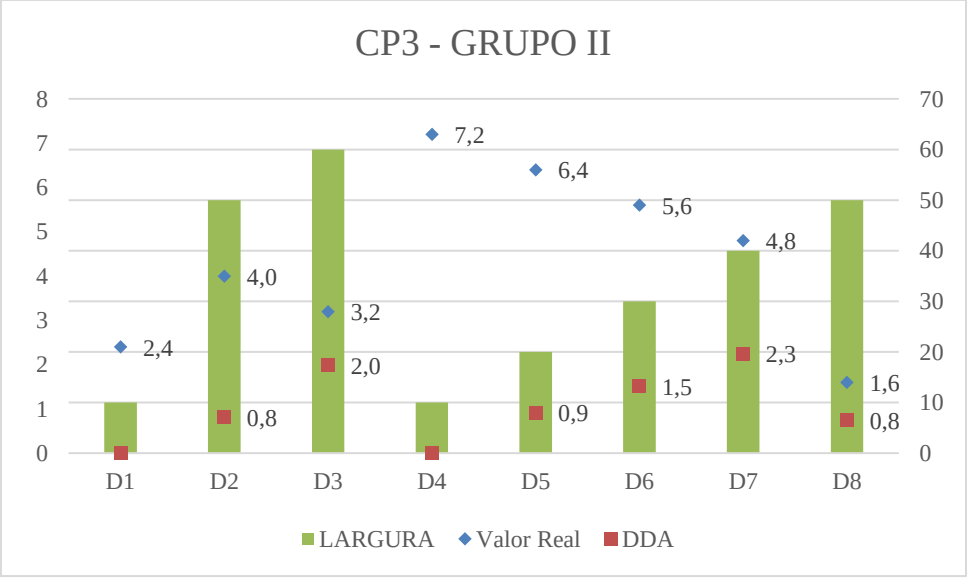


Figura 5.14: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP3 – Grupo II

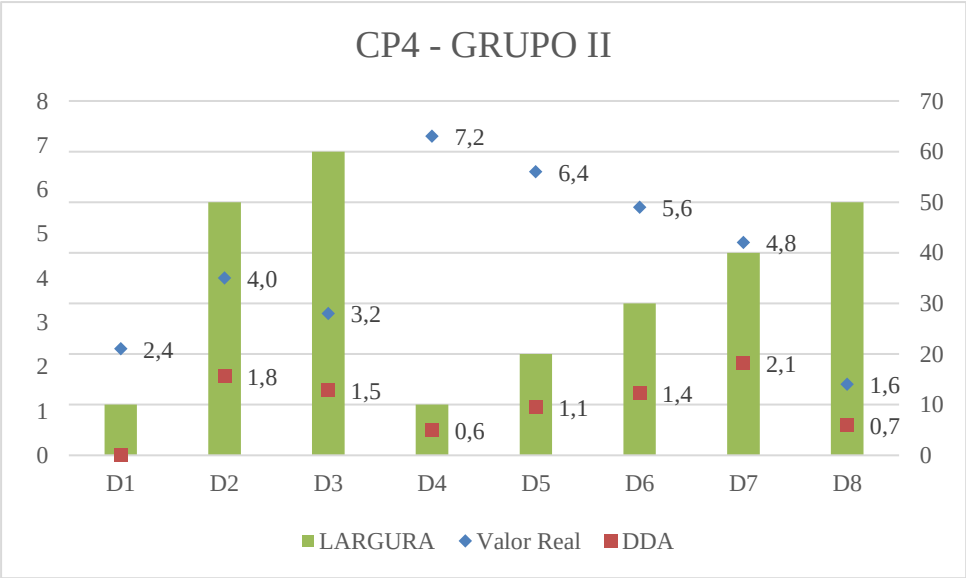


Figura 5.15: Gráfico comparativo das profundidades encontradas por DDA e Valor Real, e das larguras dos defeitos do CP4 – Grupo II.

Os resultados quantitativos para o Grupo II, quando utilizada a fonte gama mostraram também uma relação entre a largura do defeito e a detecção do mesmo, assim como a precisão do dimensionamento da profundidade. A Figura C18 mostra a relação entre o erro relativo médio e a largura dos defeitos para os corpos de prova do Grupo II.

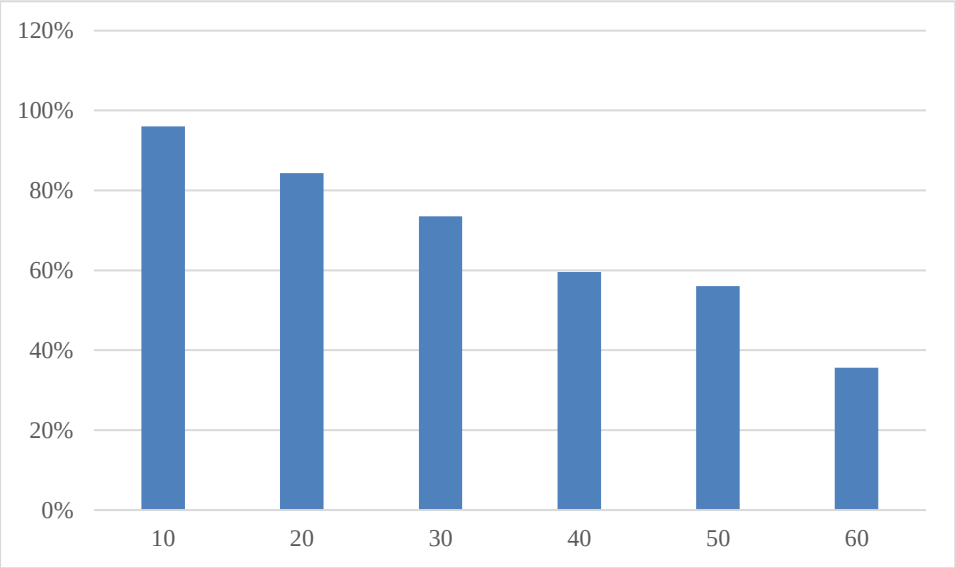


Figura 5.16: Erro relativo médio de dimensionamento da profundidade dos defeitos em função da largura para os corpos de prova do Grupo II.

Com os dados de largura dos defeitos foi realizada a análise da probabilidade de detecção (PoD) do tipo HIT/MISS, como mostra a Figura 5.17. O total de defeitos detectados e não detectados foram plotados em função da largura para obter a curva de PoD. Do total de 32 defeitos, foram detectados 29, obtendo um a_{90} de 10,66 mm e um $a_{90/95}$ de 11,38 mm. Esses dados indicam que 90% dos defeitos com largura maior ou igual a 11,38 mm podem ser detectados com um intervalo de confiança de 95%.

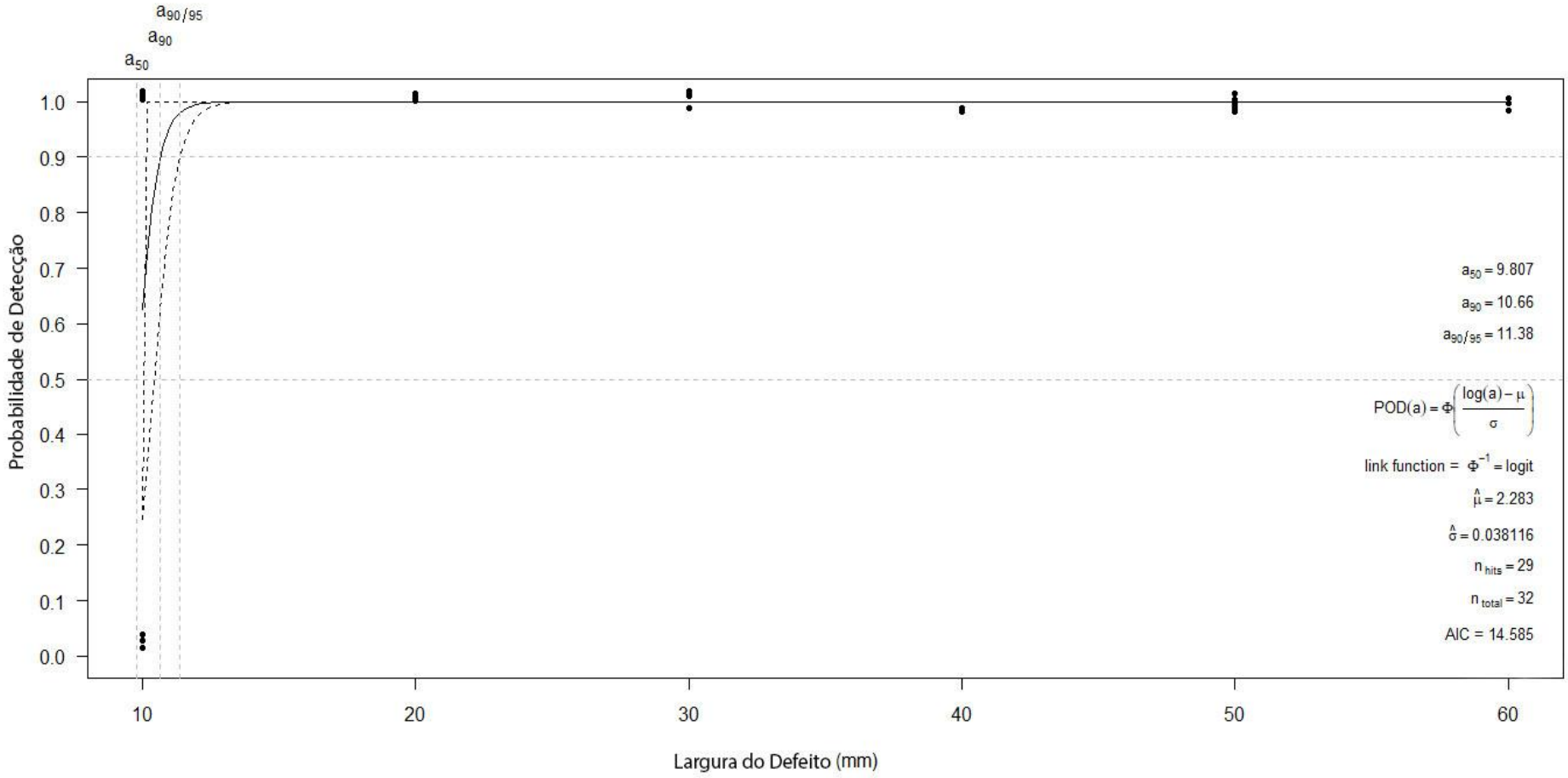


Figura 5.17: Gráfico de PoD (Probabilidade de Detecção) dos defeitos nos CPs do Grupo II.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Com este trabalho, foi possível verificar através das curvas de PoD/HitMiss, que a Técnica Radiográfica Digital Tangencial tem alta probabilidade de detecção, contudo, sua precisão na determinação da profundidade dos defeitos está fortemente ligada à dimensão dos mesmos e a energia da fonte utilizada.

Para os defeitos do grupo I, inspecionados com uma fonte de Ir-192, que possui uma penetrabilidade maior do que a do Eresco MF300 com 300 kV de energia, a detecção teve algumas dificuldades pois a espessura penetrada varia de uma parede máxima para uma mínima, enquanto que para os CPs do Grupo II, apesar da menor energia da fonte de Raio X, a detecção foi mais eficiente e a medição das profundidades mais precisa.

A não detecção dos defeitos do CP4 do grupo I, em sua grande maioria, pode estar relacionada a espessura do revestimento (18 mm de Epóxi, sendo 3 vezes maior que o mesmo revestimento aplicado no CP1), para além das dimensões dos entalhes produzidos no CP4, pois a detecção dos defeitos dos outros CPs do mesmo grupo foram satisfatórias para os mesmos parâmetros de radiografia.

Quando comparada a fonte de Ir-192 em relação ao uso da fonte de raio X de 300kV, é notável que a probabilidade de detecção dos defeitos de corrosão aumentou consideravelmente, contudo, a determinação da espessura perdida ainda apresentou um erro relativo alto. Podemos implicar o alto erro relativo ao tipo de revestimento utilizado, que gerou uma imagem de difícil identificação da região do W_{max}, dificultando a análise e medição das paredes perdidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHENBACH, J. D., 2000. "Quantitative Nondestructive Evaluation". *International Journal of Solids and Structures*, v. 37, pp. 13-27.

AGARD LECTURE SERIES 190: "A recommended methodology to quantify NDE/NDI based on aircraft engine experience", April 1993, ISBN 92-835-0707-X

AMIRAFSHARI, P., KOLIOS, A., "Estimation of weld defects size distributions, rates and probability of detections in fabrication yards using a Bayesian theorem approach", *International Journal of Fatigue*, v. 159, 2022.

ASNT. *Principles of Radiografic Examination.* American Society for Nondestructive Testing. 2021.

BARTHOLO, P.U., 2011, *PoD Aplicado à Significância de Descontinuidades pela Técnica Ultrassônica*. Dissertação de MSc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

BAZI, B.B., ALINE S.S., RICARDO T.L., *et al.* "Inspeção de Defeitos de Corrosão pela Técnica de Radiografia Digital Tangencial", Anais da Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações. Belo Horizonte (MG). Escola de Engenharia da UFMG e Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2022.

BAZI, B. B., OLGA M. O., SORAIA R. A., *et al.*, "Detectabilidade De Defeitos Em Juntas Soldadas De Tubos De Aço", Anais da Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações. Belo Horizonte (MG). Escola de Engenharia da UFMG e Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2022.

BOSSI, R. H. "Radiographic Testing". 3rd ed. v. 4. USA: American Society For Nondestructive Testing, Inc., 2002, pp 473-612.

CARTER, C., VEALÉ, B., 2010, *Digital Radiography & PACS.* 1 ed. St. Louis, Missouri, Mosby.

CHAVERRI-QUIROS, O., CONEJO-SOLIS, M., "Radiografía Industrial: comparación entre el método tradicional y digital empleando rayos X". Tecnología en Marcha, v. 30, n. 3, pp. 119-128, Set. 2017.

CHOOPAN, M.H., MOVAFEGHI, A., KHALAFI, H., *et al*. The quality assessment of radial and tangential neutron radiography beamlines of TRR. *Journal of Instrumentation*, v. 12, Jul. 2017.

EWERT, U., TSCHAIKNER, M., HOHENDORF, S., *et al*., "Corrosion monitoring with tangential radiography and limited view computed tomography", *AIP Conference Proceedings*. v. 1706, 2016.

FRANCIS, G.J., BARRERA, F.B., 1998, *Bases Da Morfologia Matemática Para Análise De Imagens Binárias*. 2ª ed. São Jose dos Campos, Brasil. INPE.

GEORGIOU, G.A., "The Extent of Ultrasonic Non-Invasive Inspection of LPG Storage Vessels". HSE Project, JCL Report No. 2/8/99, September, 1999.

GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E., 2018, *Digital Image Processing.* 4th ed, New York, Pearson Education.

HAMZAH, A.R., AMIR, S.M., "Revisited the Mathematical Derivation Wall Thickness Measurement of Pipe for Radiography". *E-journal of Nondestructive Testing*, v. 12, n. 10, 2007.

HARARA, W. "Corrosion Evaluation and Wall Thickness Measurement on Large-Diameter Pipes by Tangential Radiography Using a Co-60 Gamma Ray Source". *Insight*, v. 45, pp. 668-671, 2003.

HARARA, W. "Deposit thickness measurement in pipes by tangential radiography using gamma ray sources". *Russian Journal of Nondestructive Testing*, v. 44, pp. 796–802, 2008.

ISO/FDIS 17636-2. "Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2 X and gamma-ray techniques with digital detectors". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2013.

ISO 20769-1. "Non-Destructive testing – Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays – Part 1 Tangential radiographic inspection". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.

KNOLL, G. F., *Radiation Detection and Measurement*. 3 ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2000.

KNOLL, G. F., *Radiation Detection and Measurement*. 4 ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2010

LEWIS W.H., SPROAT W.H., DODD B.D., *et al.* "Reliability of non-destructive inspection – Final Report". SA-ALC/MME 76-6-38-1, San Antonio Air Logistics Centre, Kelly Air Force Base, Texas, 1978.

LOPES, S. S., 2022, *Metodologia para segmentação de imagens de Microtomografia utilizando Inteligência Artifical*. Dissertação de MSc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2022.

MISTY I. H., UWE EWERT, STEFAN H., *et al*. "Radiographic modelling for NDE of subsea pipelines", *NDT&E International*, v. 86 pp. 113-122, 2017.

OLIVEIRA, D. F., 2010 *Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos*. Tese de DSc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PRASETYO, E., PARIAMAN, H., SULISTIJONO. "Tangential X-Ray Radiography for Pitting Geometry Analysis of Outside Wall of Insulated Steel Pipes". Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 56, n. 3, p. 249-258, 2020.

RUMMEL, W.D., "Nondestructive inspection reliability - History, status and future path", 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 2010.

SESSIM, M. F. F., 2015 "Inspeção de Solda do Bocal do Elemento Combustível PWR Por Radiografia Digital". Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

XU, W., ZSCHERPEL, U., PENG, J., *et al*. "Investigation on wall thickness ranges using digital radiography for tangential projection technique". *Tenth International Conference on Information Optics and Photonics.* Proc. SPIE, v. 10964, p. 109645B, 15 Nov. 2018.

YEW-MENG K., MEEKER, W. Q., *PoD Tutorial Part I - Dealing with Hit/Miss Data*, Center for Nondestructive Evaluation Department of Statistics Iowa State University, 2017.

ZHAO W, STACEY A., "Review of defect distributions for probabilistic structural integrity assessment", ASME 2002 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, p. 607–19, 2002.

ANEXO A – Imagens das Medidas de Espessura Remanescente dos Defeitos dos CPs do Grupo I

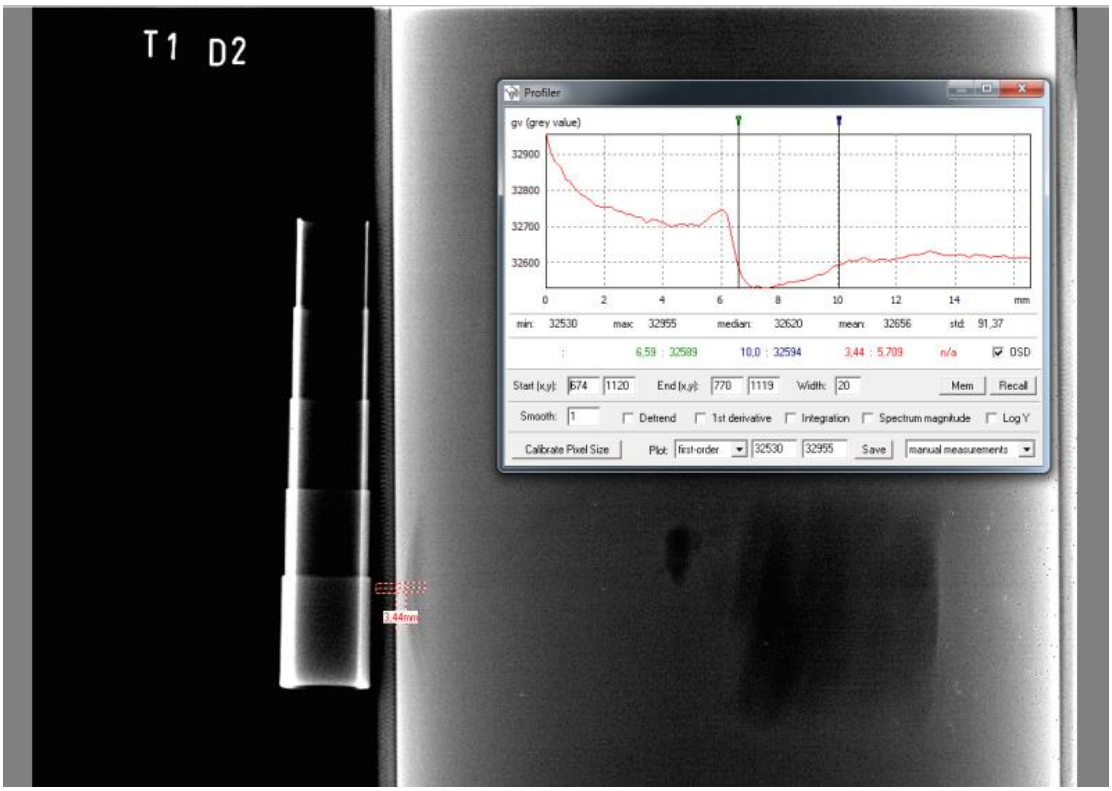


Figura A1. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 2 do CP1 – Grupo I.

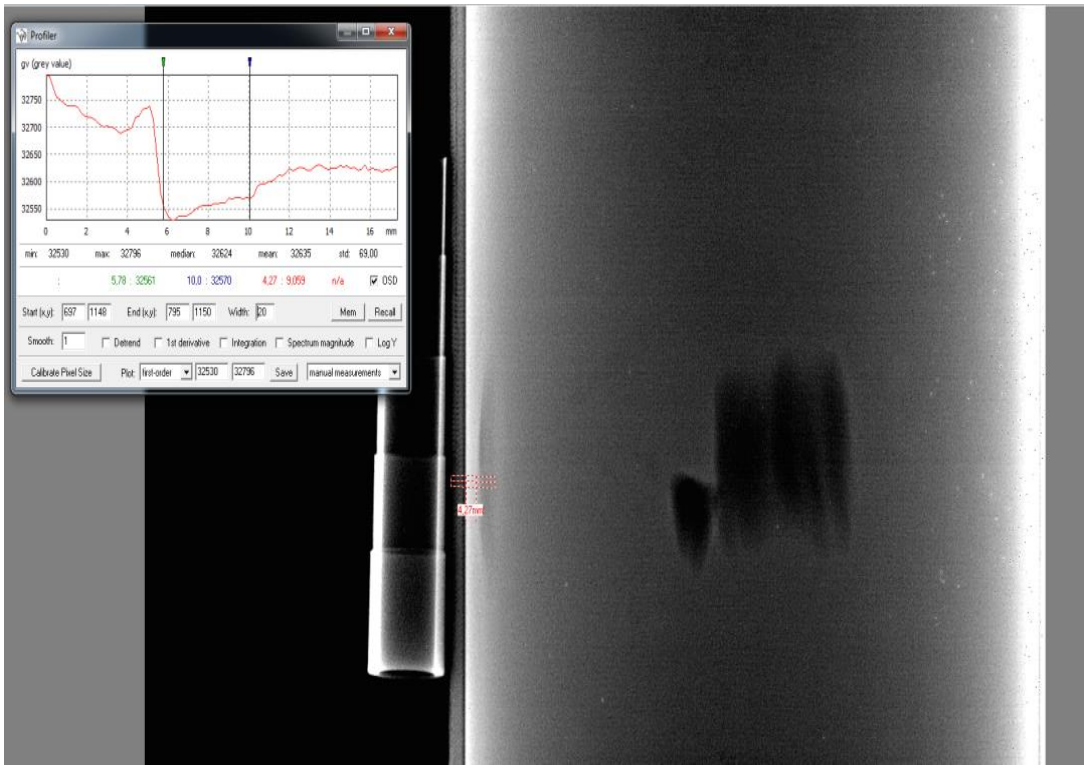


Figura A2. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 3 do CP1 – Grupo I.

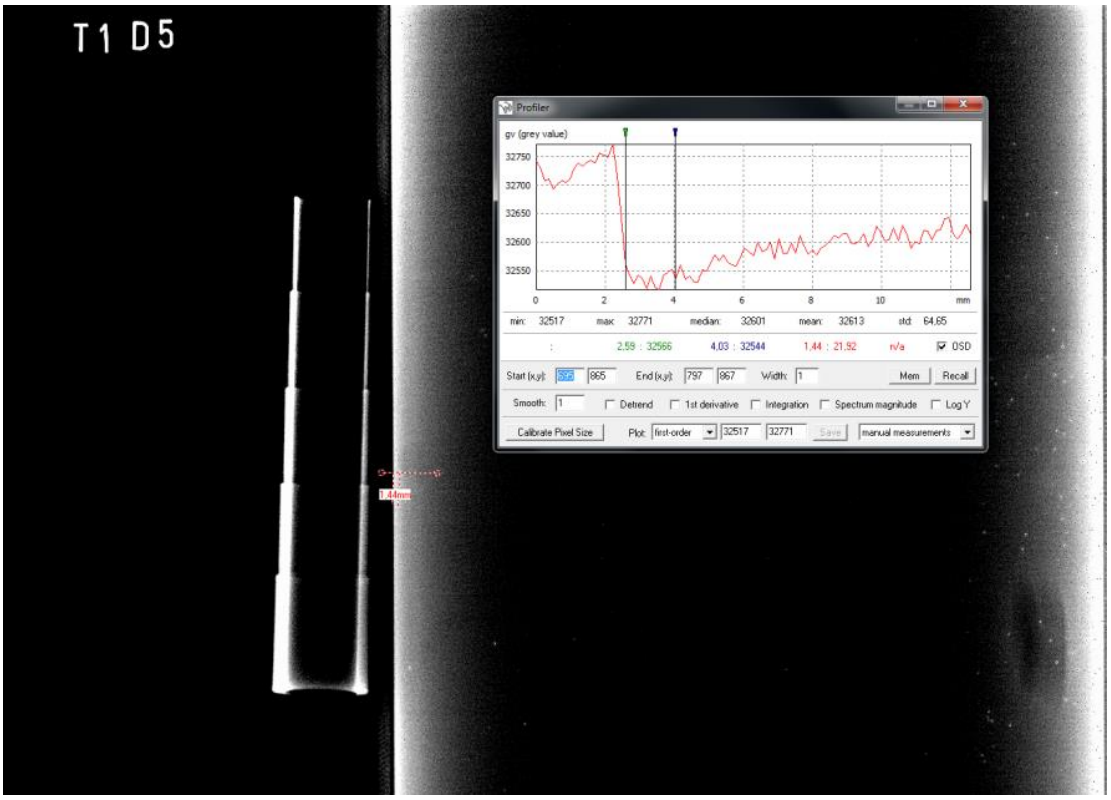


Figura A3. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 5 do CP1 – Grupo I.

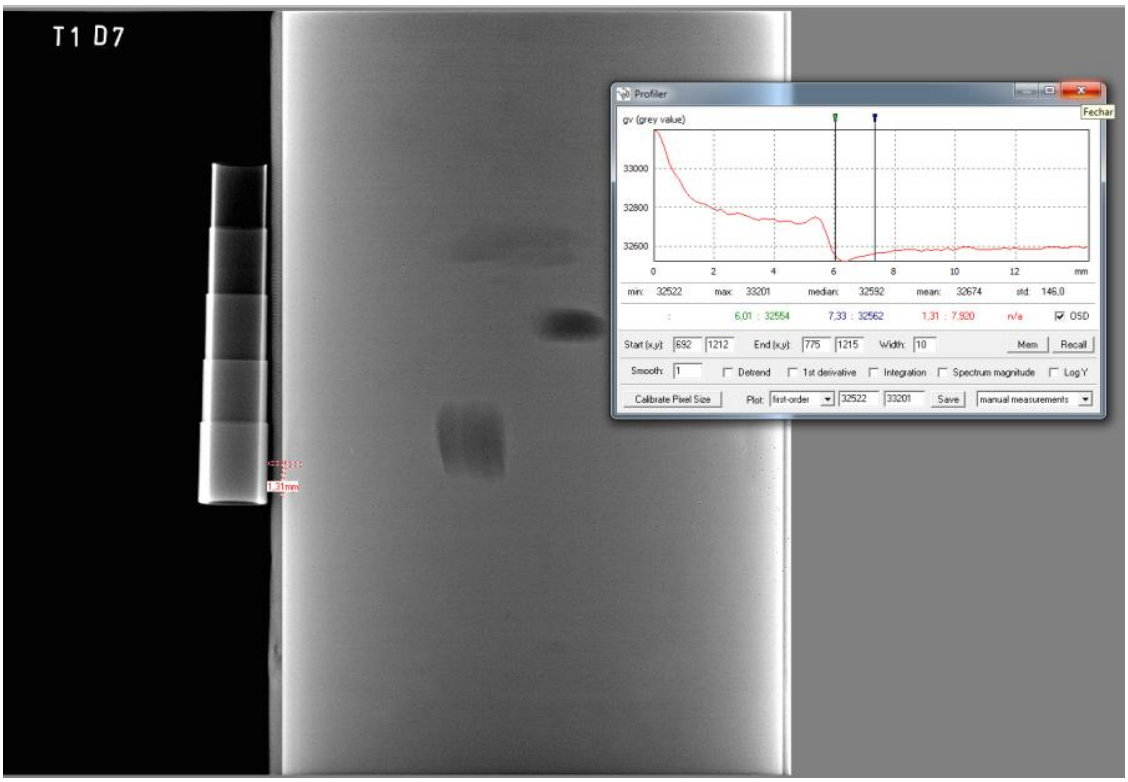


Figura A4. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 7 do CP1 – Grupo I.

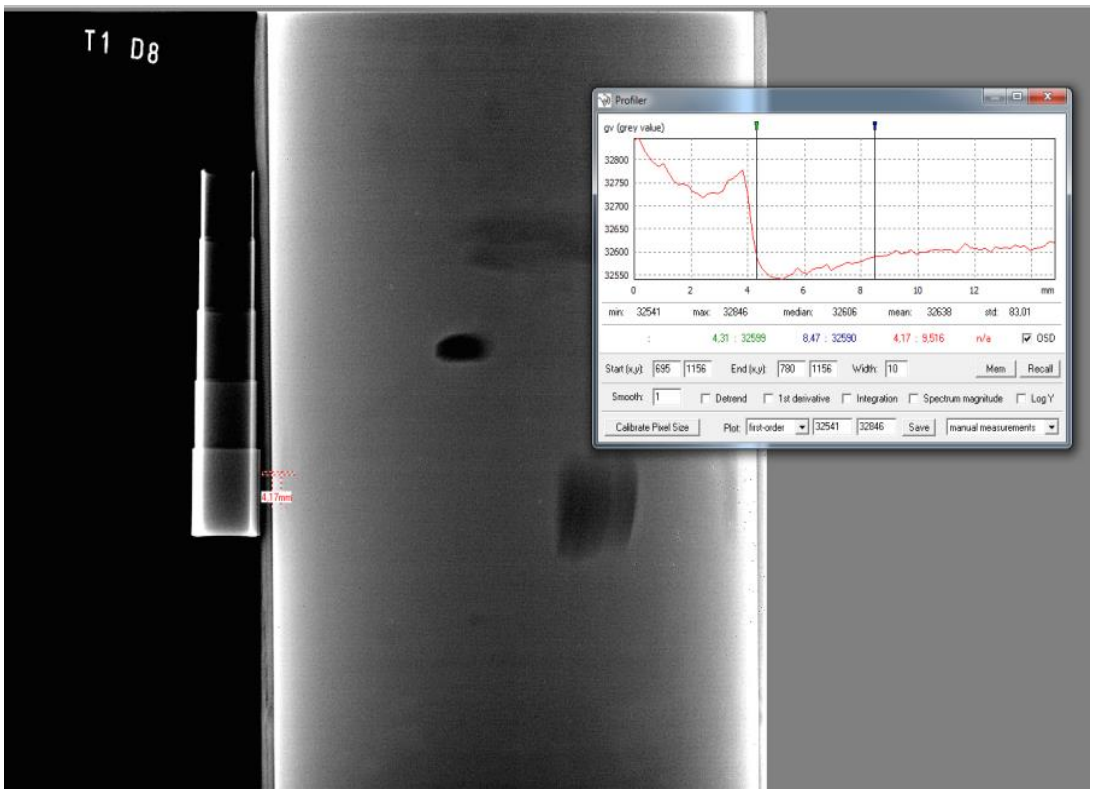


Figura A5. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 8 do CP1 – Grupo I.

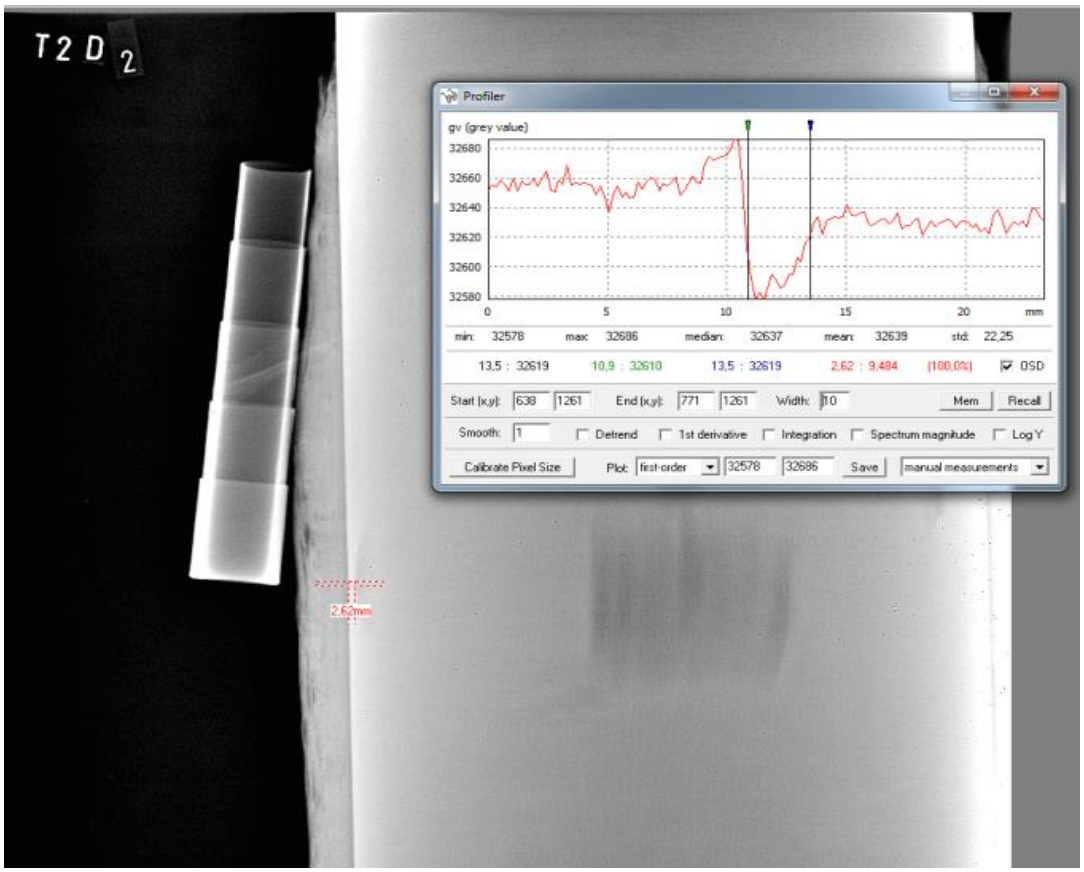


Figura A6. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 2 do CP2 – Grupo I.

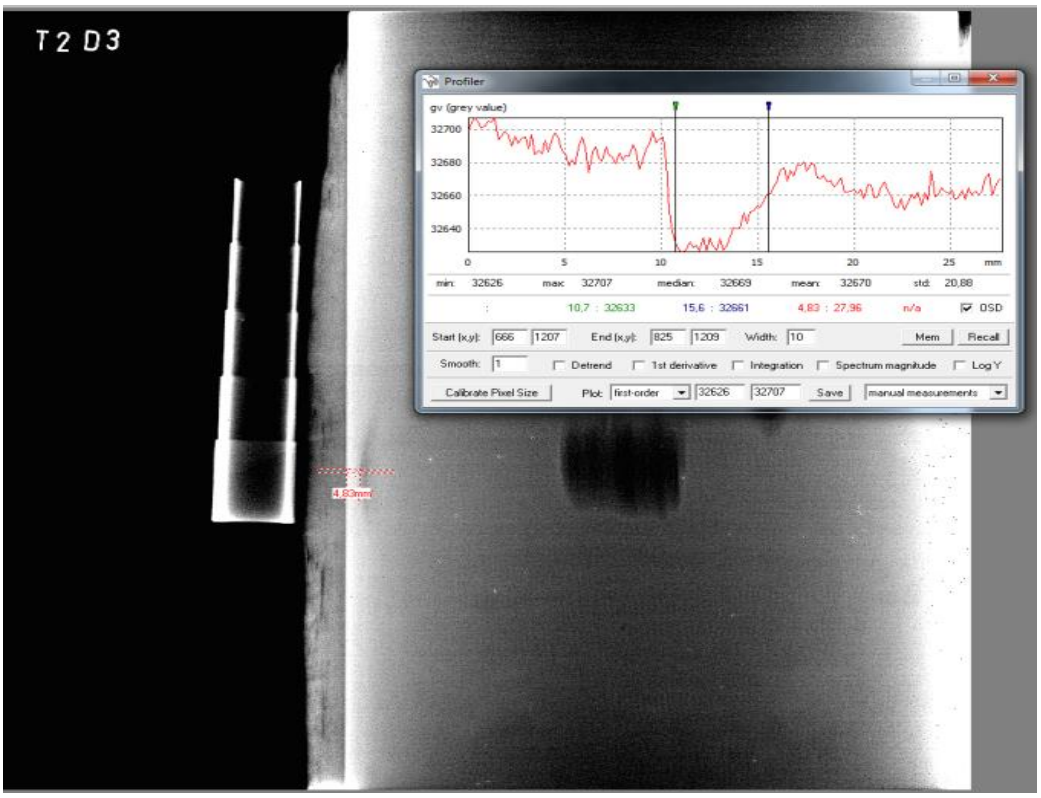


Figura A7. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 3 do CP2 – Grupo I.

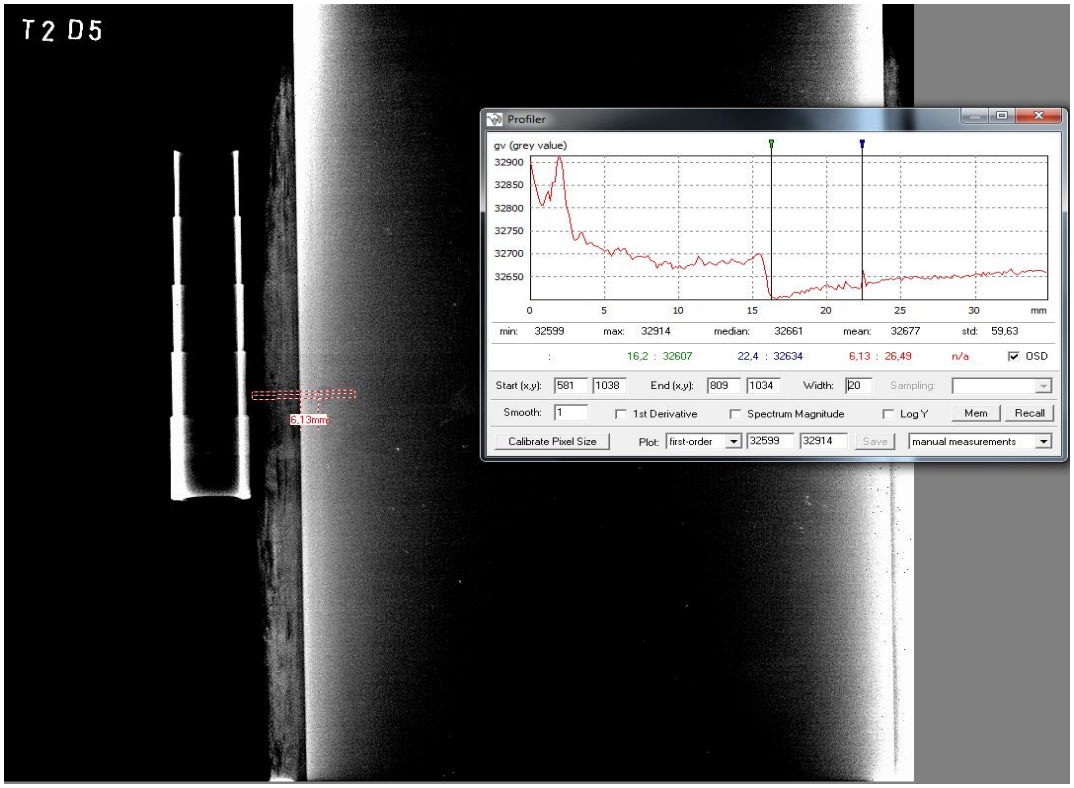


Figura A8. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 5 do CP2 – Grupo I.

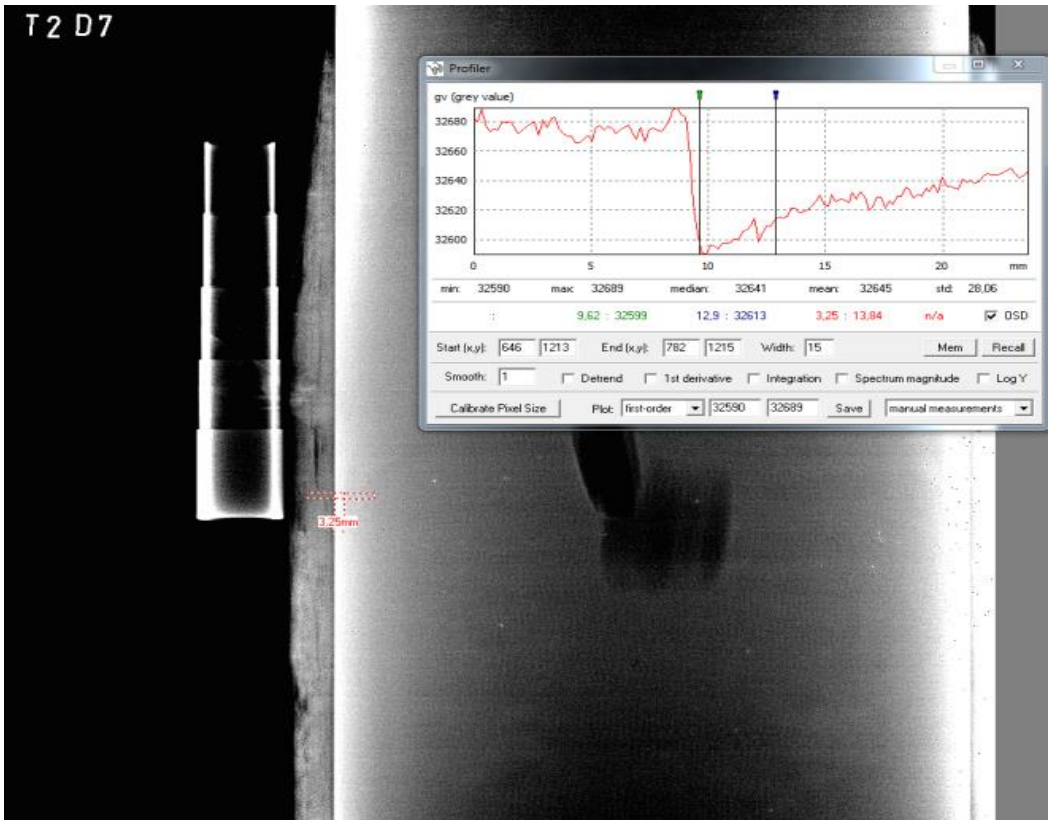


Figura A9. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 7 do CP2 – Grupo I.

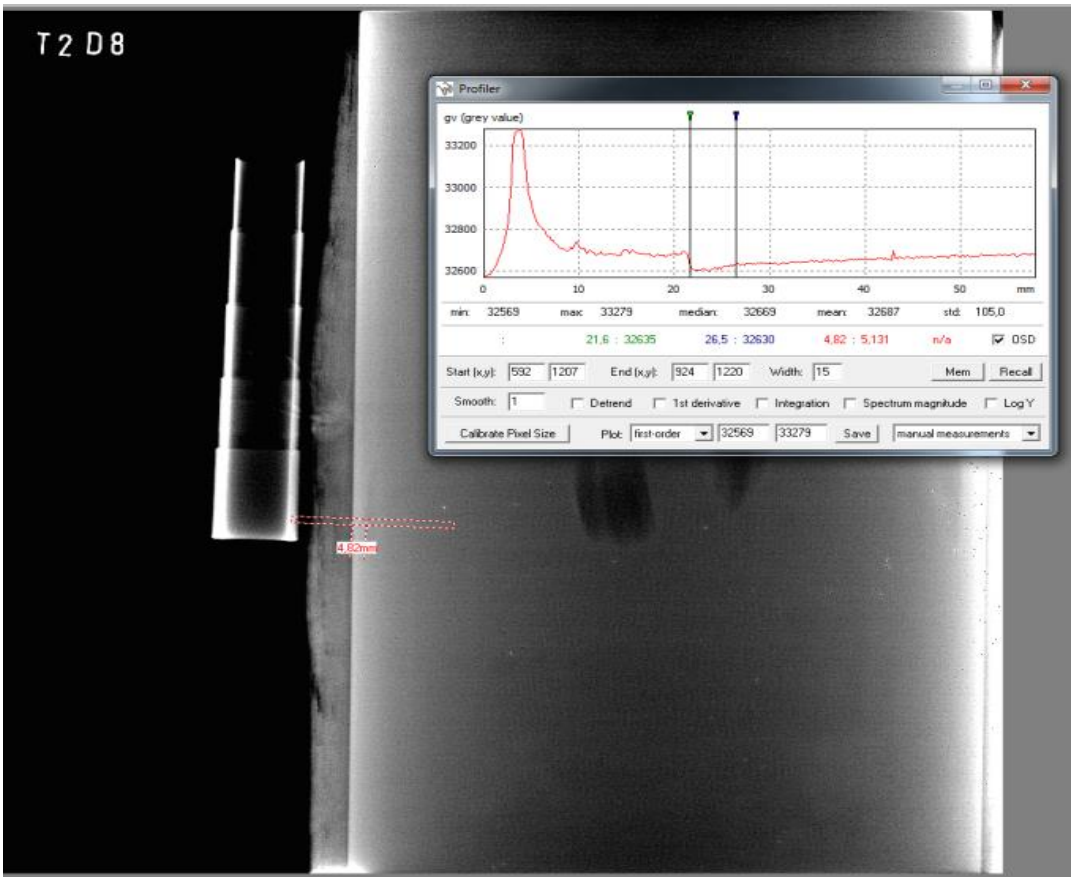


Figura A10. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 8 do CP2 – Grupo I.

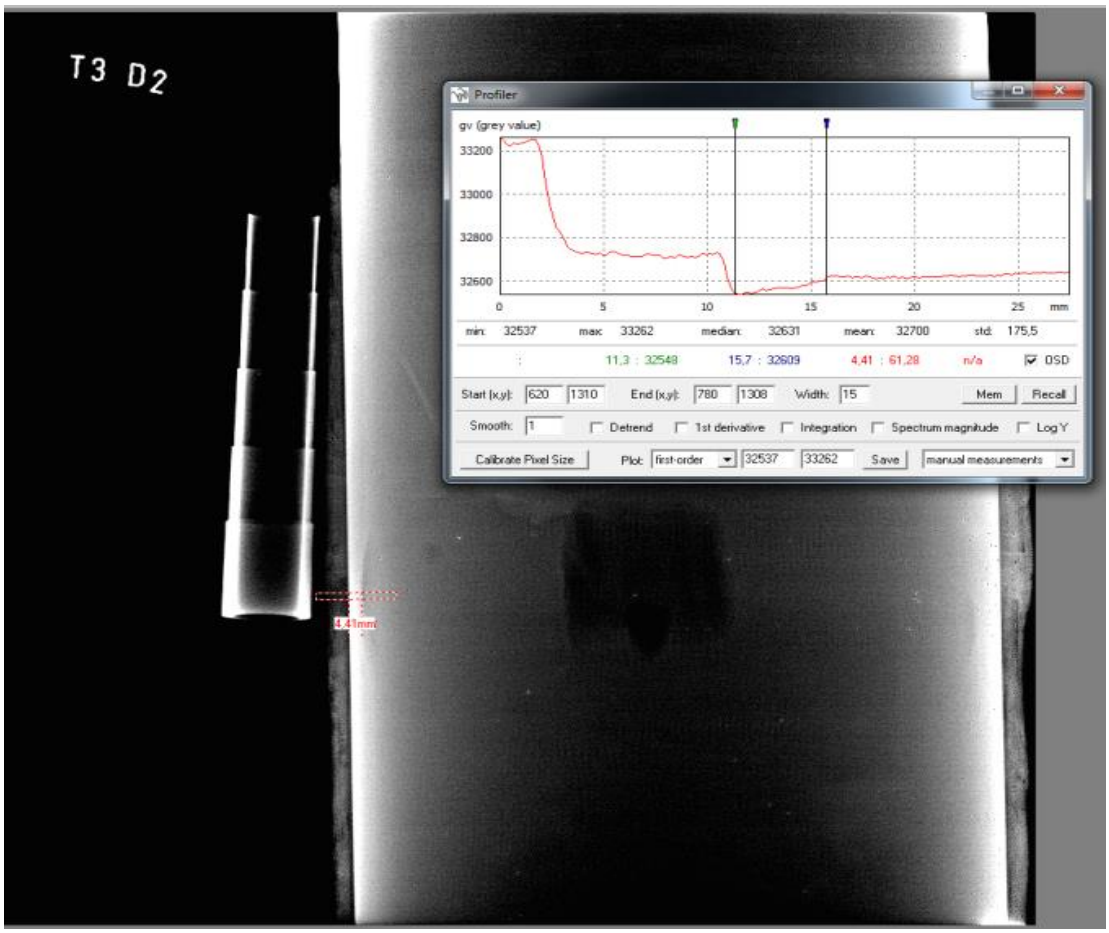


Figura A11. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 2 do CP3 – Grupo I.

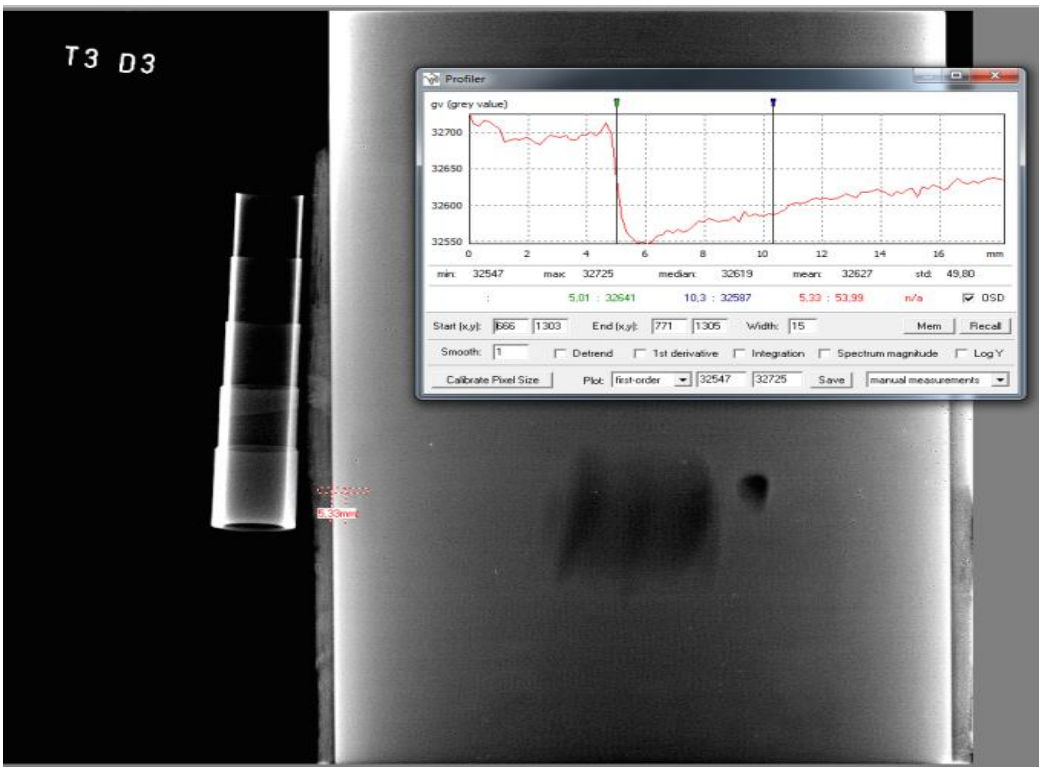


Figura A12. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 3 do CP3 – Grupo I.

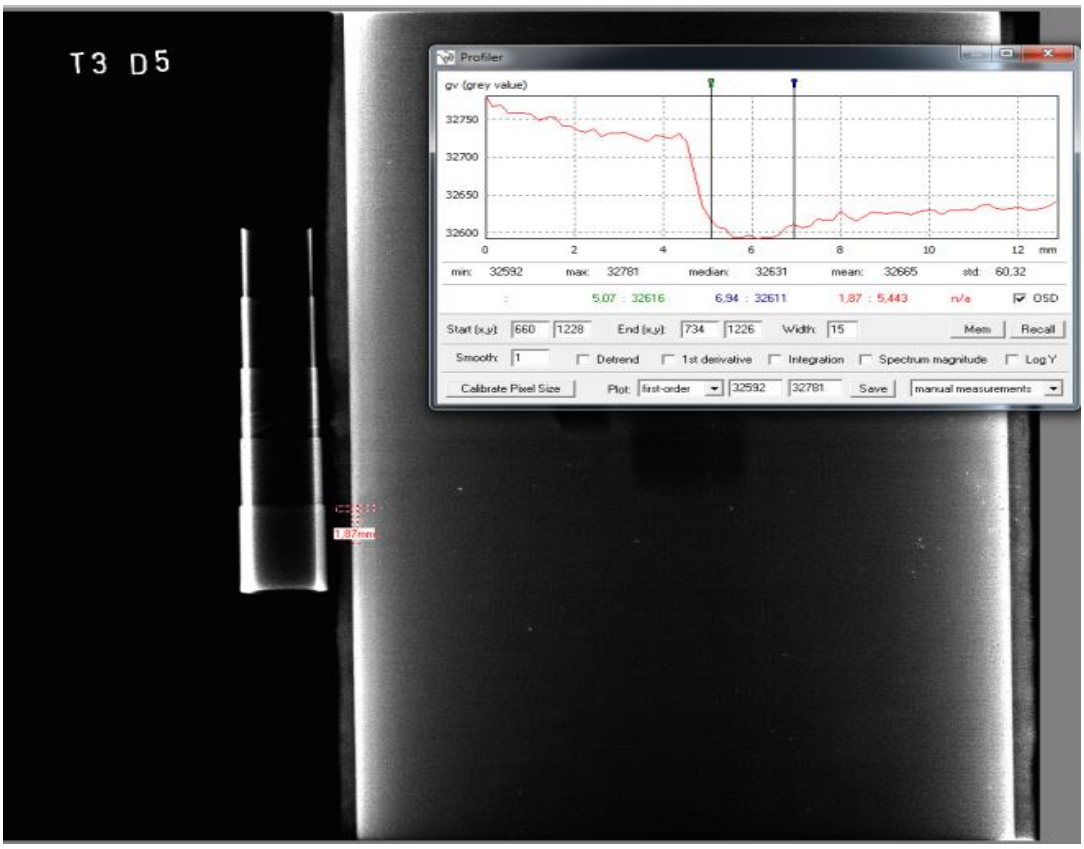


Figura A13. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 5 do CP3 – Grupo I.

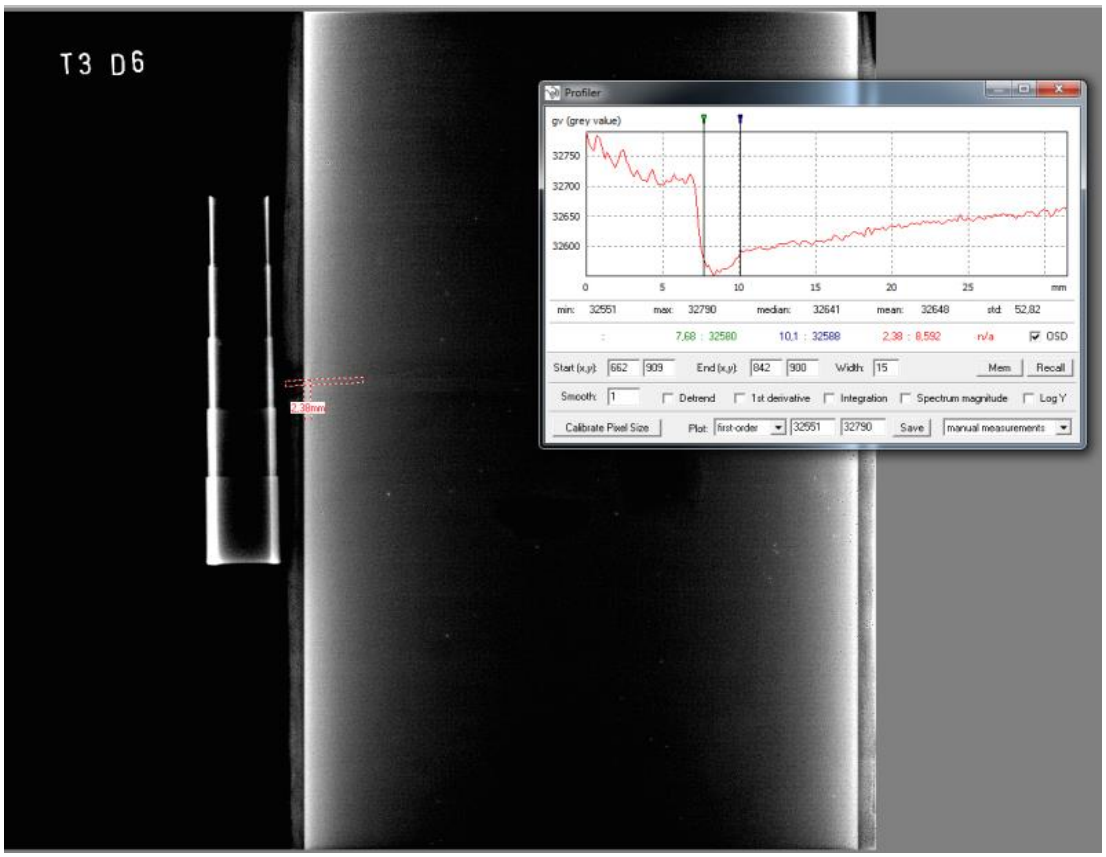


Figura A14. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 6 do CP3 – Grupo I.

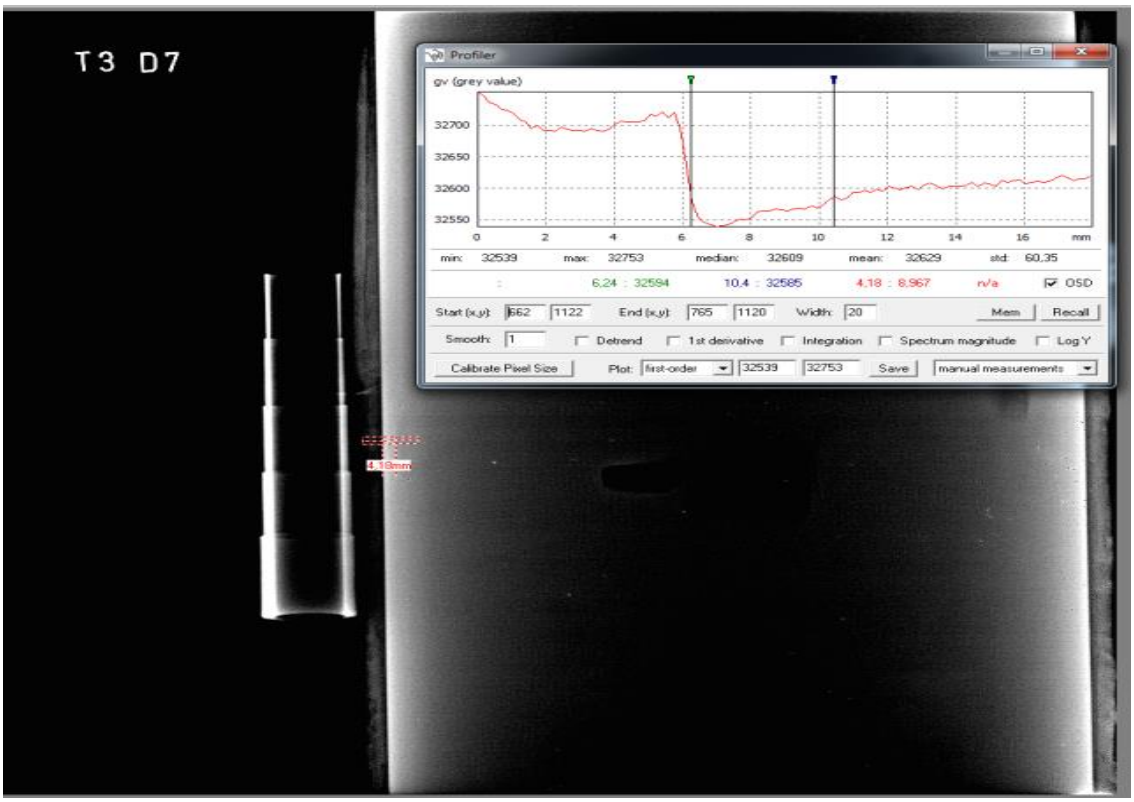


Figura A15. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 7 do CP3 – Grupo I.

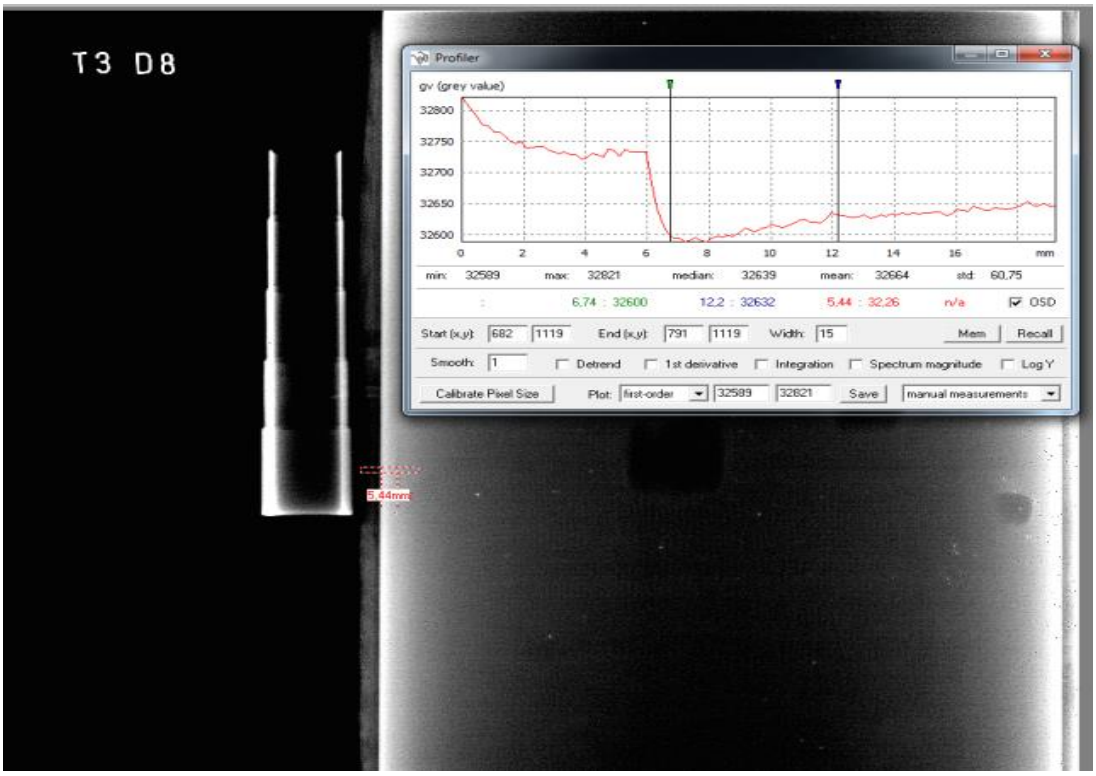


Figura A16. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 8 do CP3 – Grupo I.

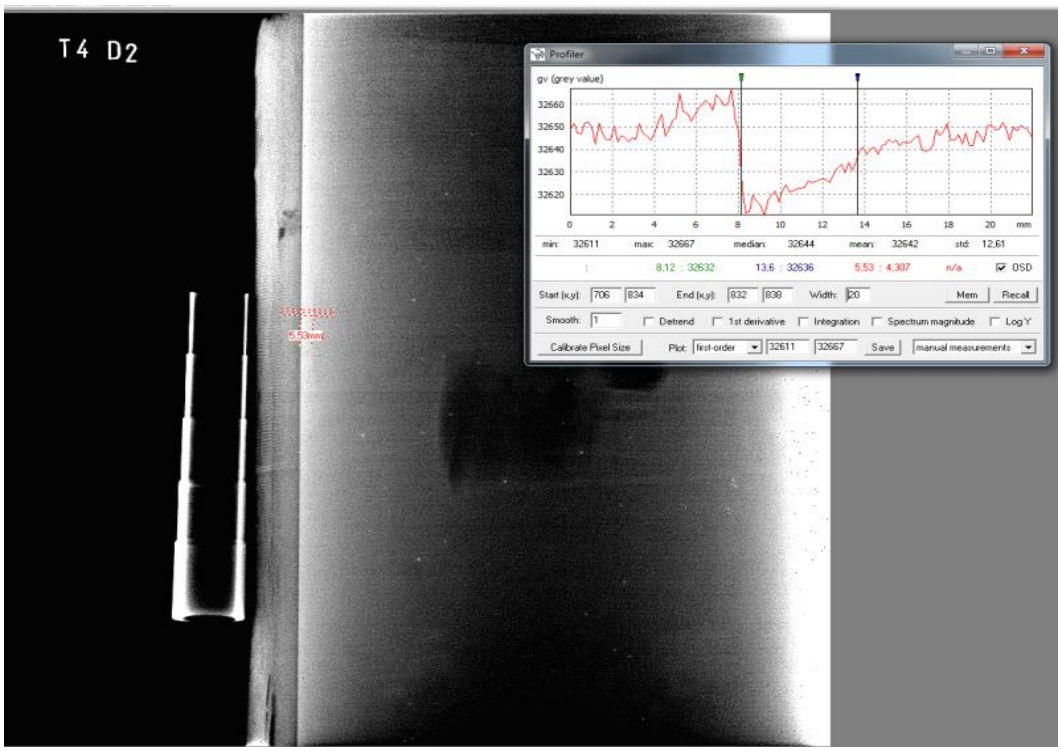


Figura A17. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 2 do CP4 – Grupo I.

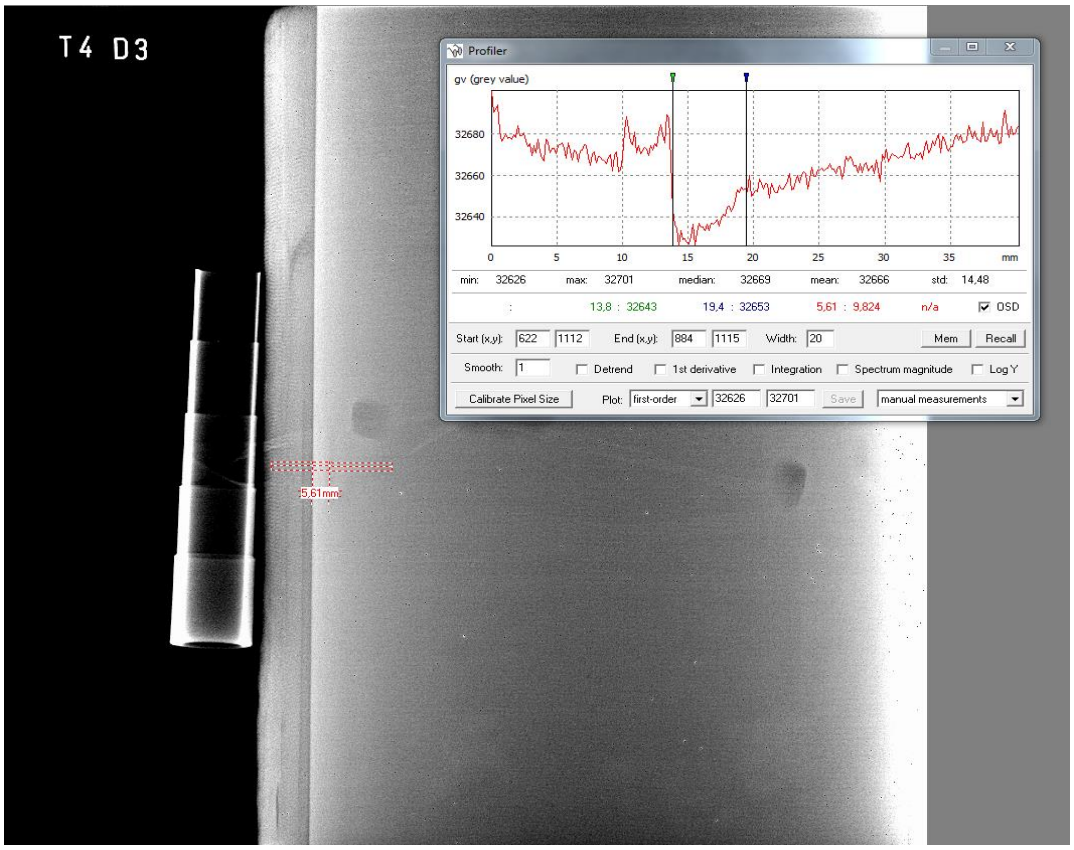
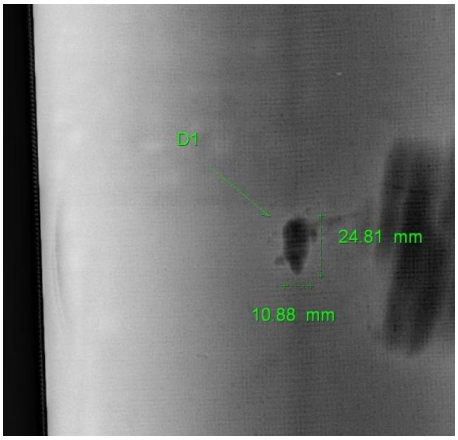
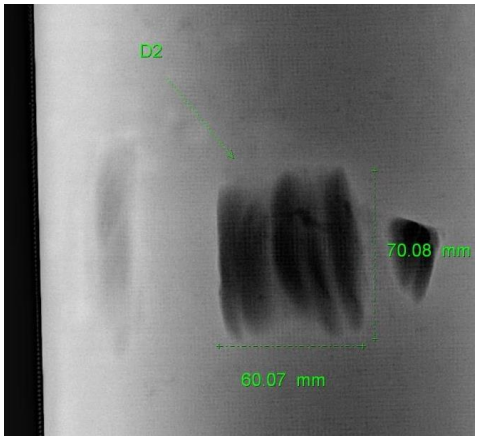


Figura A18. Imagem da medida de espessura remanescente para o defeito 3 do CP4 – Grupo I.

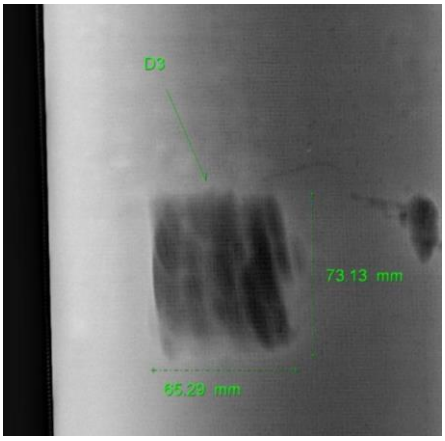
ANEXO B – Imagens das Medidas de Altura e Largura dos Defeitos dos CPs do Grupo I



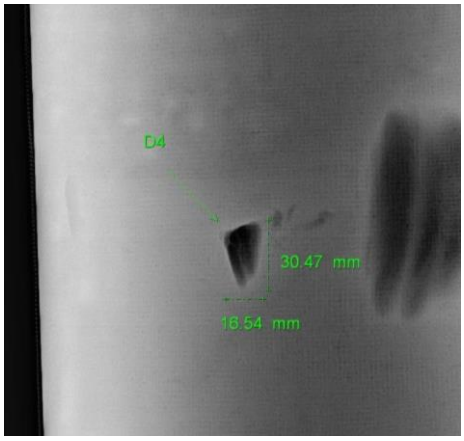
(a)



(b)

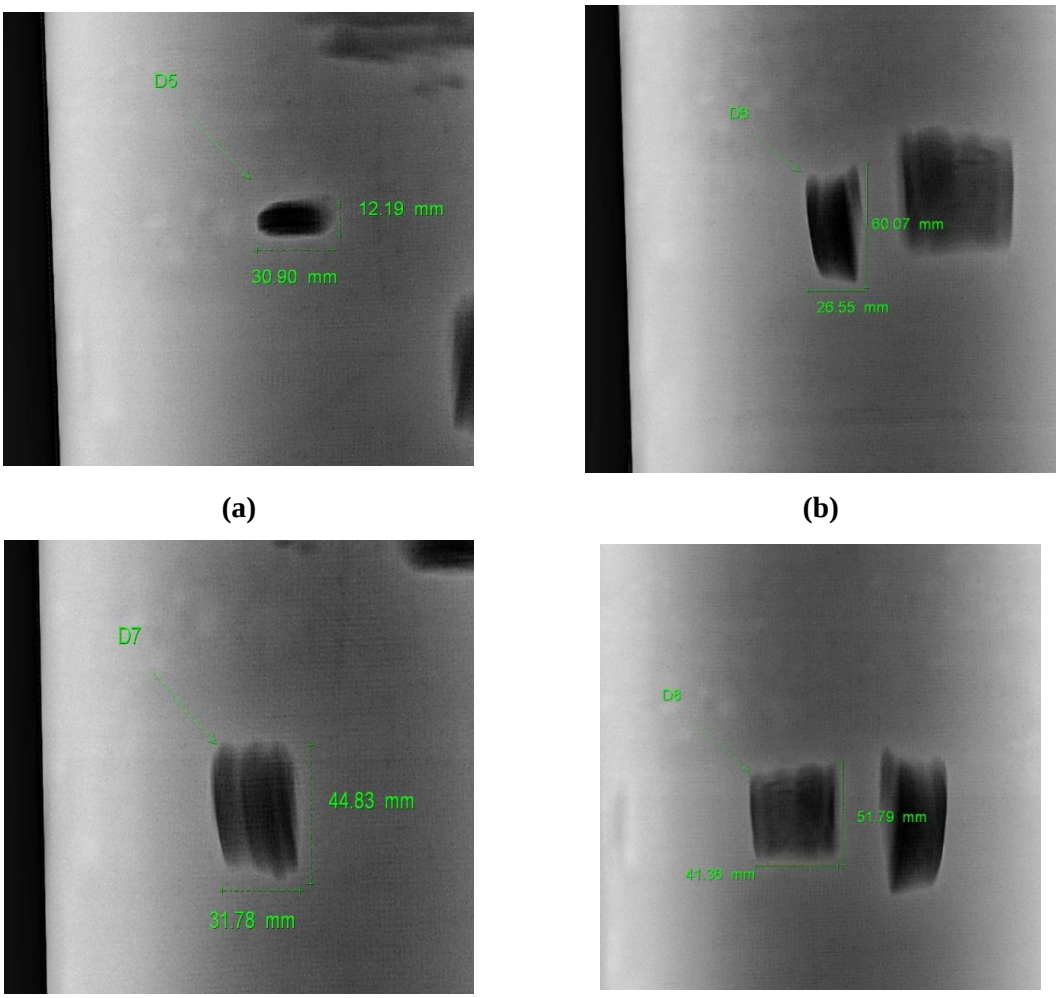


(c)



(d)

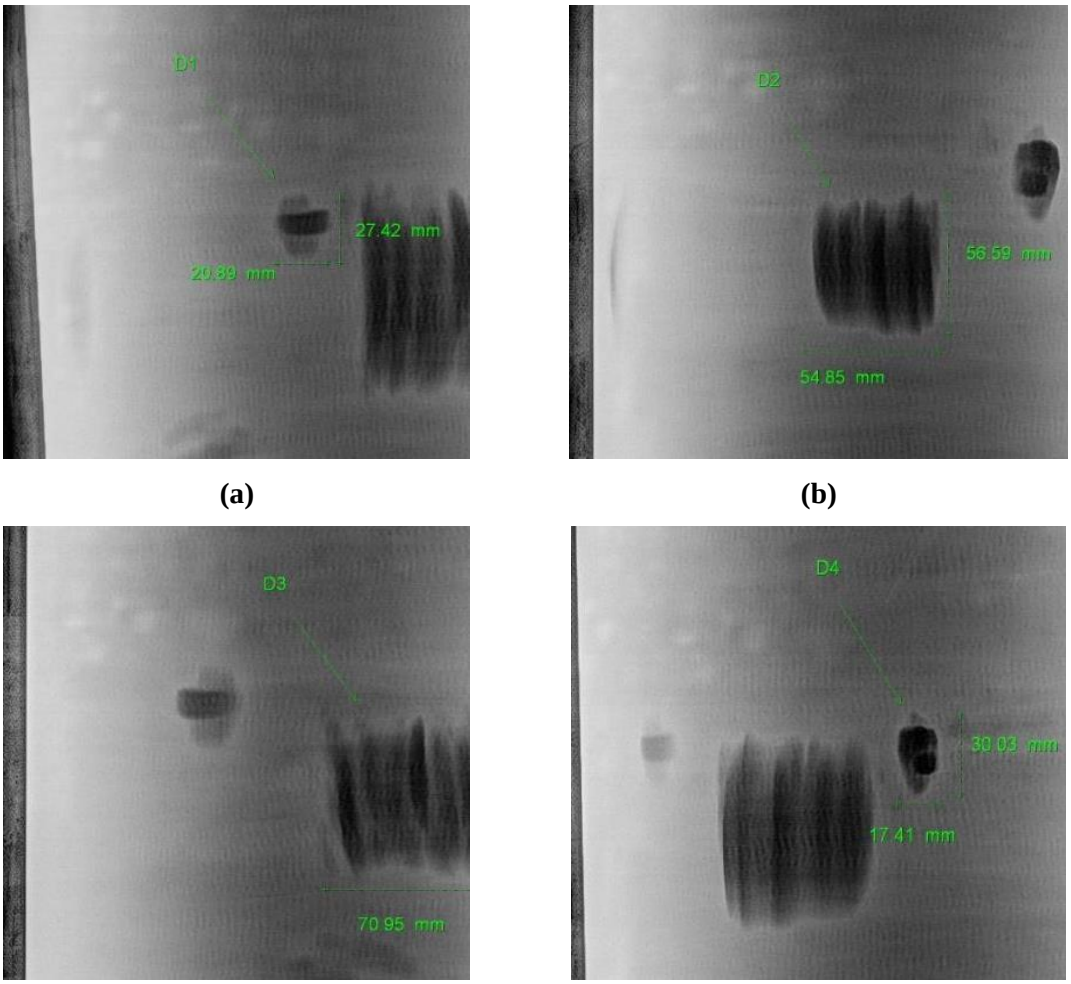
Figura B1. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d), do CP1 – Grupo I.



(a) **(b)**

(c) **(d)**

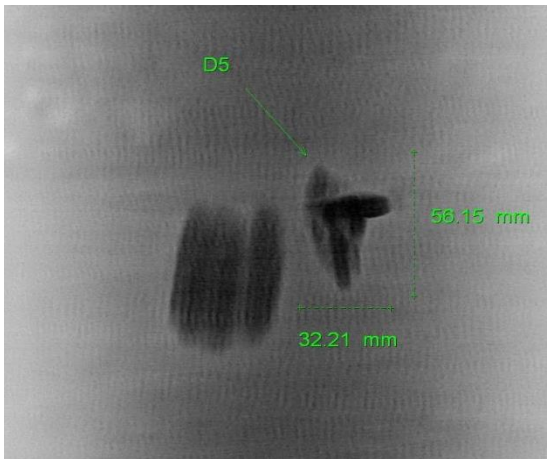
Figura B2. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e 8 (d), do CP1 – Grupo I.



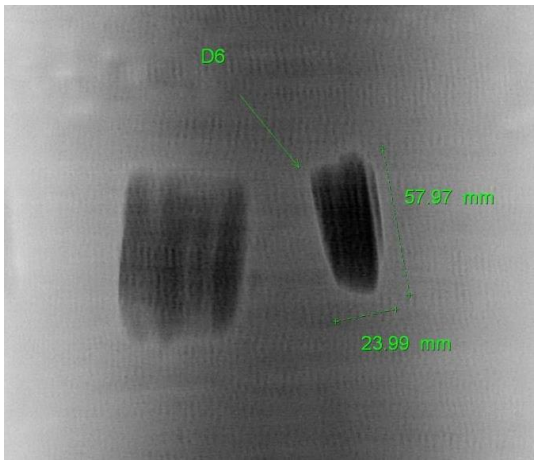
(a) **(b)**

(c) **(d)**

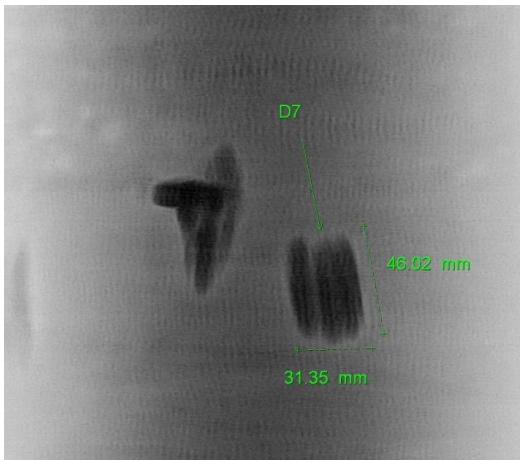
Figura B3. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d), do CP2 – Grupo I.



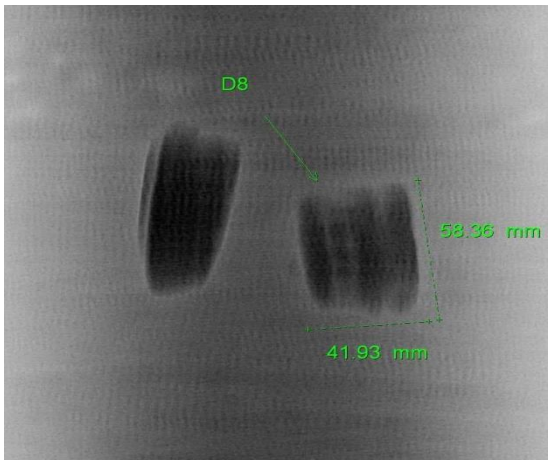
(a)



(b)

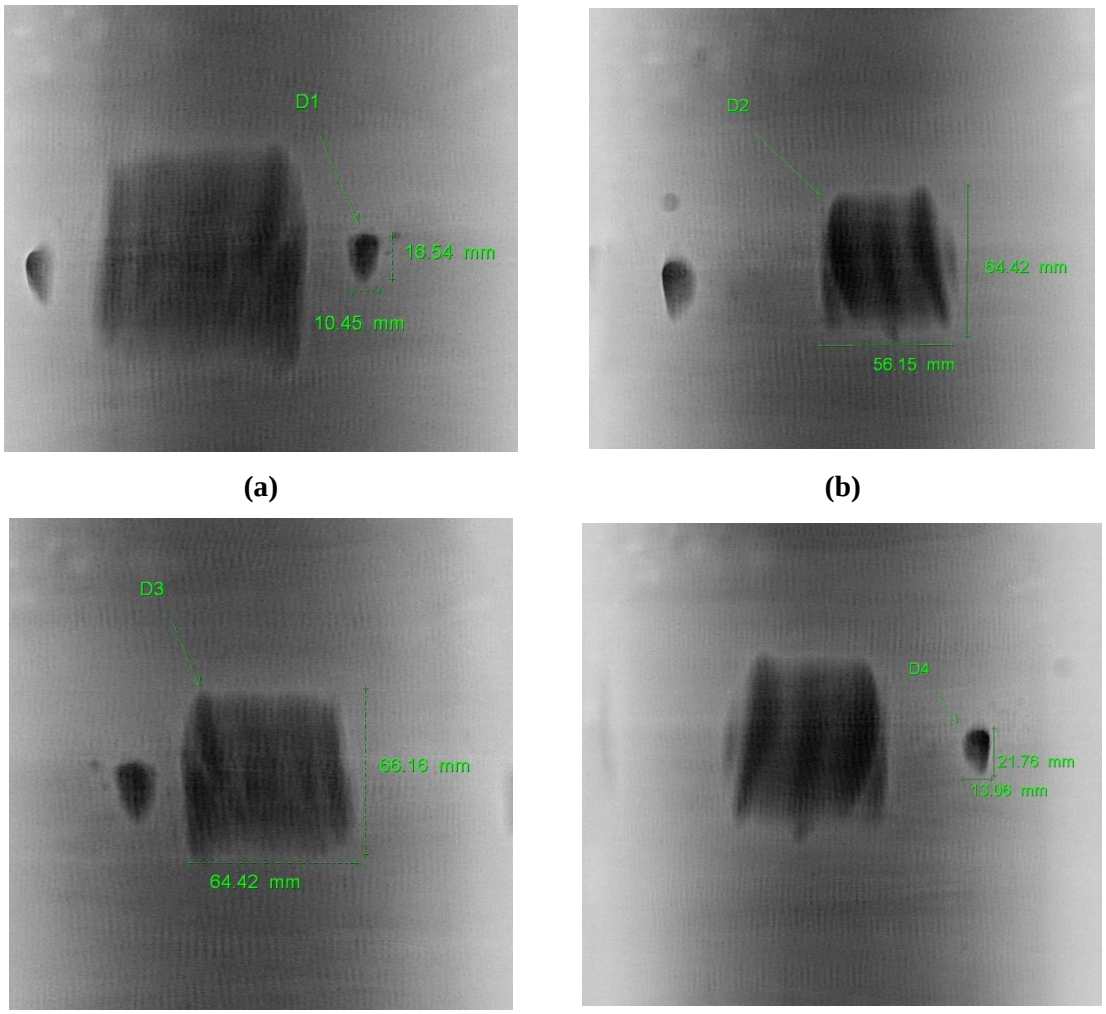


(c)



(d)

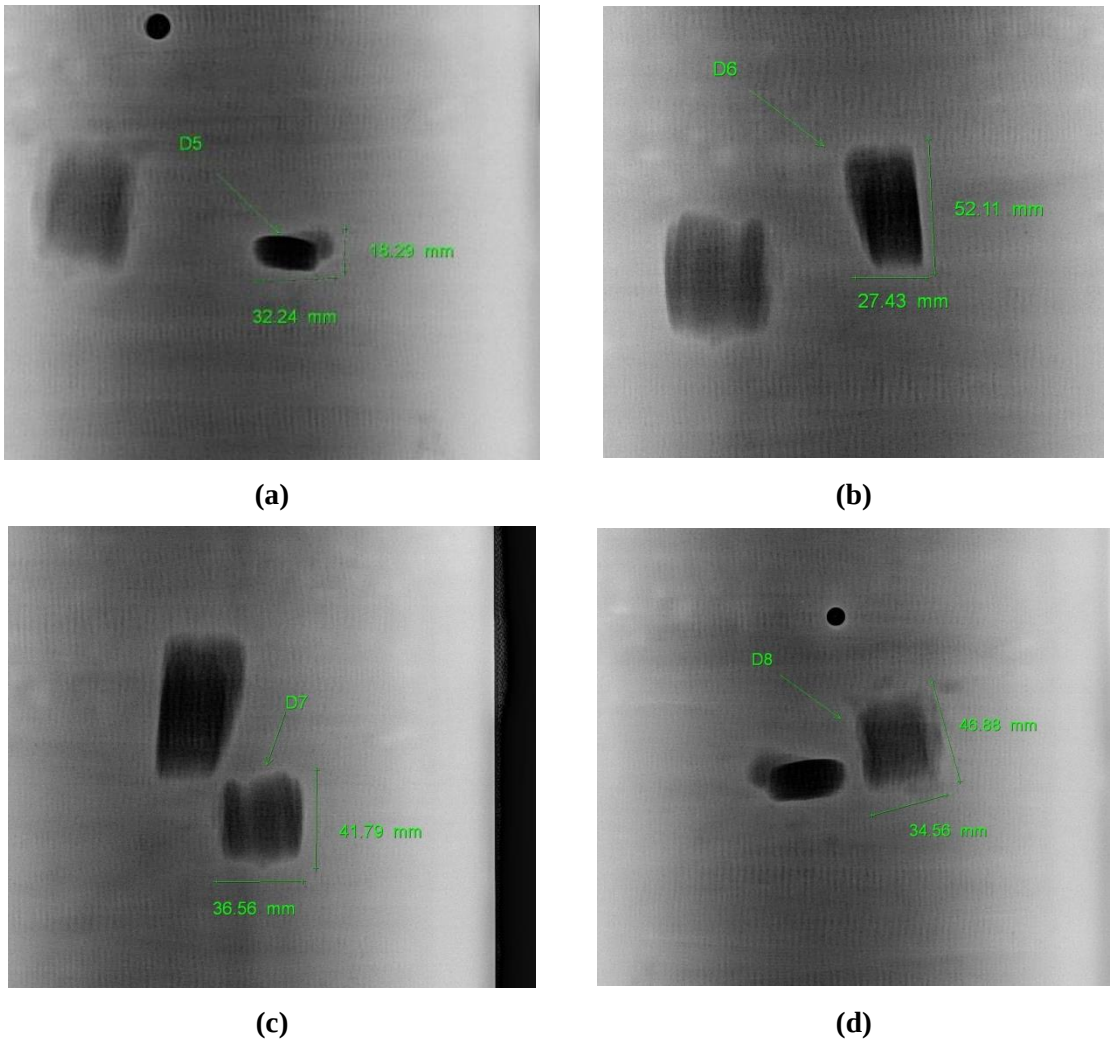
Figura B4. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e 8 (d), do CP2 – Grupo I.



(a) **(b)**

(c) **(d)**

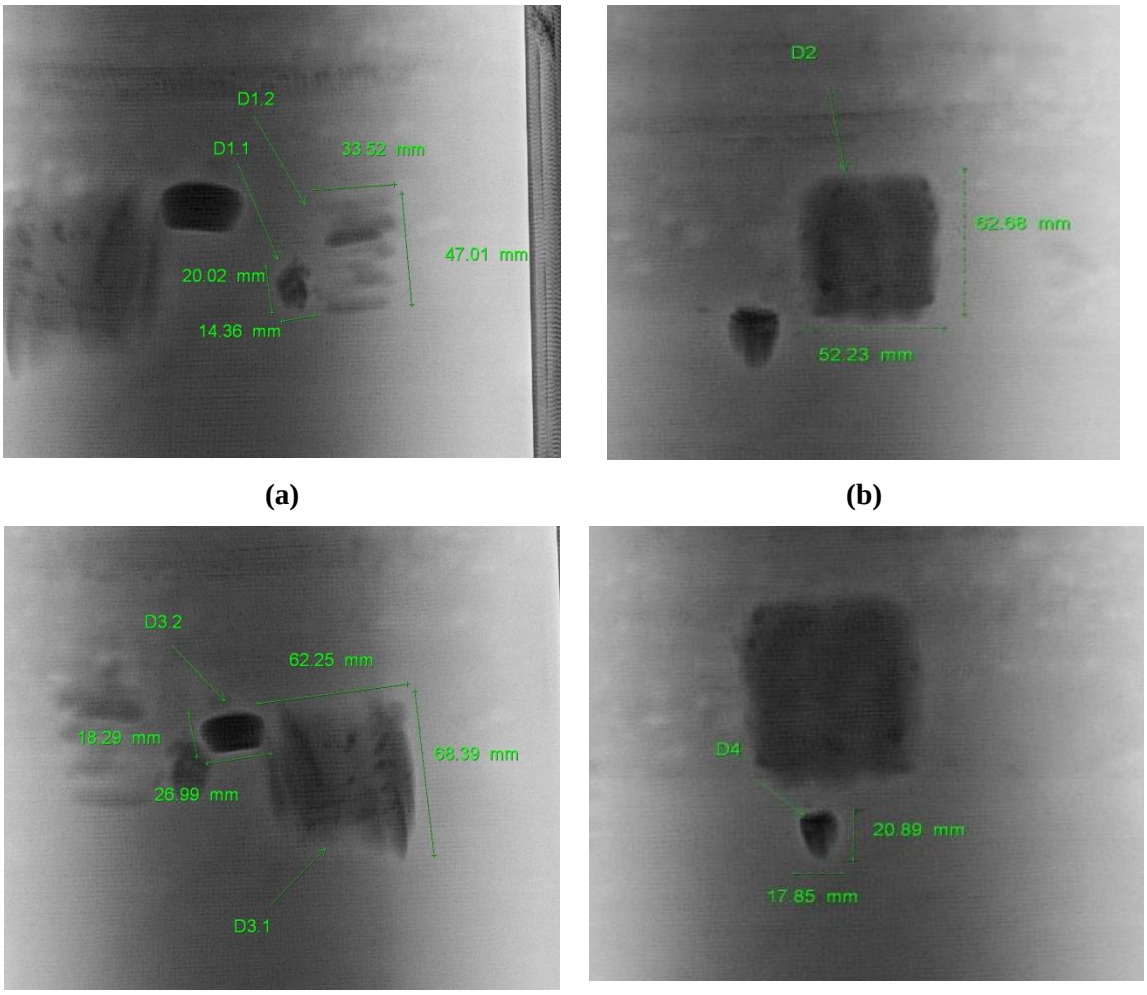
Figura B5. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d), do CP3 – Grupo I.



(a) **(b)**

(c) **(d)**

Figura B6. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e 8 (d), do CP3 – Grupo I.



(a) **(b)**

(c) **(d)**

Figura B7. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d), do CP4 – Grupo I.

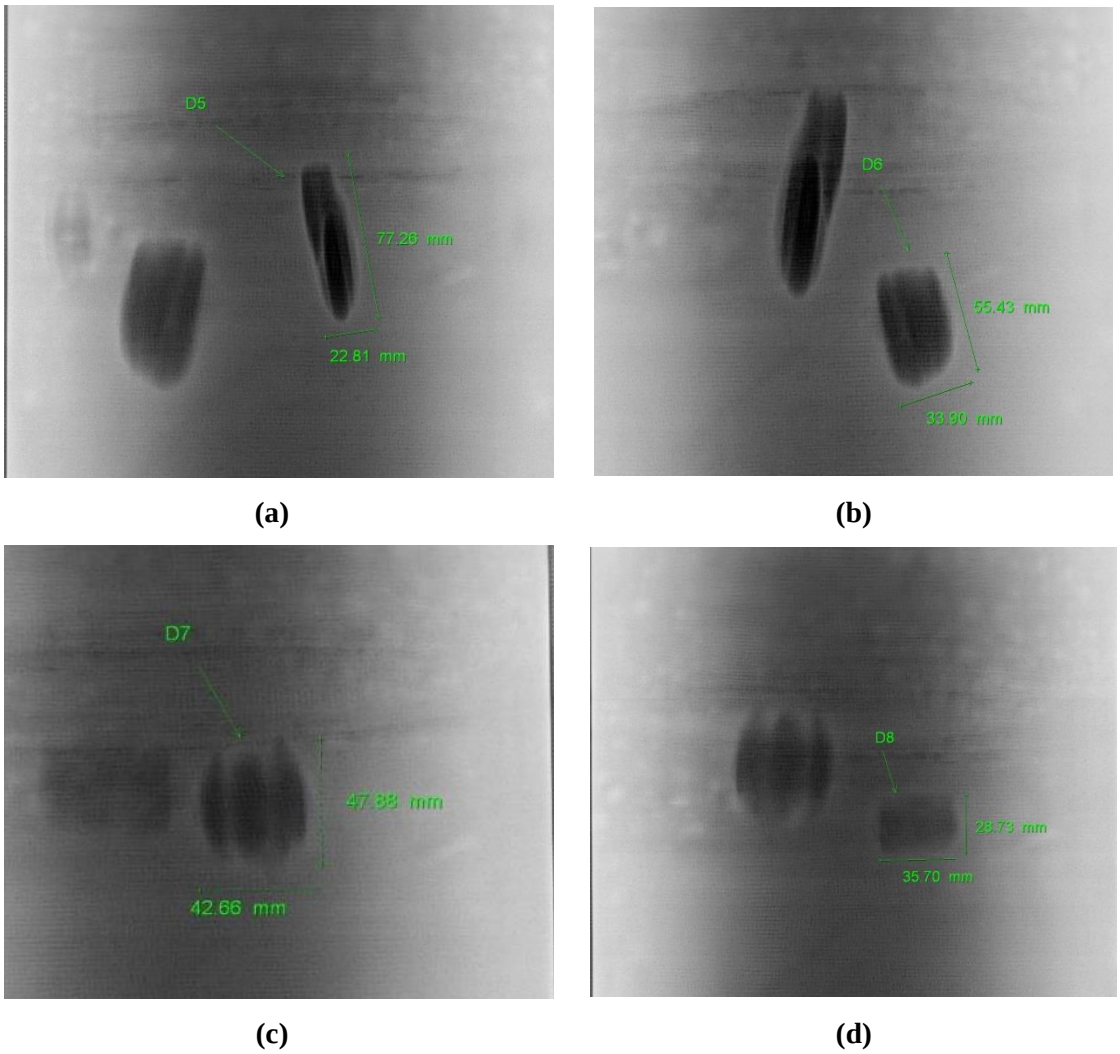


Figura B8. Imagens das medidas de altura e largura dos defeitos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e 8 (d), do CP4 – Grupo I.

ANEXO C – Imagens das Medidas de Espessura dos Defeitos dos CPs do Grupo II – Com fonte de Raio X

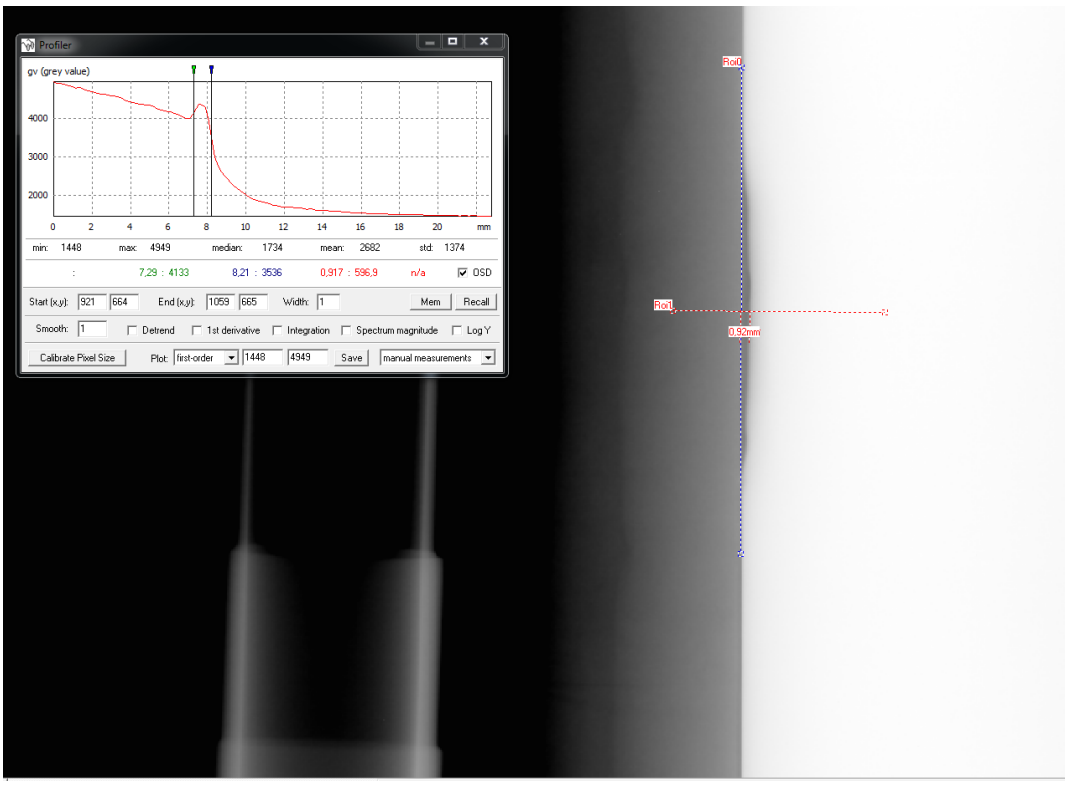


Figura C1. Imagem da medida de profundidade para o defeito 2 do CP1 – Grupo II.

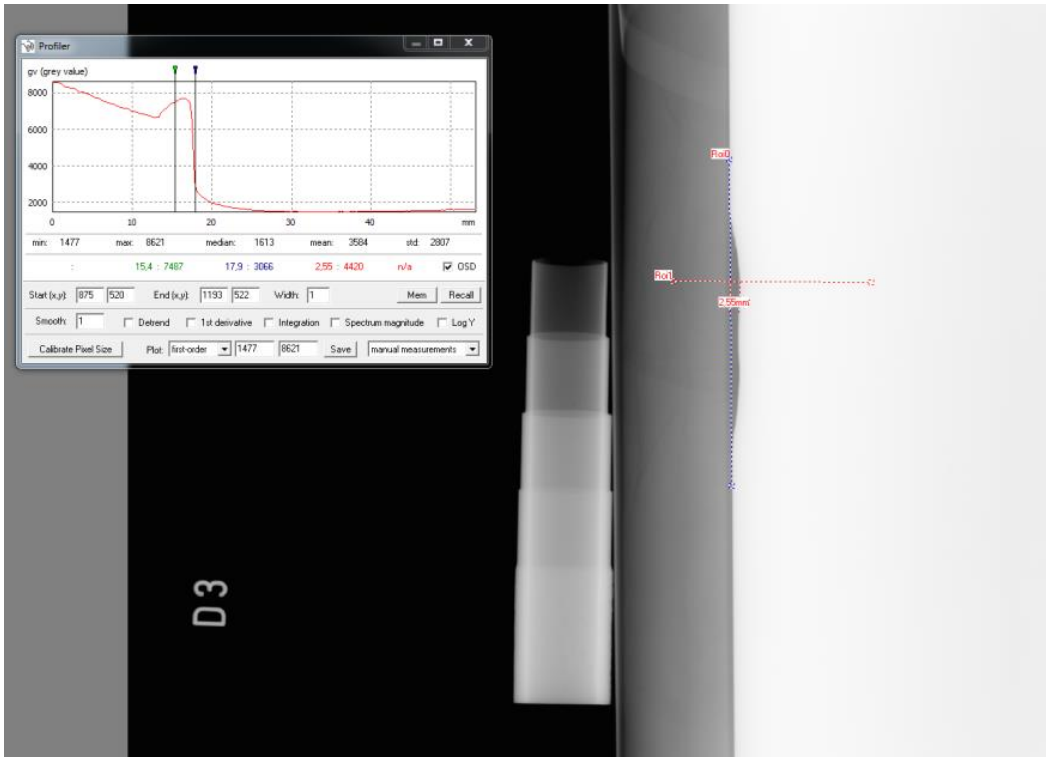


Figura C2. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP1 – Grupo II.

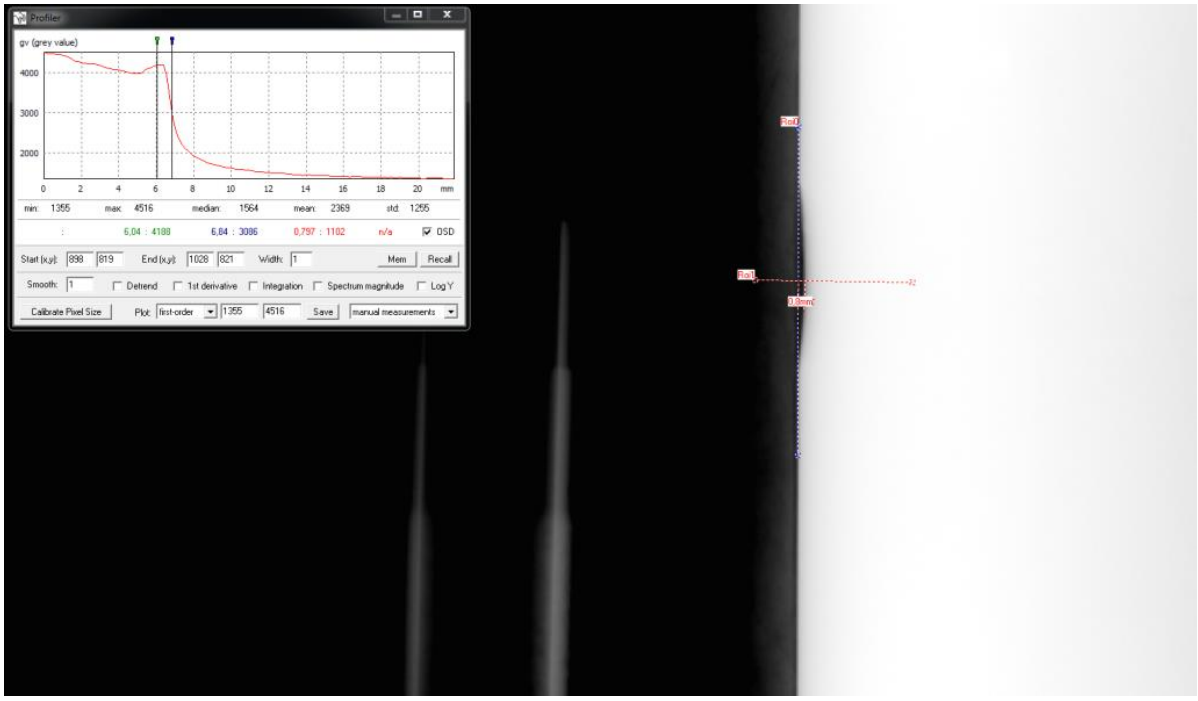


Figura C3. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP1 – Grupo II.

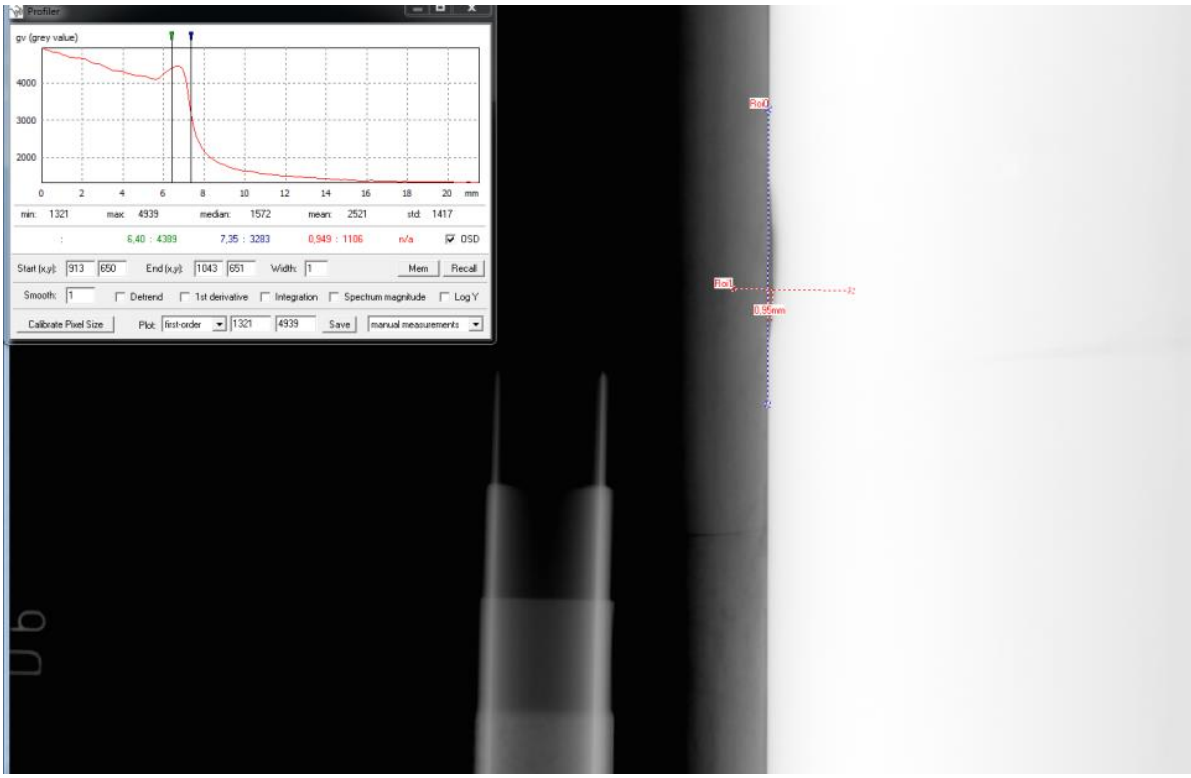


Figura C4. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP1 – Grupo II.

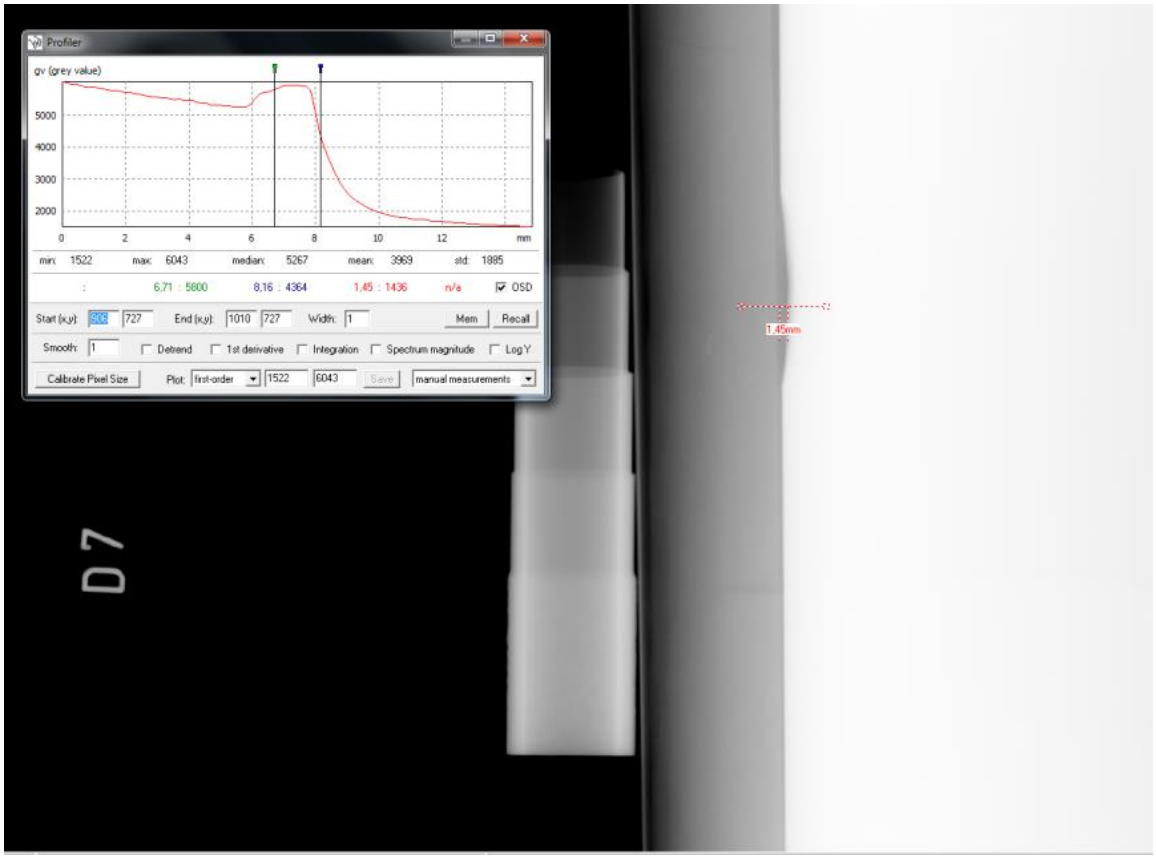


Figura C5. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP1 – Grupo II.

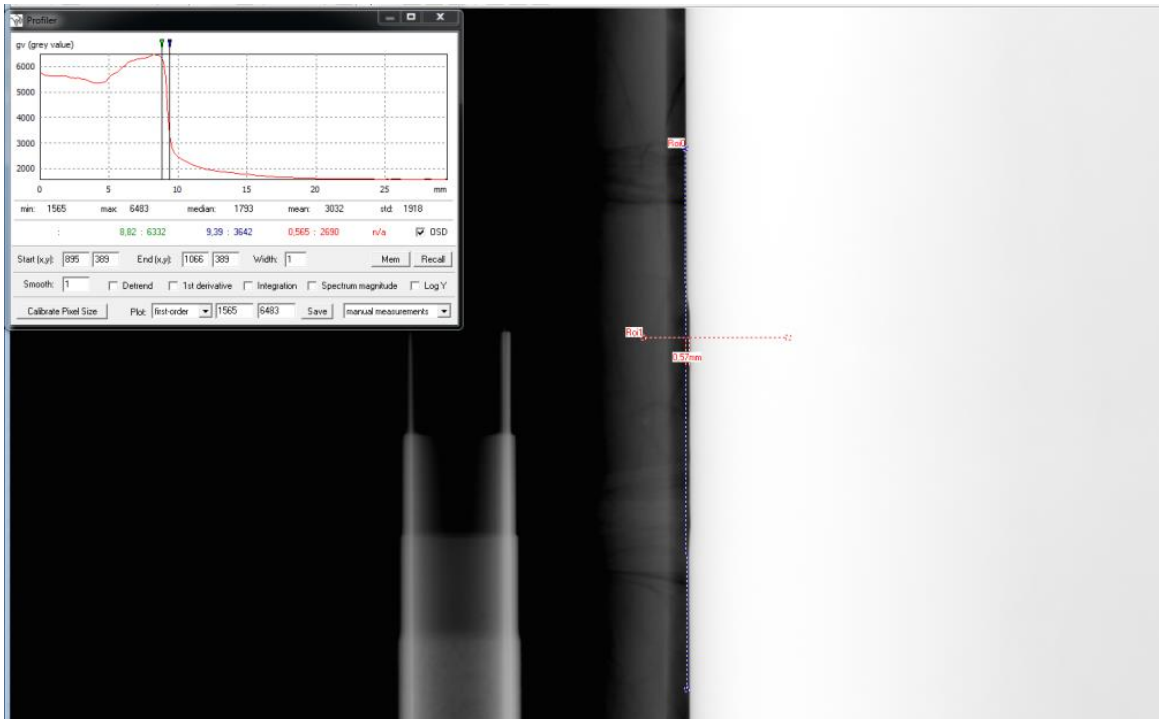


Figura C6. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP1 – Grupo II.

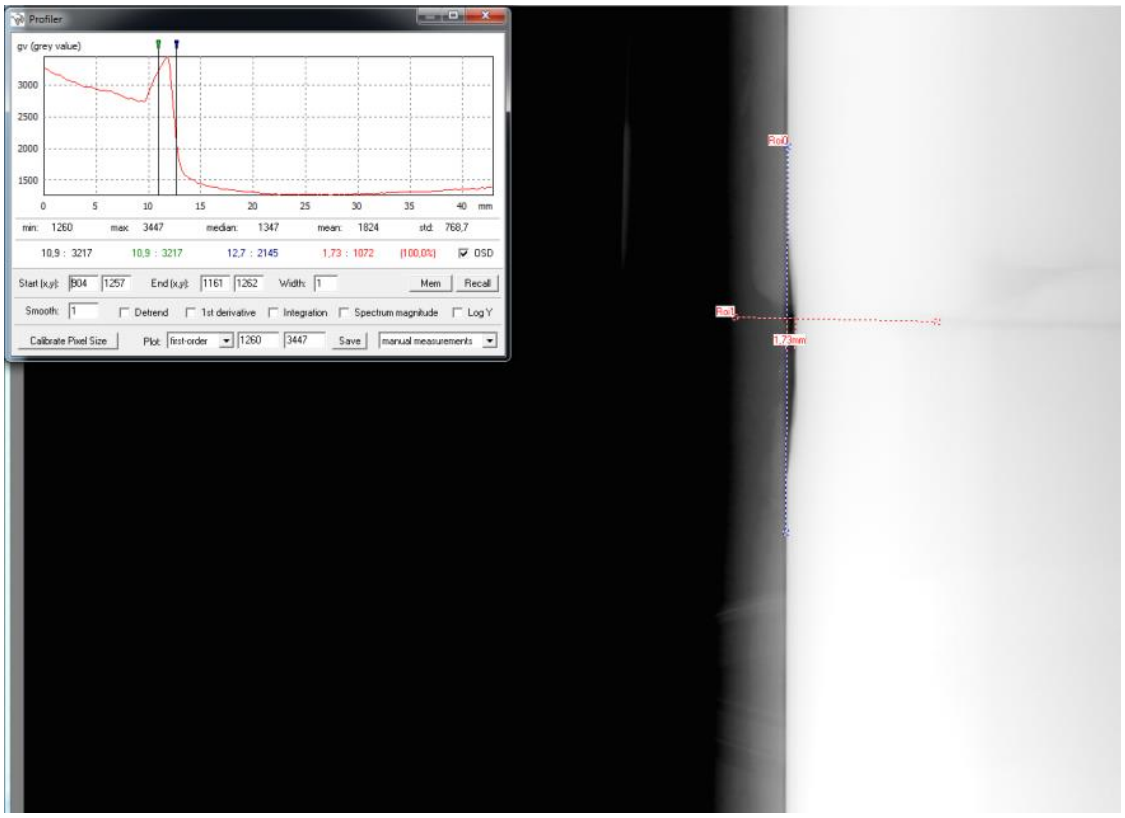


Figura C7. Imagem da medida de profundidade para o defeito 2 do CP2 – Grupo II.

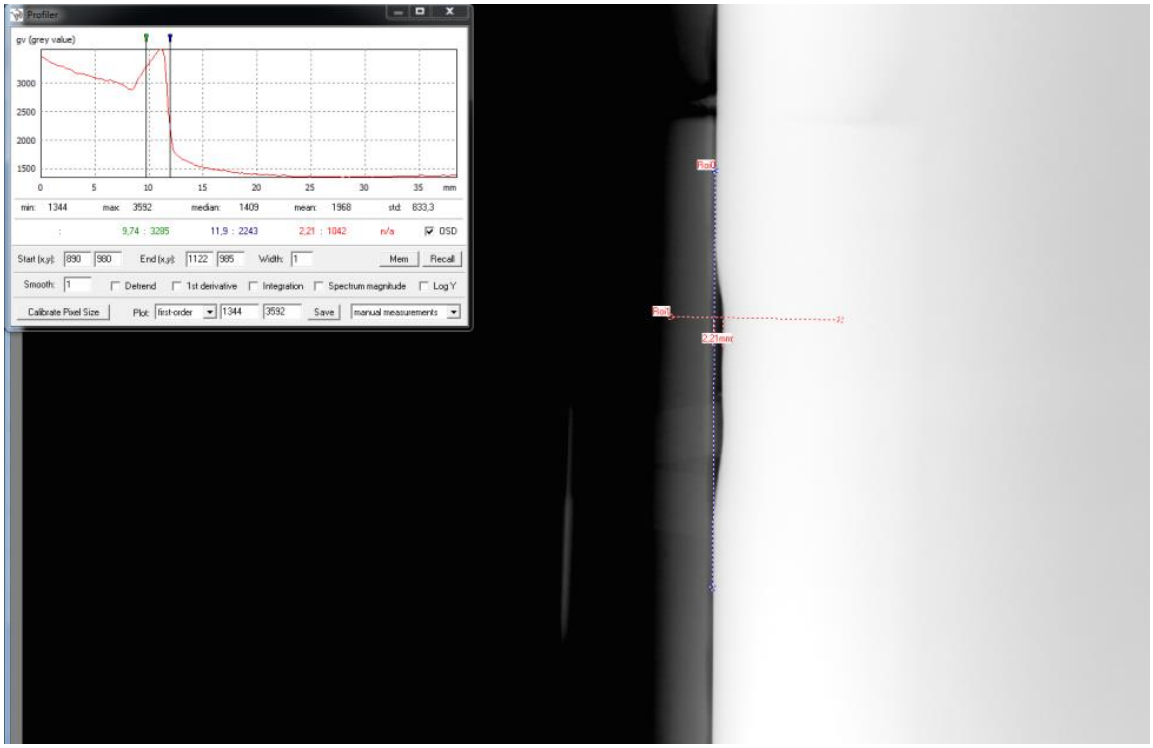


Figura C8. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP2 – Grupo II.

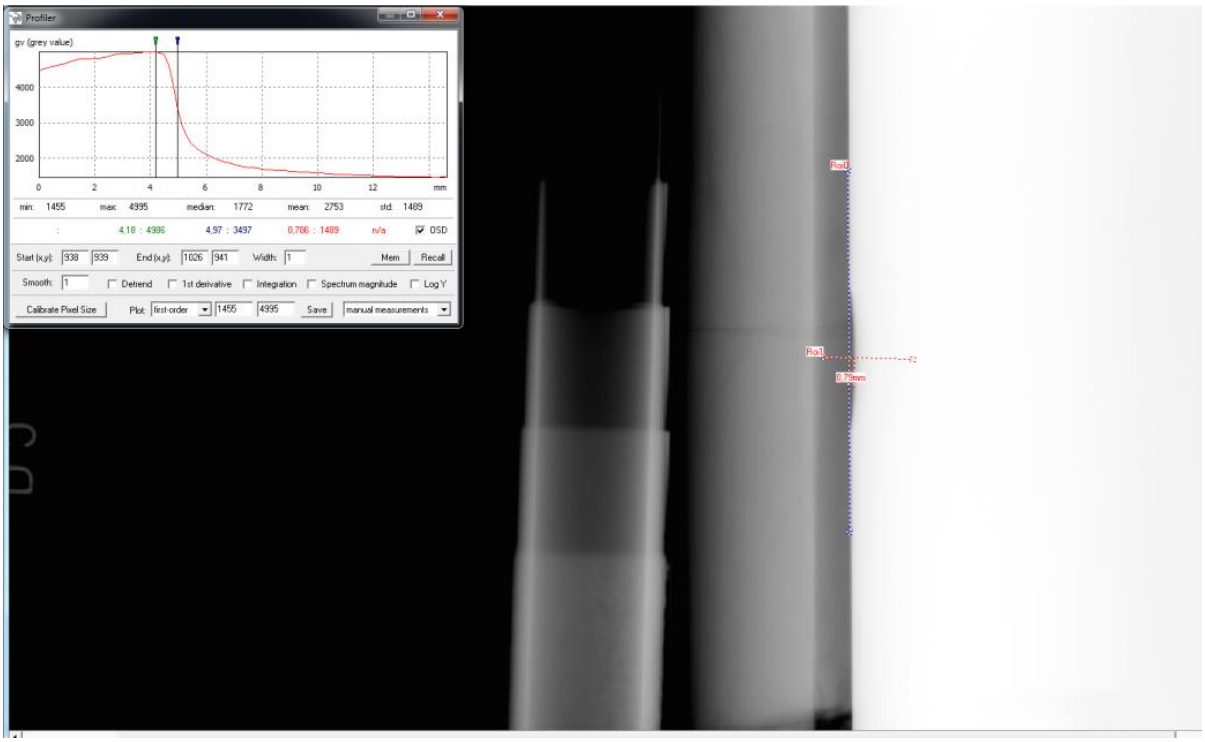


Figura C9. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP2 – Grupo II.

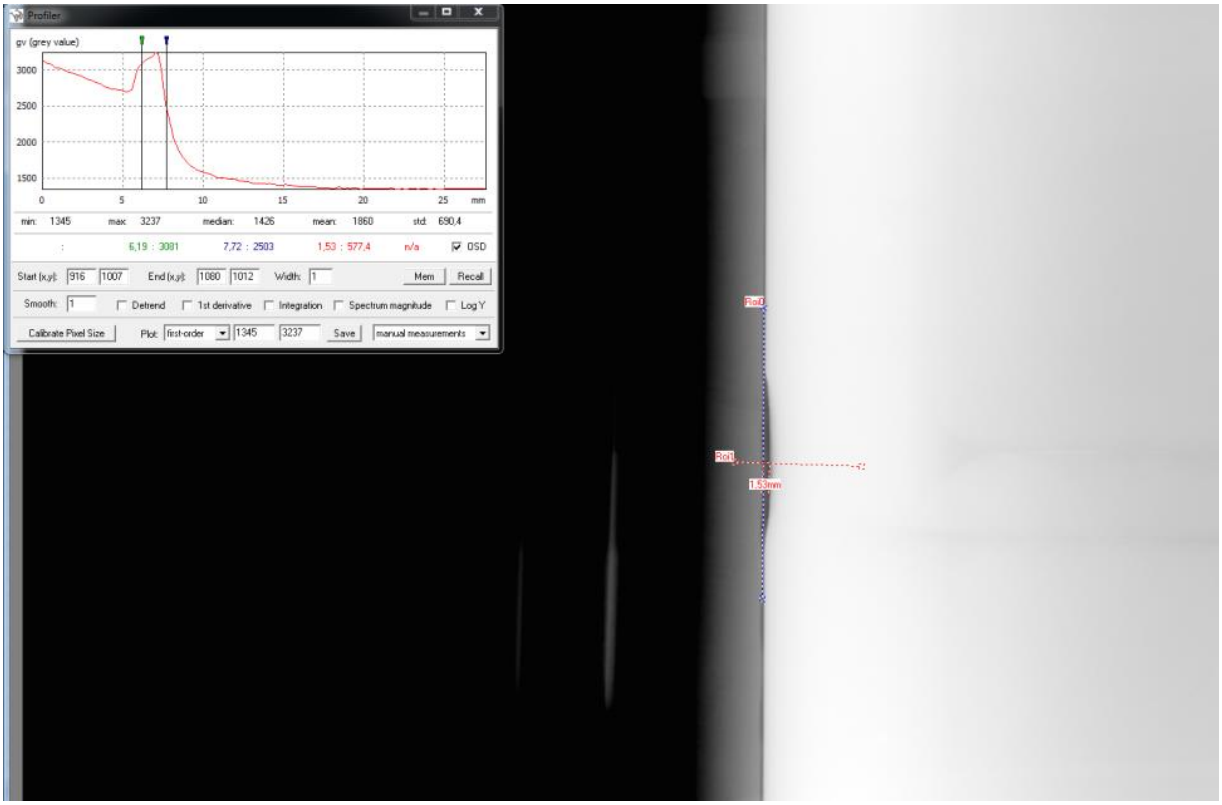


Figura C10. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP2 – Grupo II.

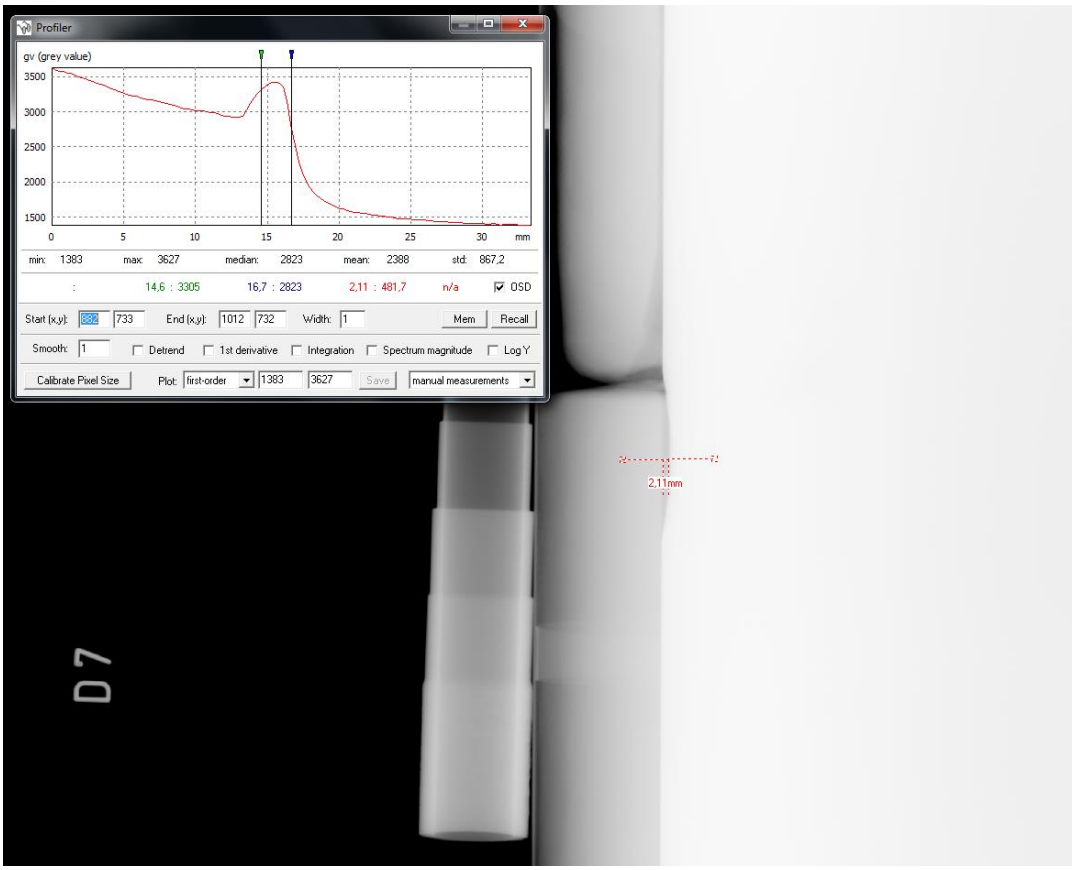


Figura C11. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP2 – Grupo II.

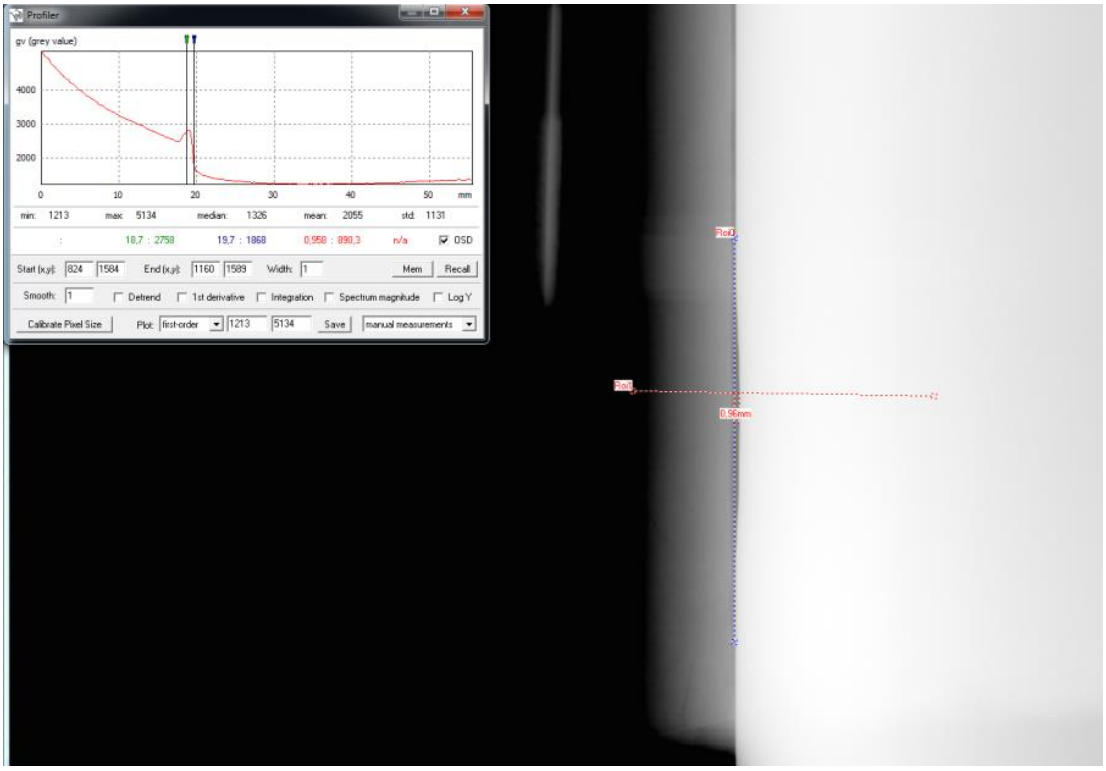


Figura C12. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP2 – Grupo II.

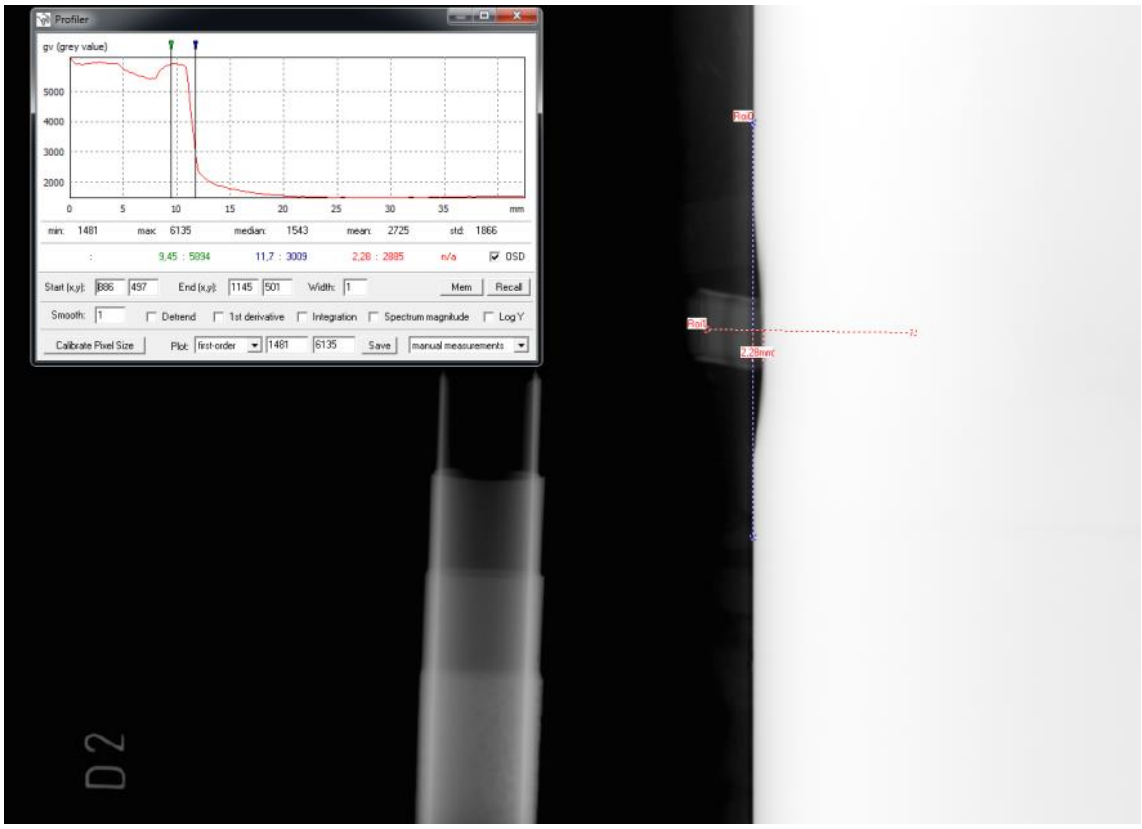


Figura C13. Imagem da medida de profundidade para o defeito 2 do CP3 – Grupo II.

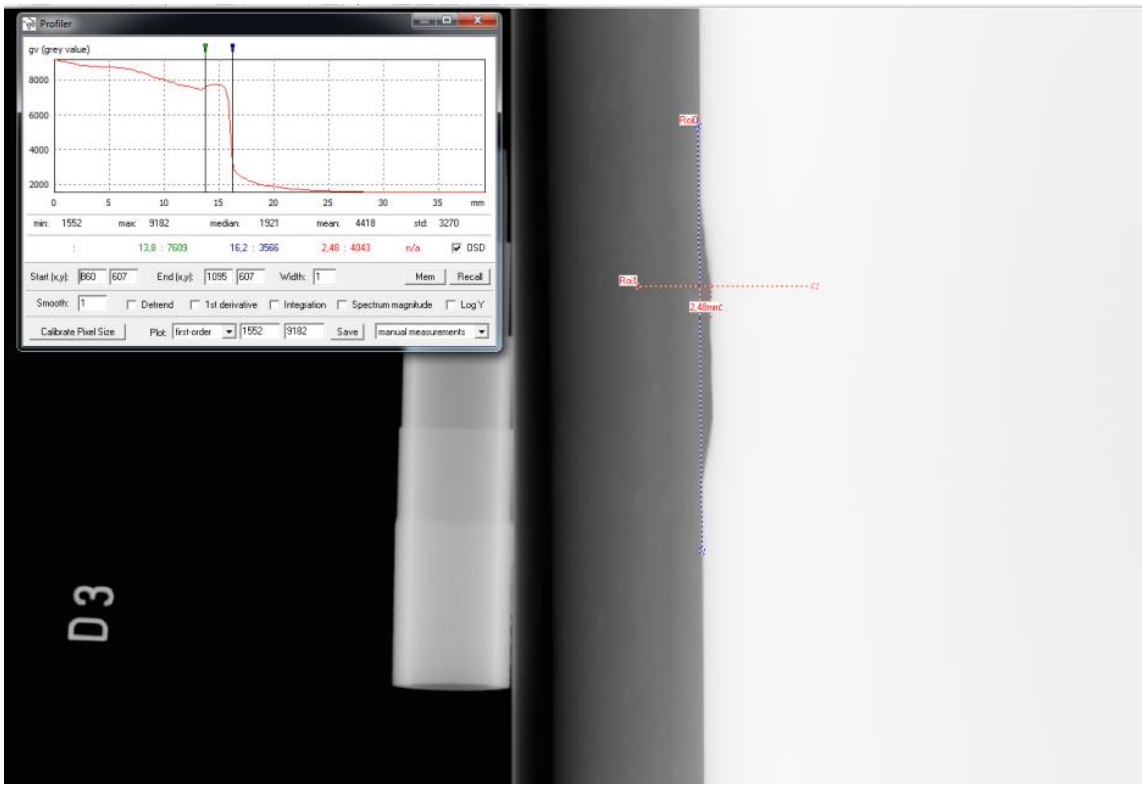


Figura C14. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP3 – Grupo II.

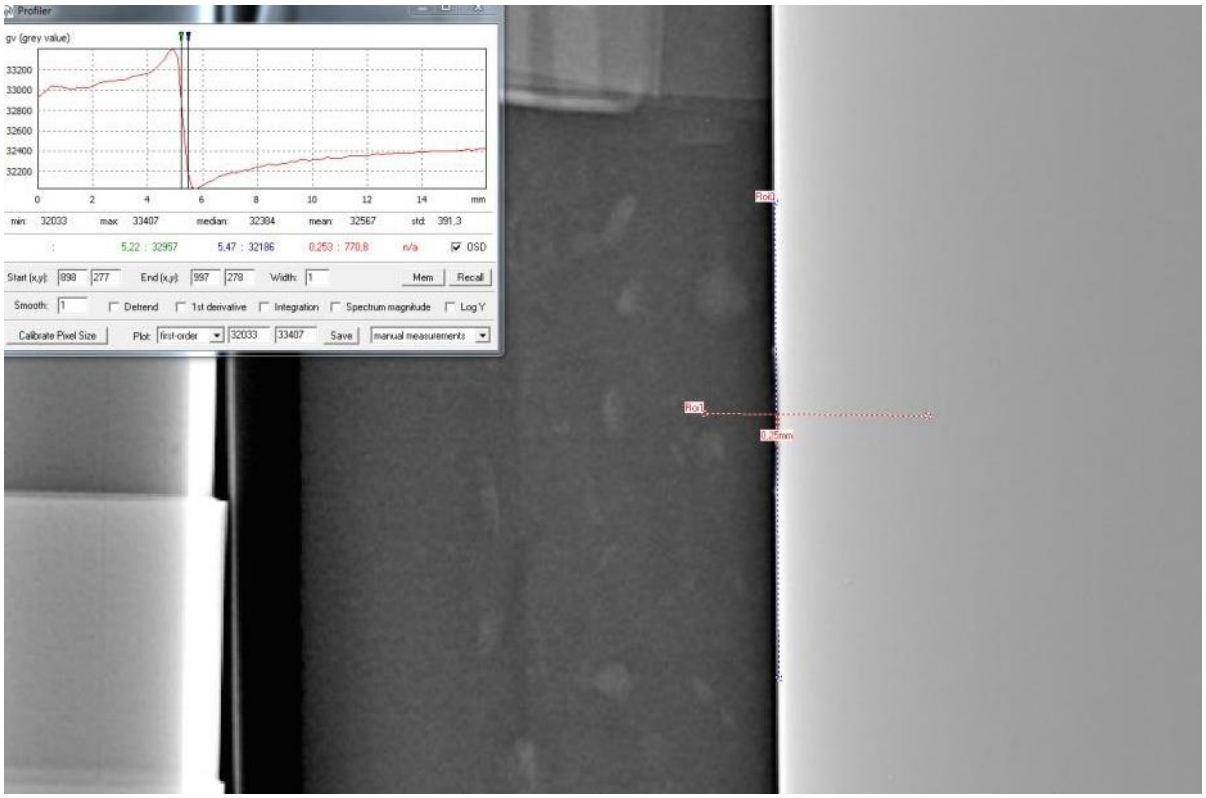


Figura C15. Imagem da medida de profundidade para o defeito 4 do CP3 – Grupo II.

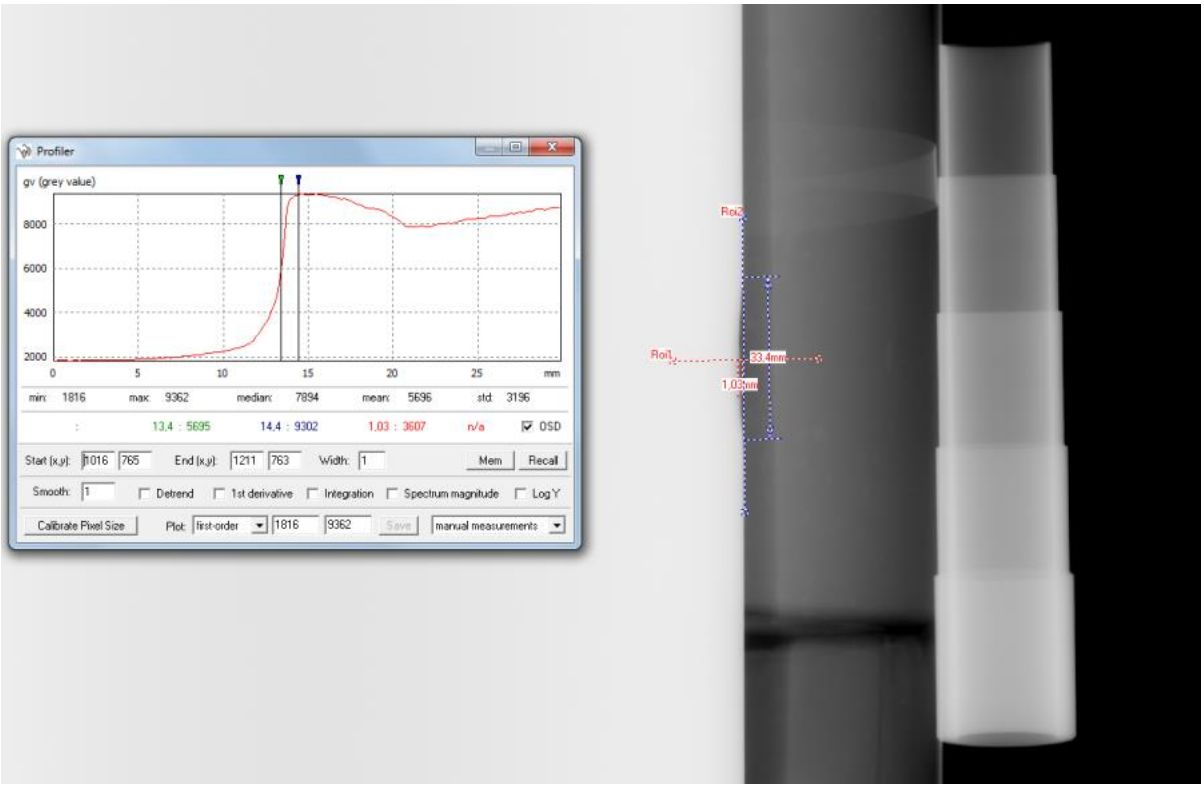


Figura C16. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP3 – Grupo II.

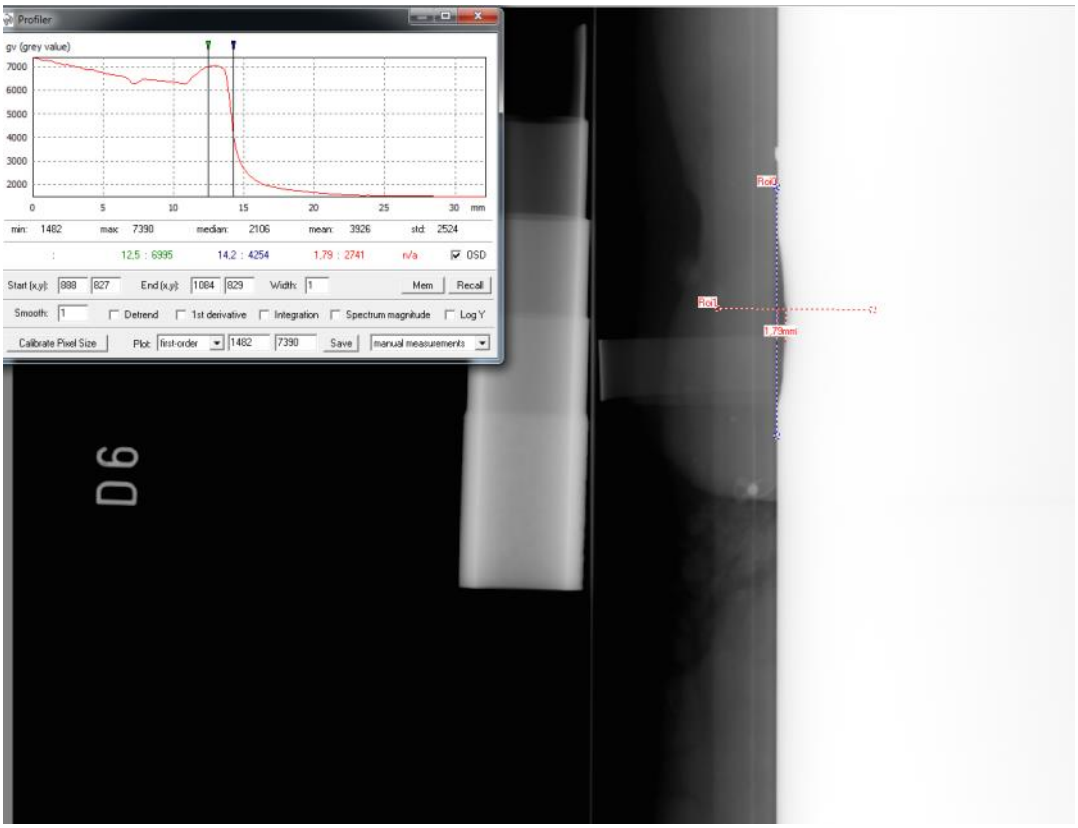


Figura C17. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP3 – Grupo II.

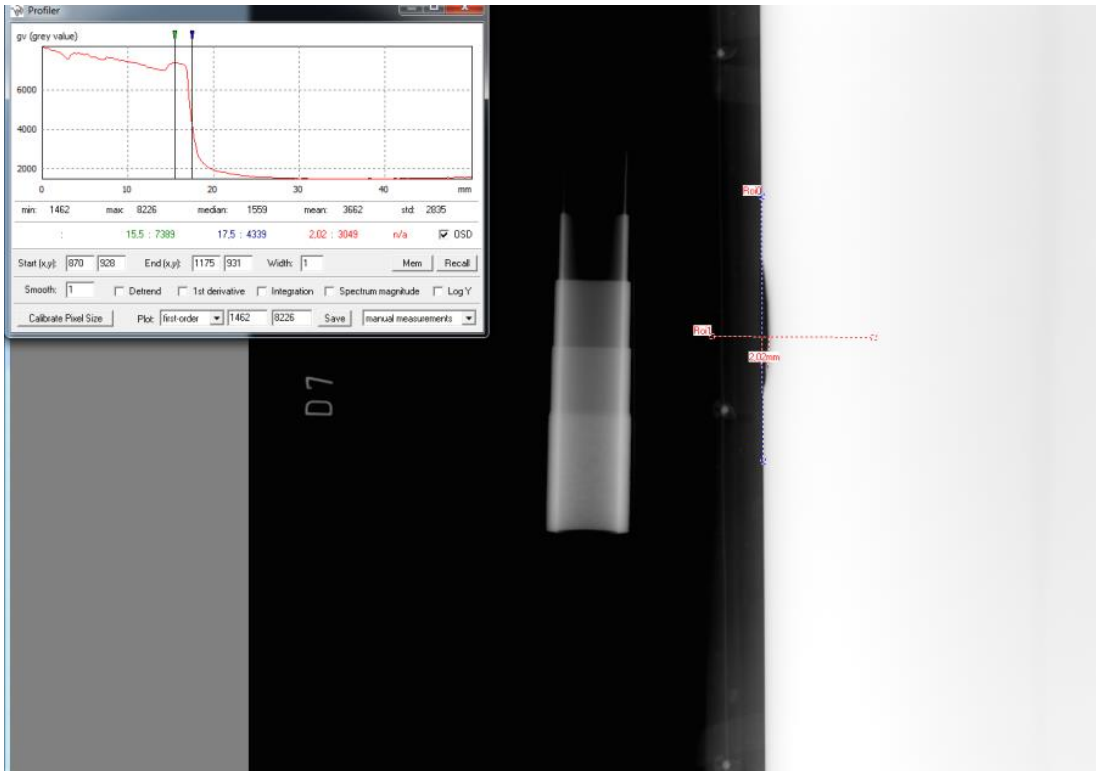


Figura C18. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP3 – Grupo II.

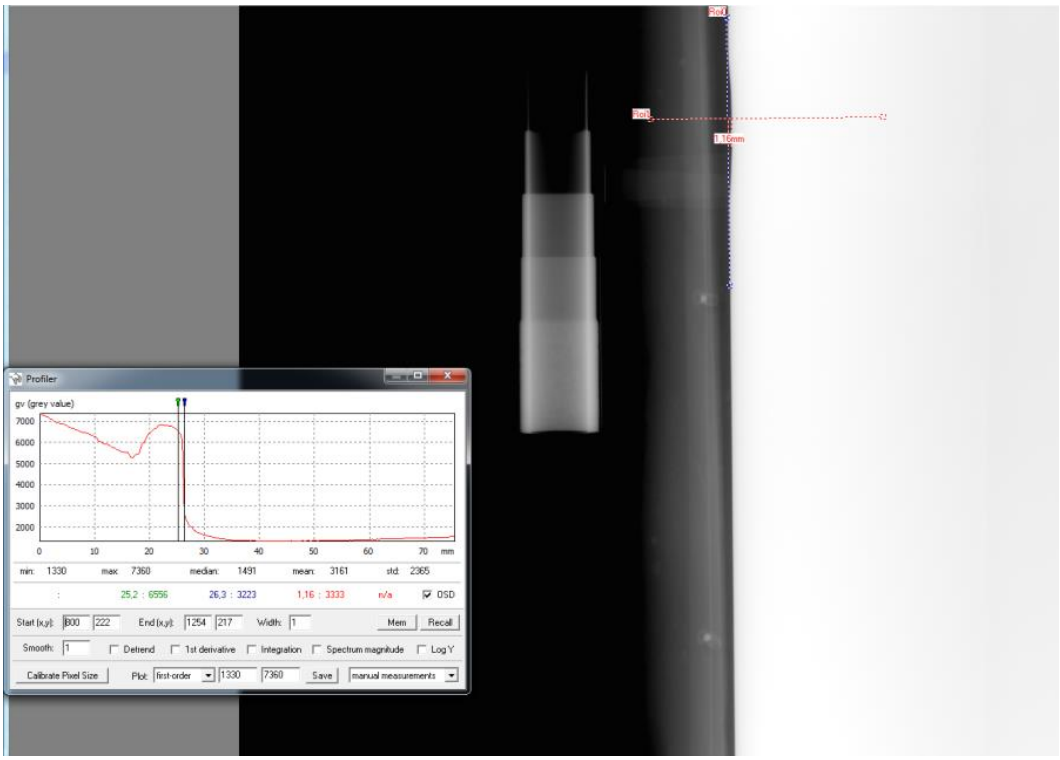


Figura C19. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP3 – Grupo II.

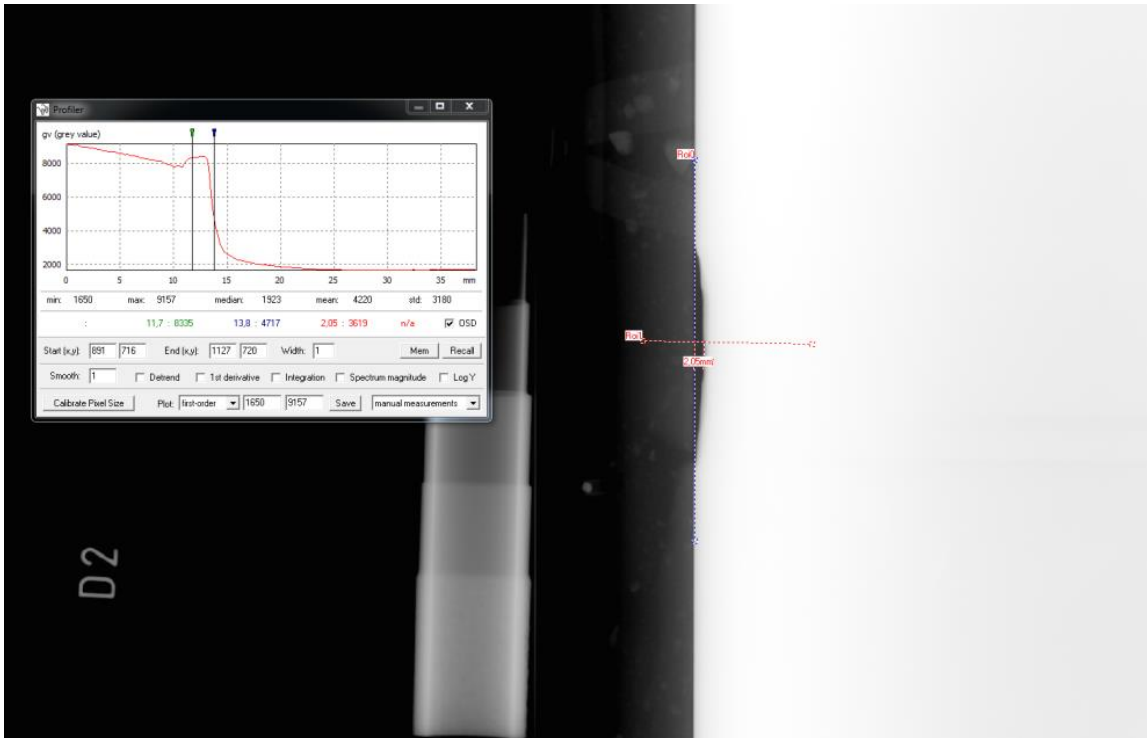


Figura C20. Imagem da medida de profundidade para o defeito 2 do CP4 – Grupo II.

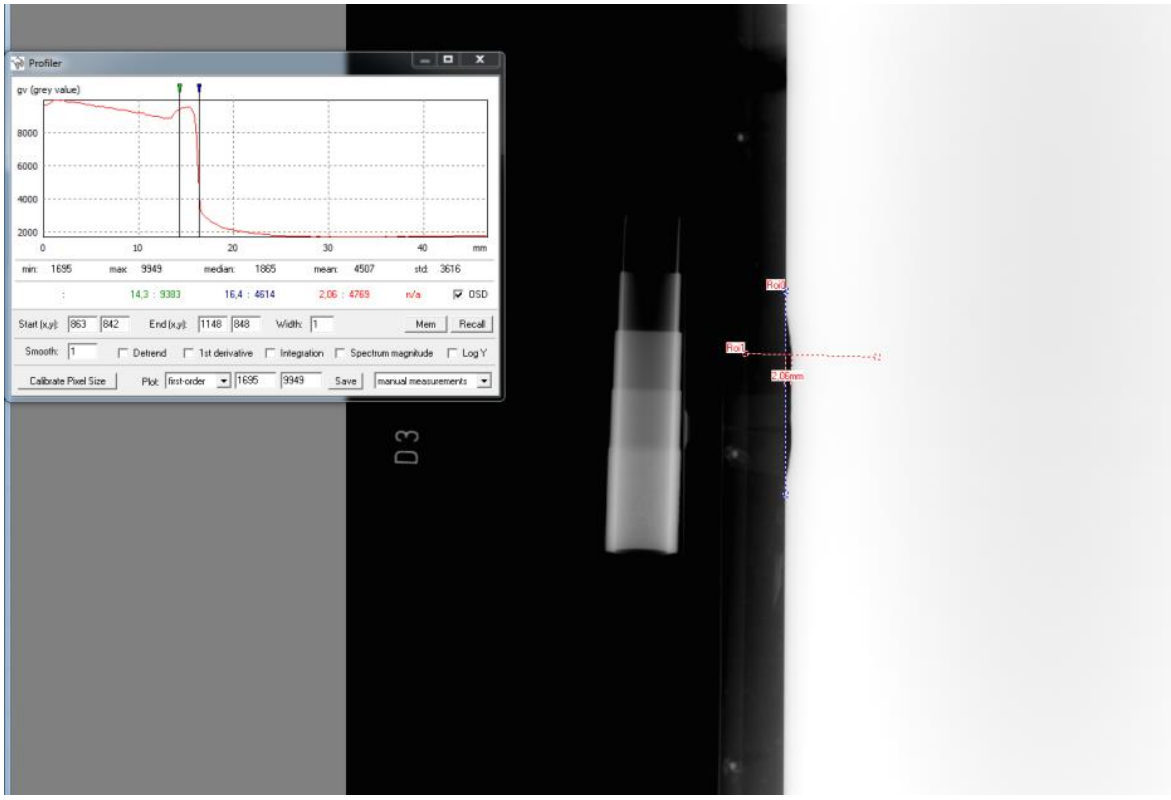


Figura C21. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP4 – Grupo II.

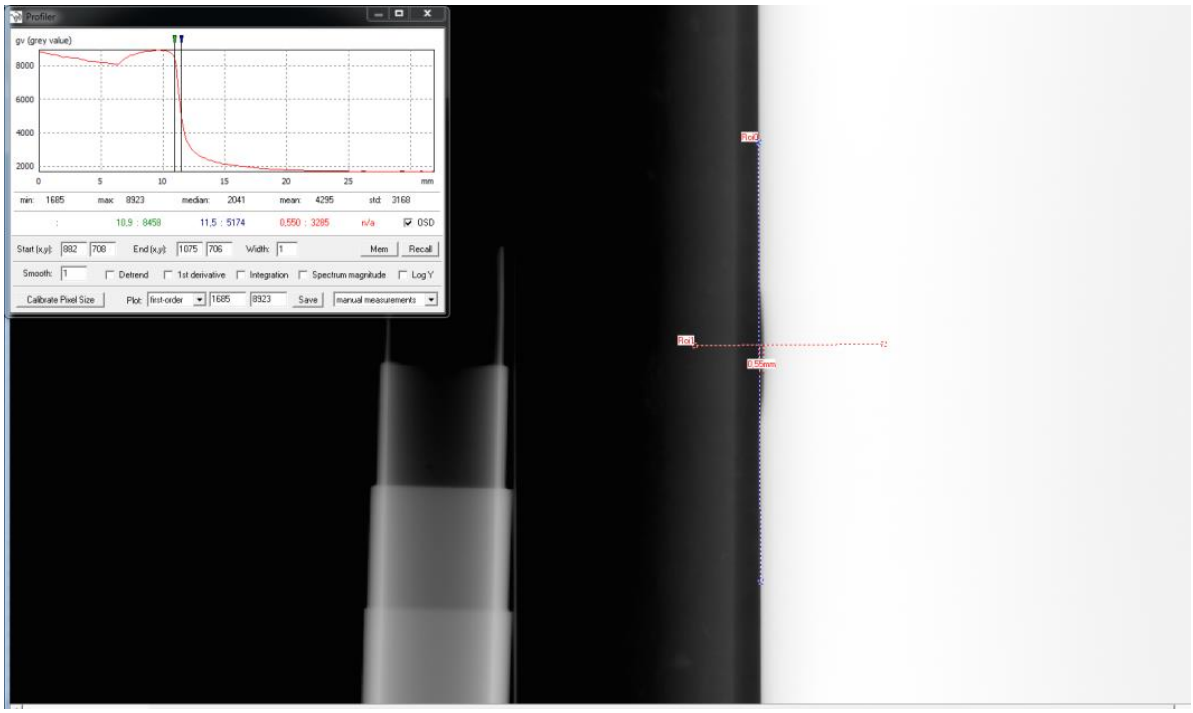


Figura C22. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP4 – Grupo II.

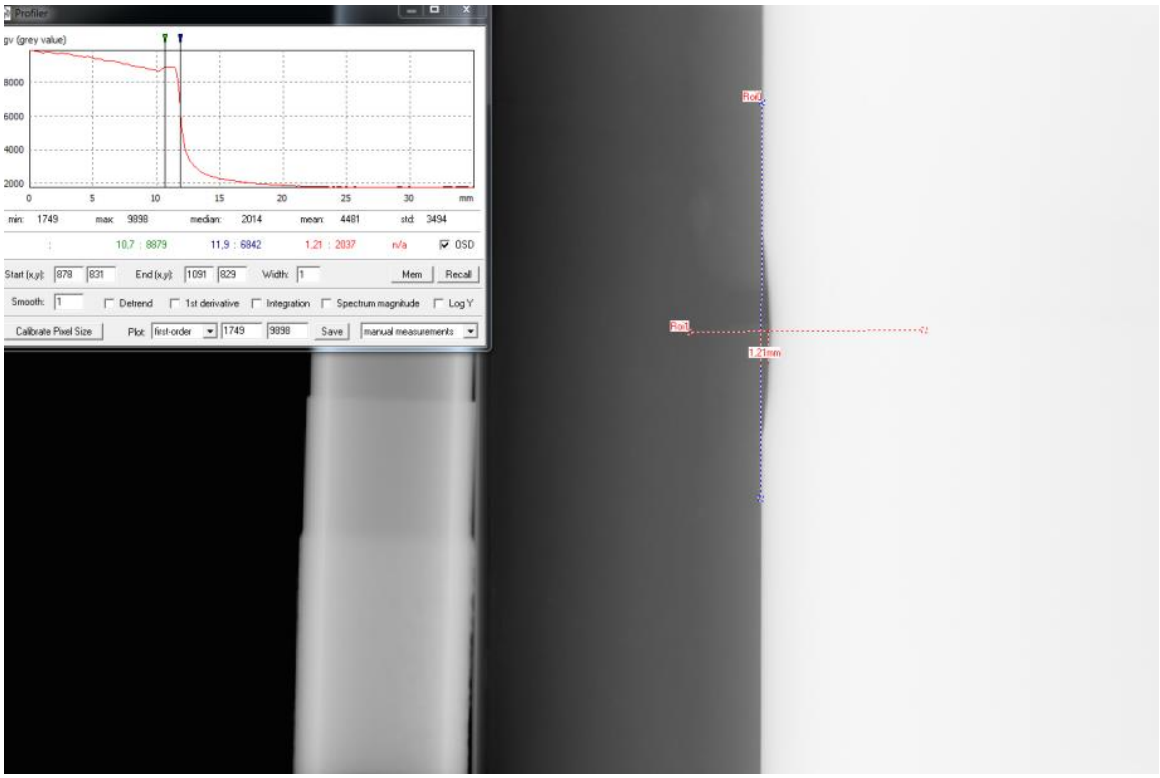


Figura C23. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP4 – Grupo II.

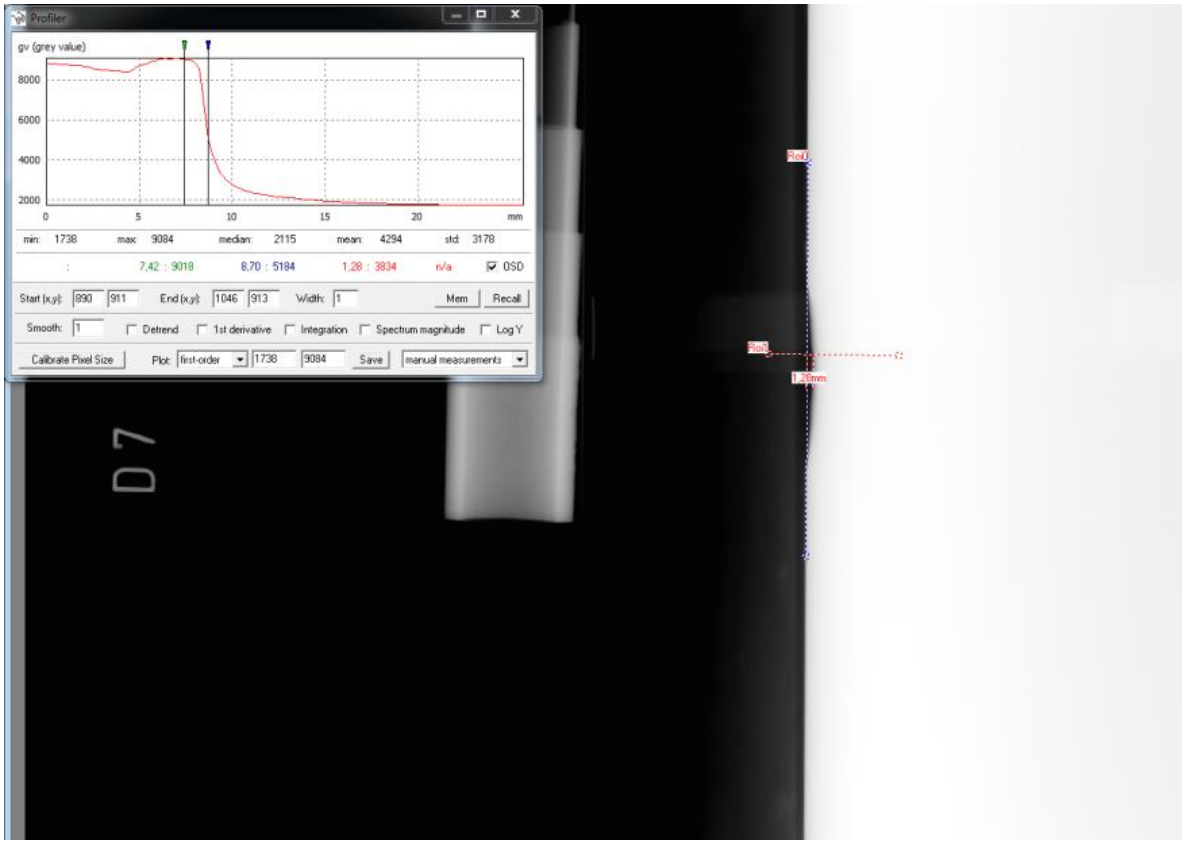


Figura C24. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP4 – Grupo II.

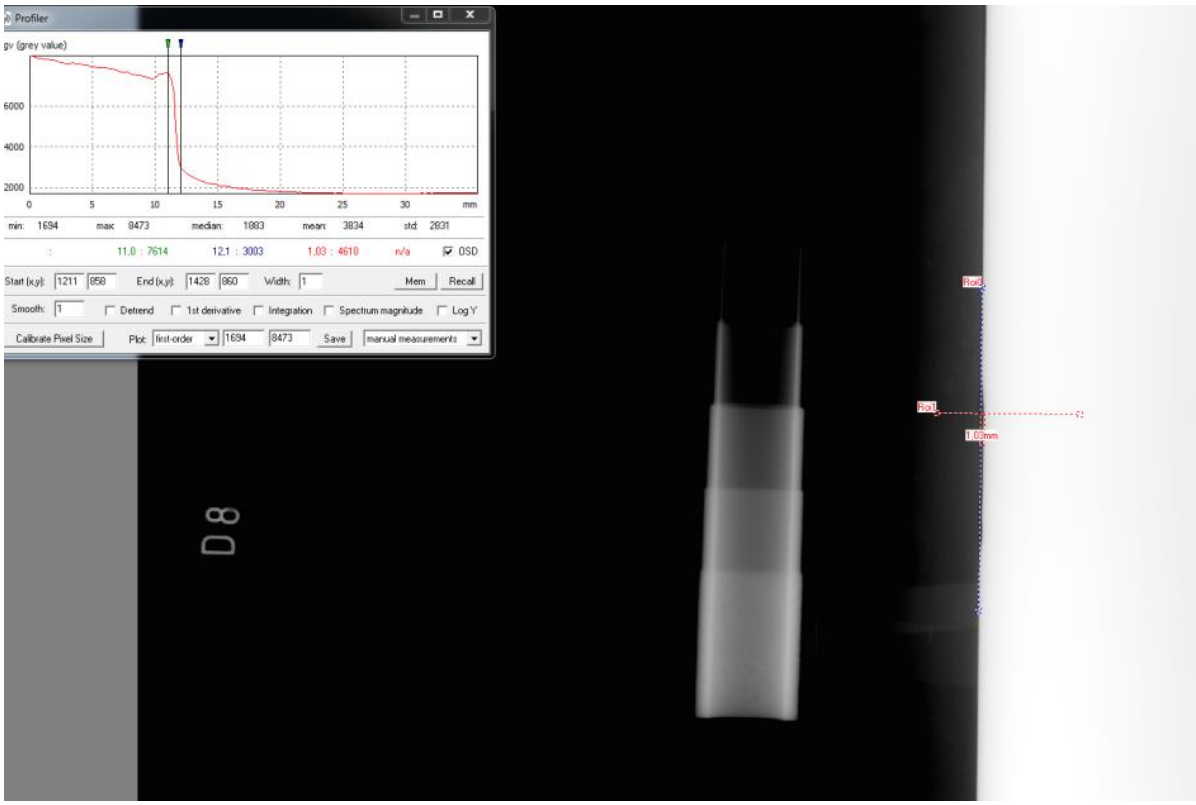


Figura C25. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP4 – Grupo II.

ANEXO D – Imagens das Medidas de Espessura dos Defeitos dos CPs do Grupo II – Com fonte de Iridio-192.

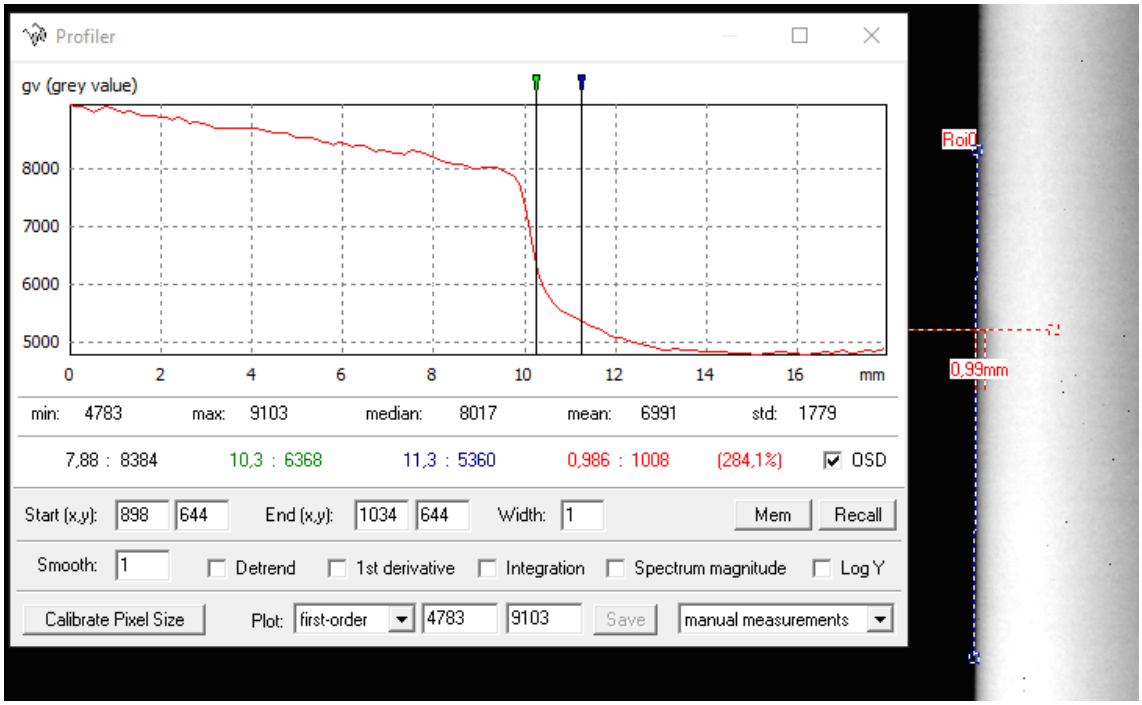


Figura D1. Imagem da medida de profundidade para o defeito 1 do CP1 – Grupo II

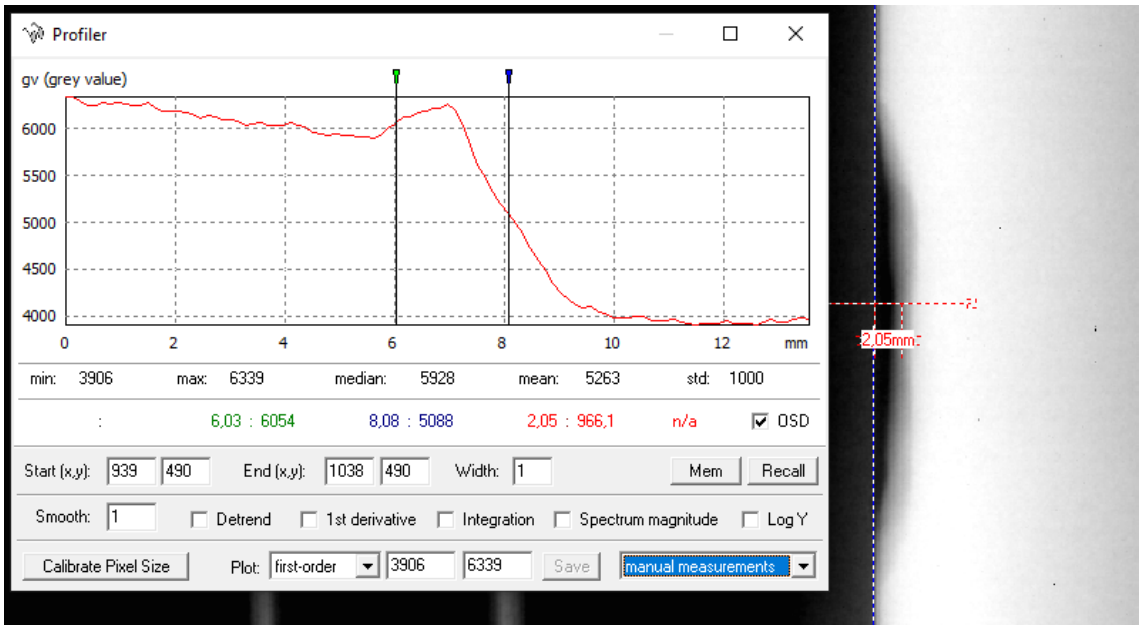


Figura D2. Imagem da medida de profundidade para o defeito 2 do CP1 – Grupo II.

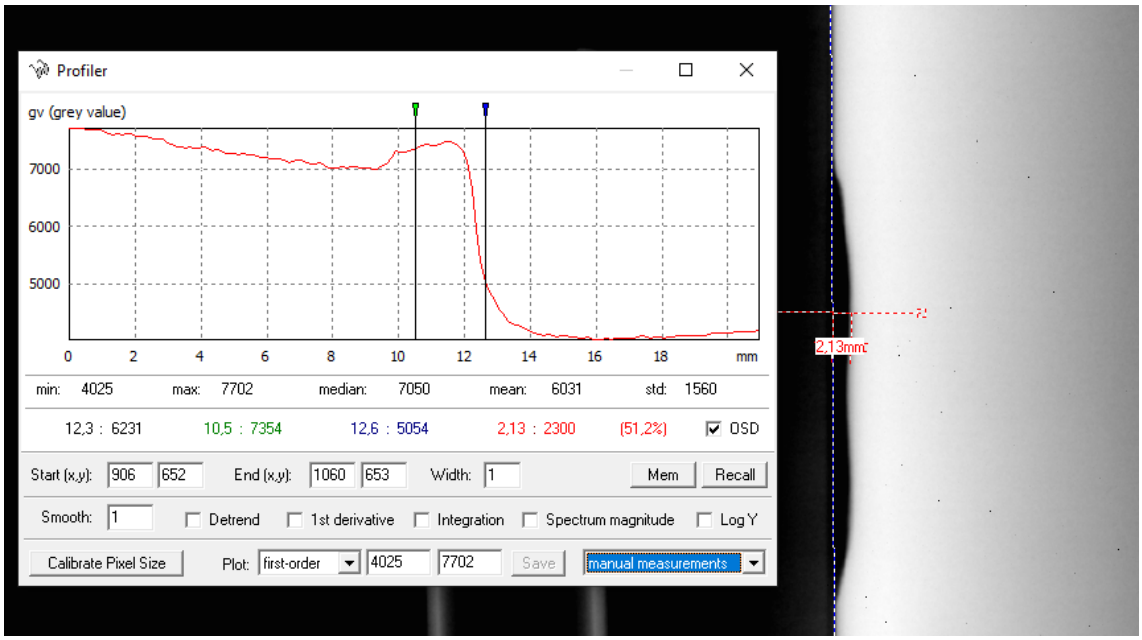


Figura D3. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP1 – Grupo II.

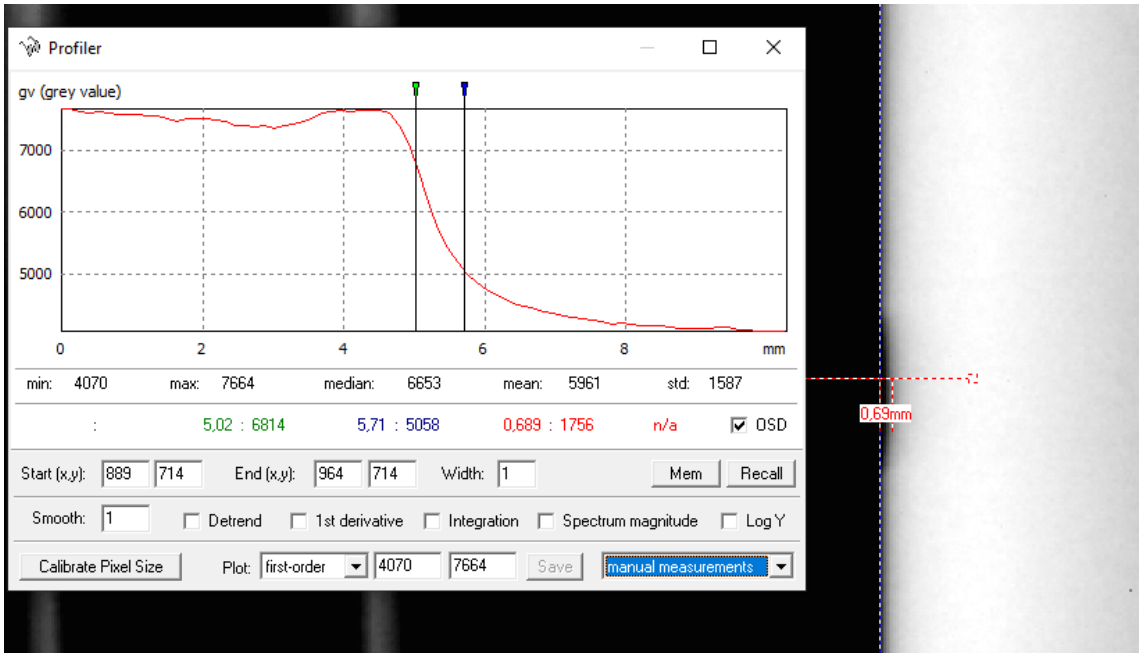


Figura D4. Imagem da medida de profundidade para o defeito 4 do CP1 – Grupo II.

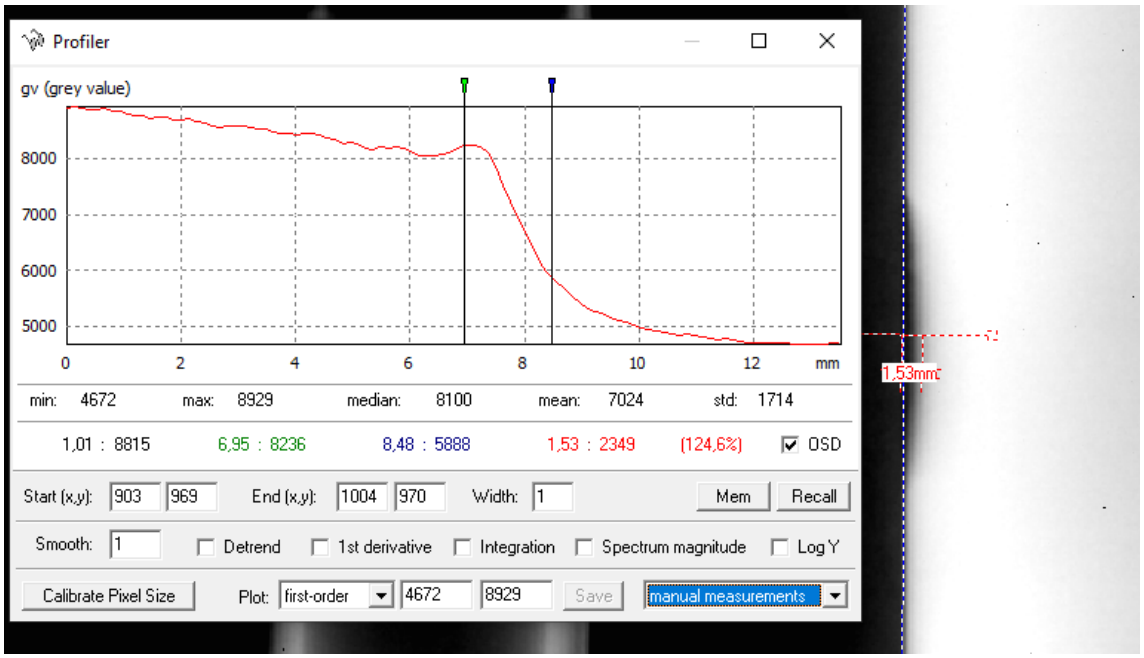


Figura D5. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP1 – Grupo II.

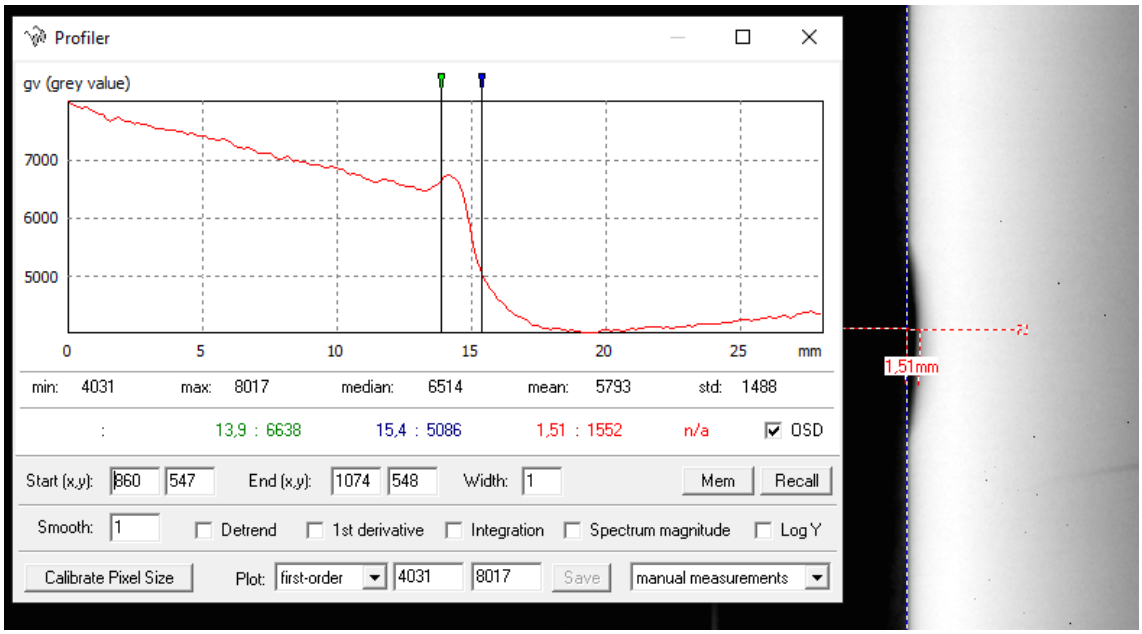


Figura D6. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP1 – Grupo II.

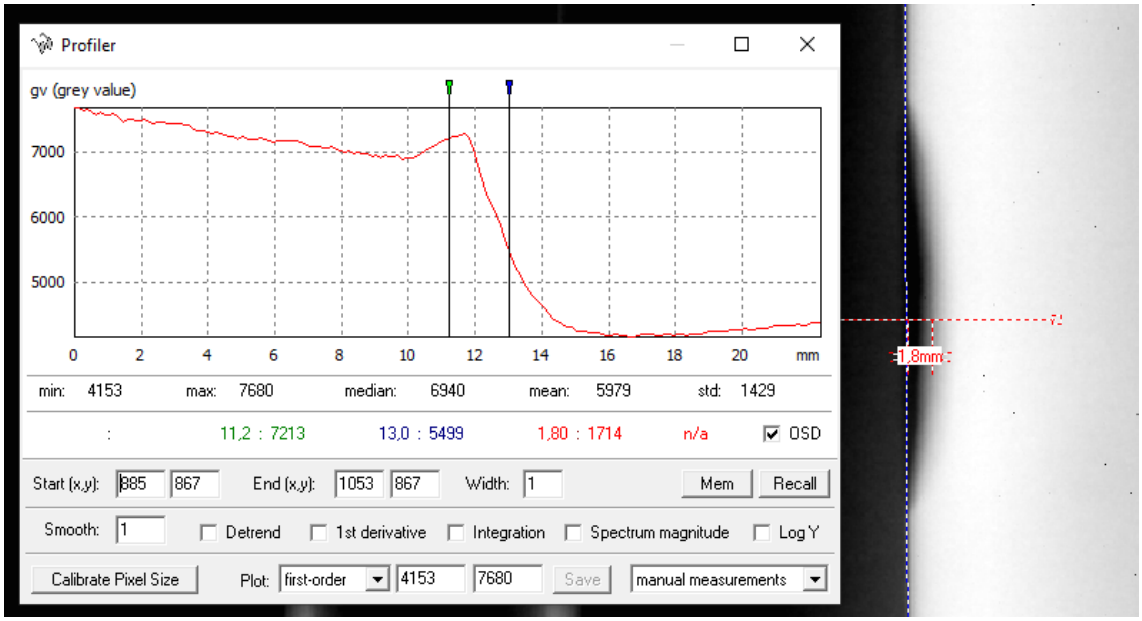


Figura D7. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP1 – Grupo II.

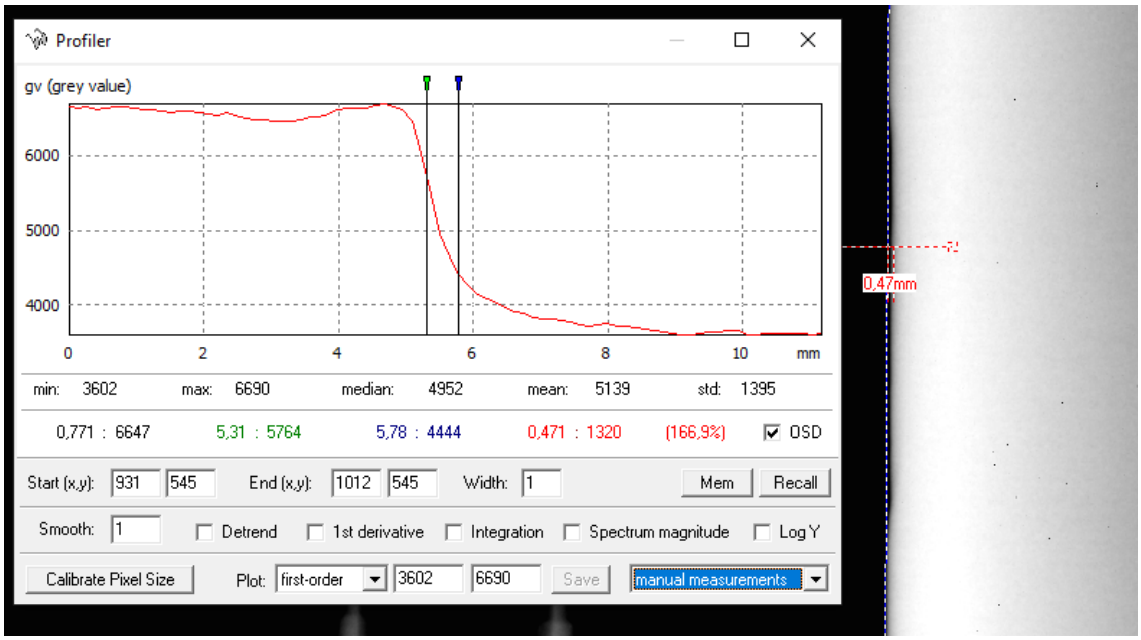


Figura D8. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP1 – Grupo II.

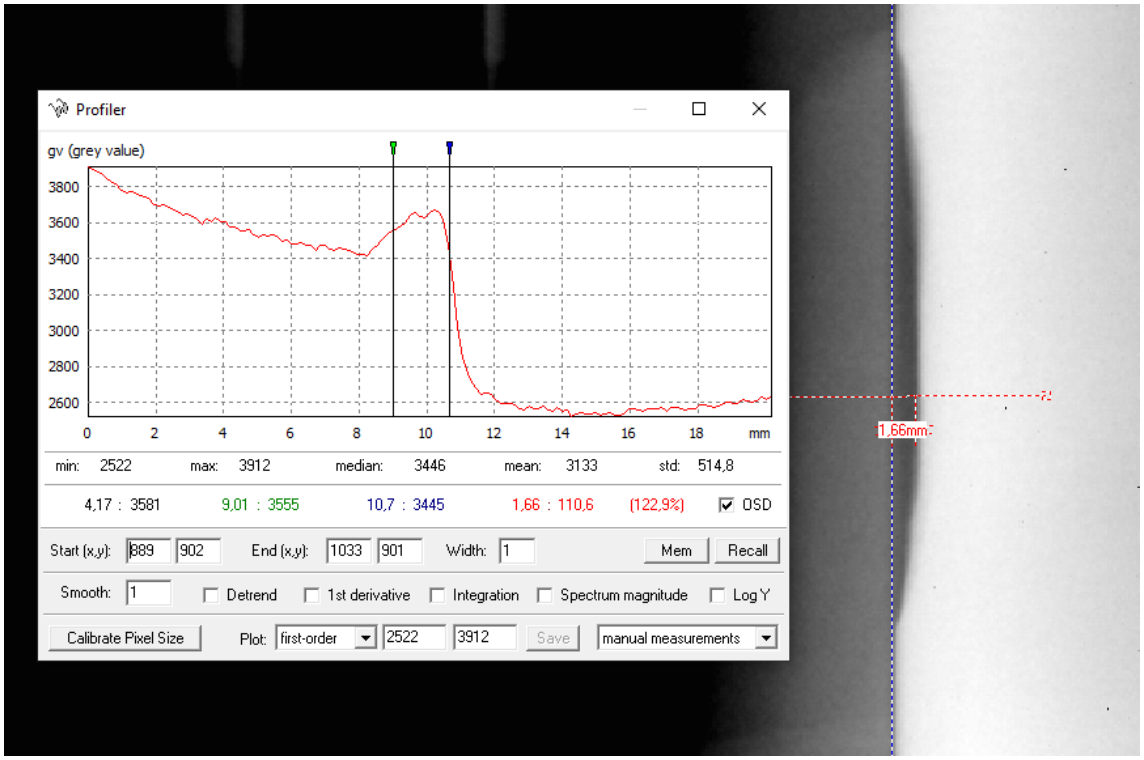


Figura D9. Imagem da medida de profundidade para o defeito 1 do CP2 – Grupo II.

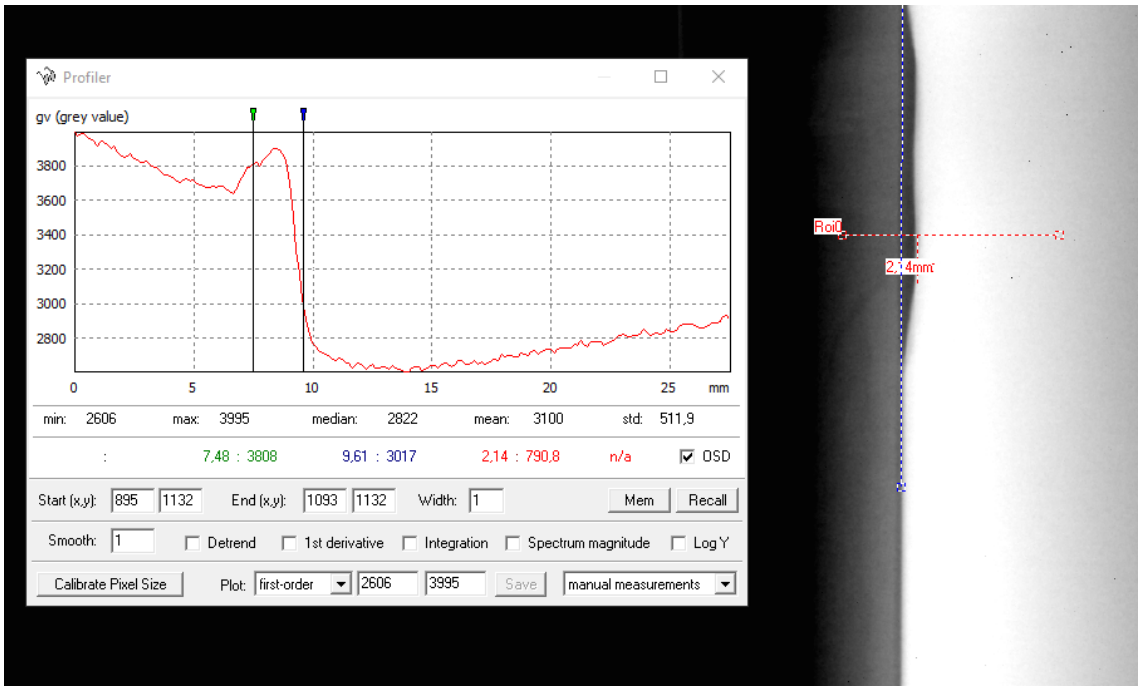


Figura D10. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP2 – Grupo II.

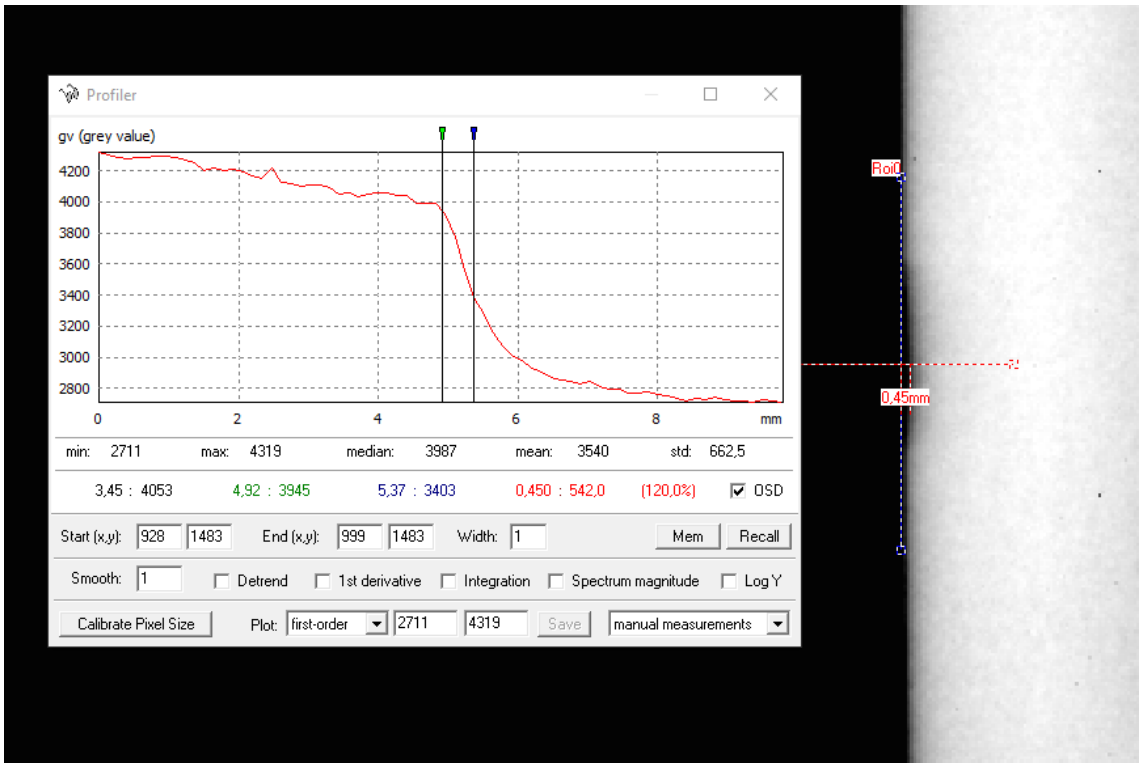


Figura D11. Imagem da medida de profundidade para o defeito 4 do CP2 – Grupo II.

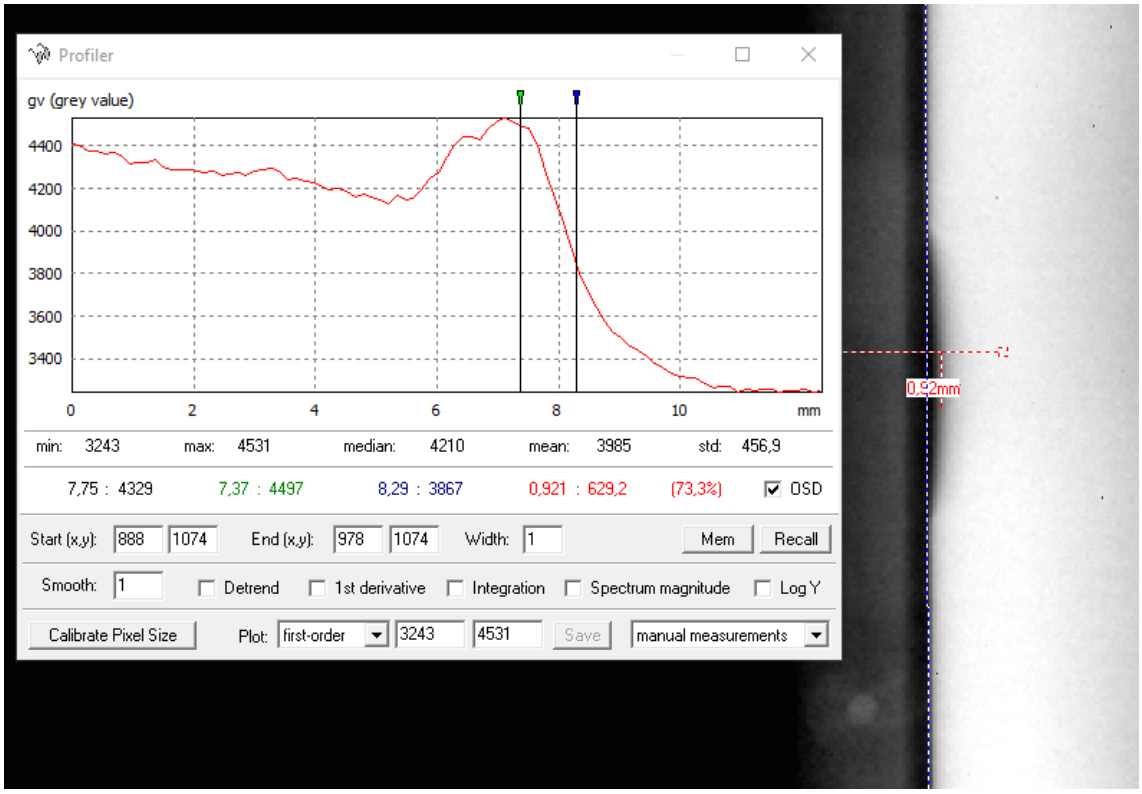


Figura D12. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP2 – Grupo II.

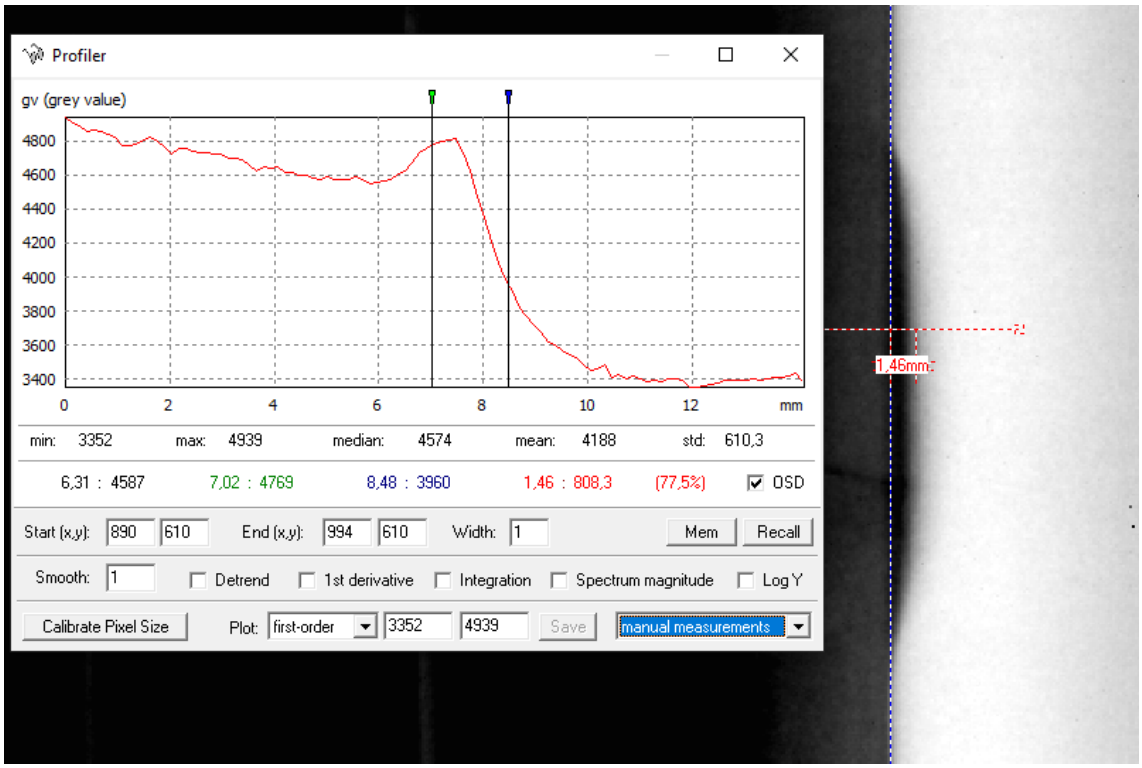


Figura D13. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP2 – Grupo II.

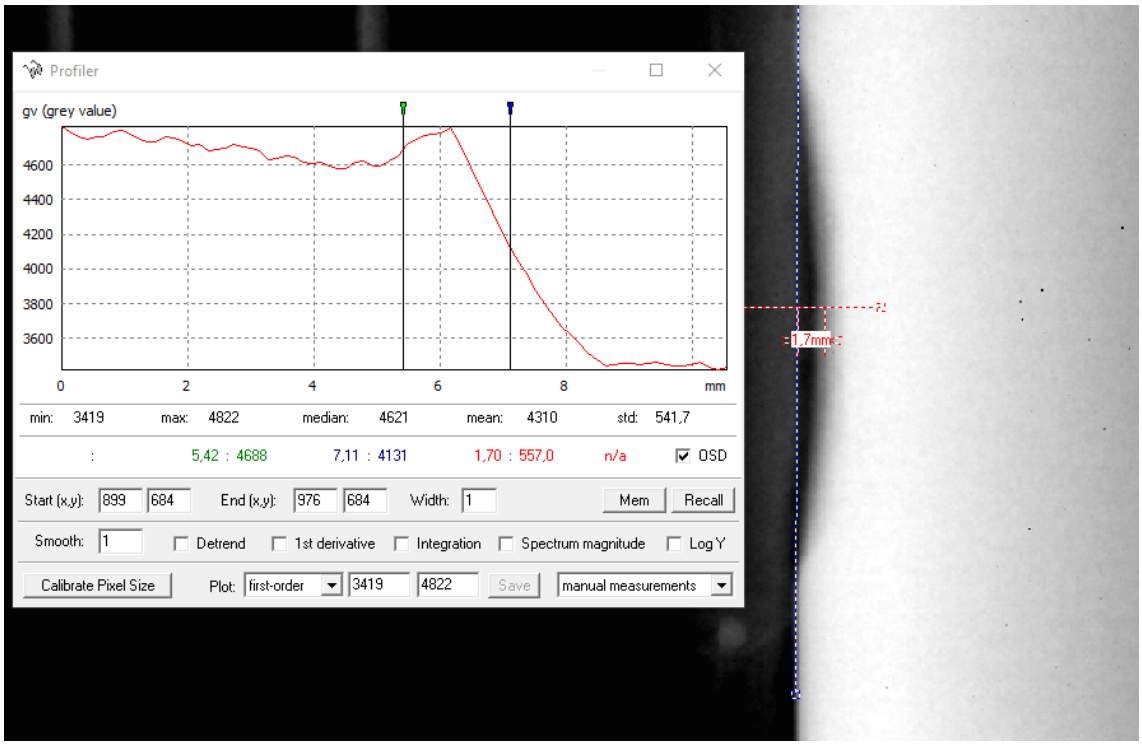


Figura D14. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP2 – Grupo II.

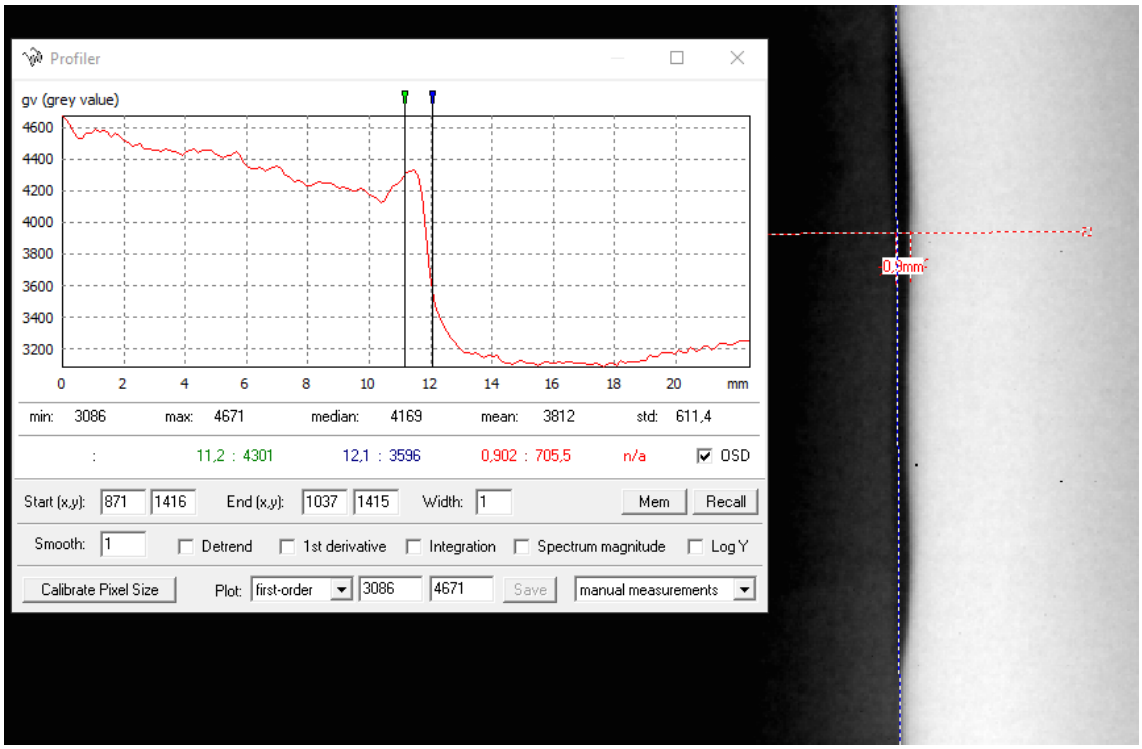


Figura D15. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP2 – Grupo II.

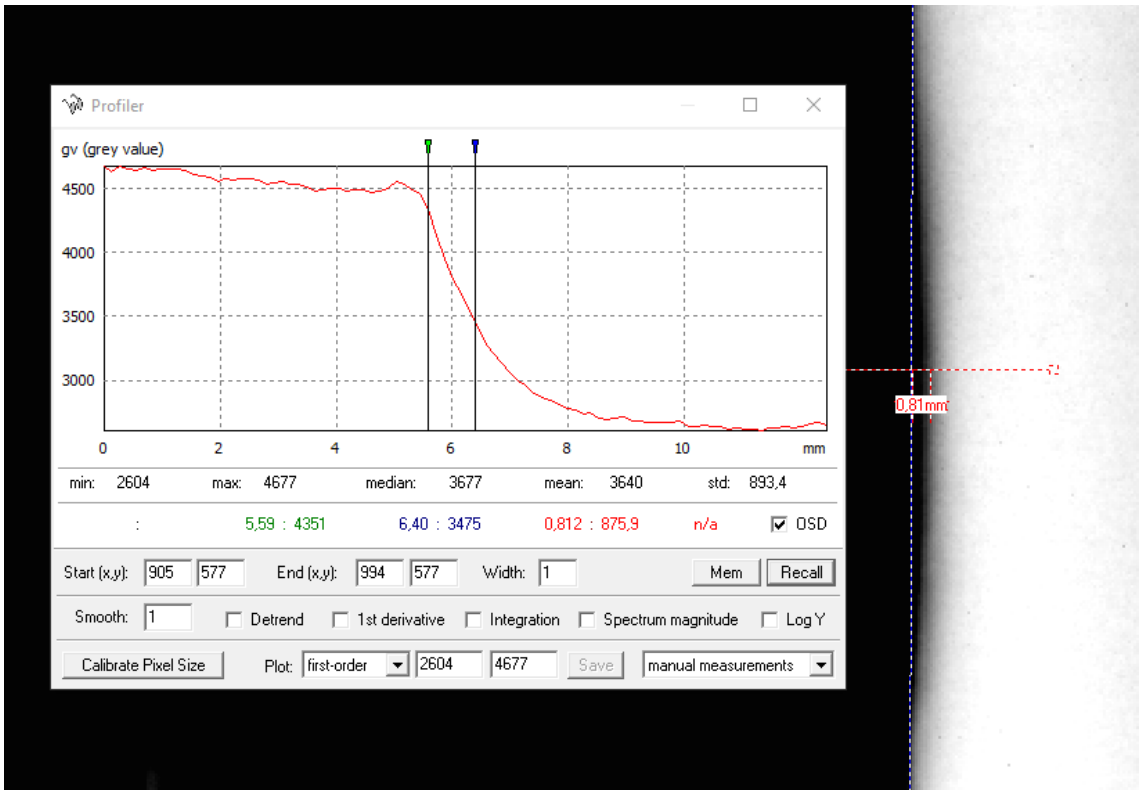


Figura D16. Imagem da medida de profundidade para o defeito 2 do CP3 – Grupo II.

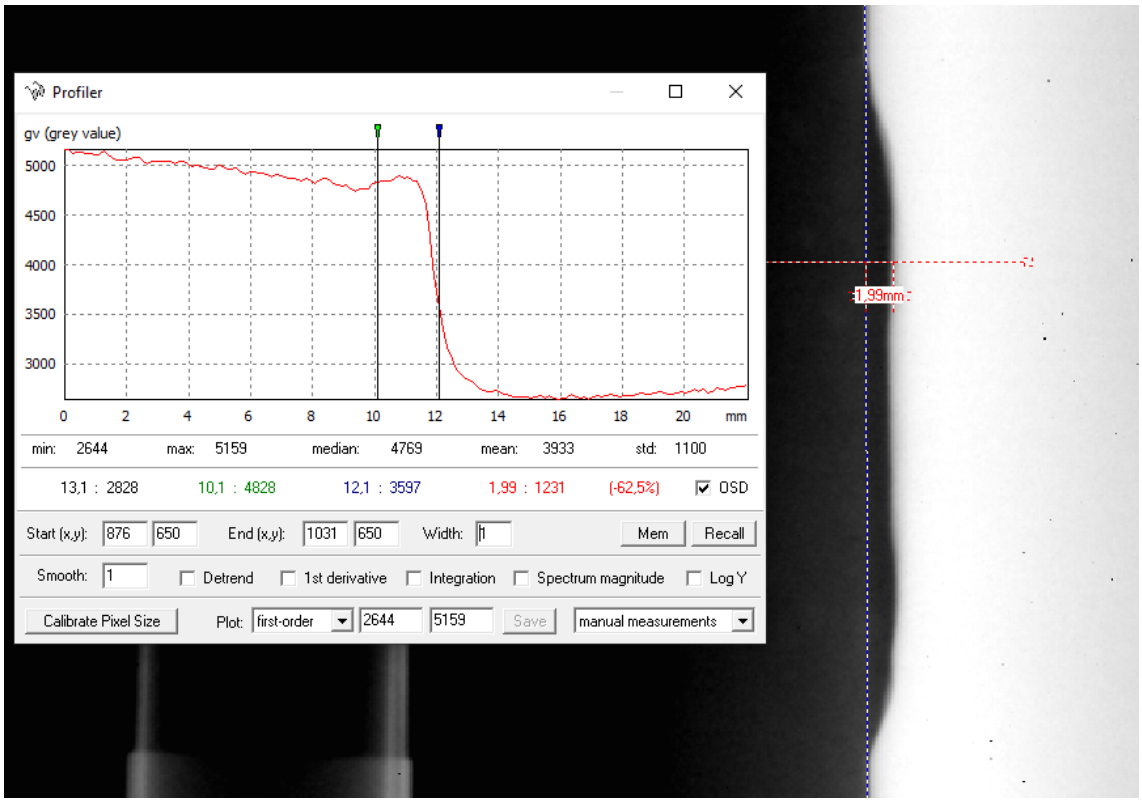


Figura D17. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP3 – Grupo II.

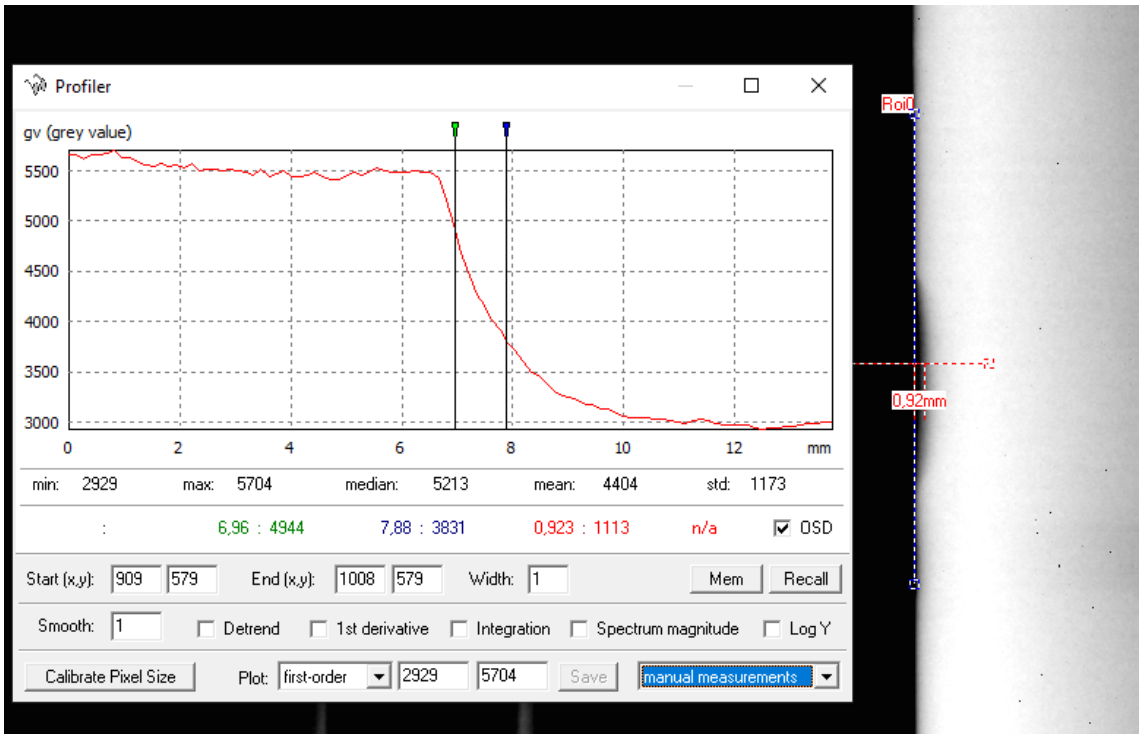


Figura D18. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP3 – Grupo II.

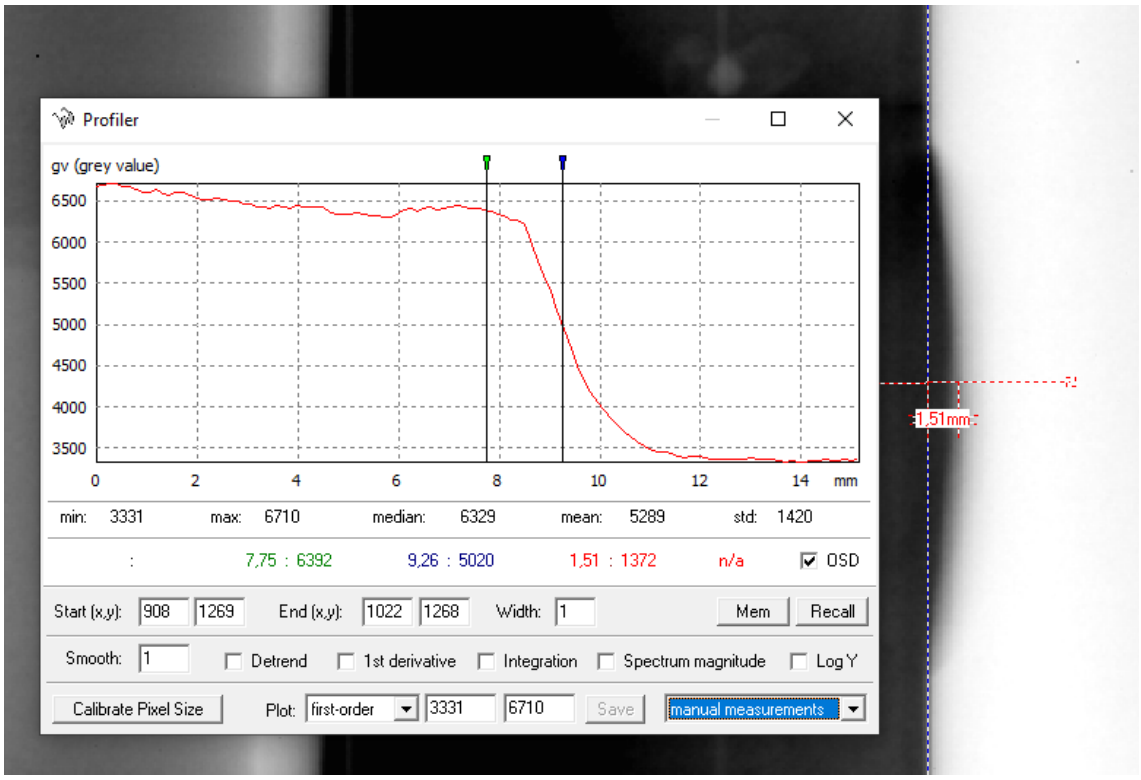


Figura D19. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP3 – Grupo II.

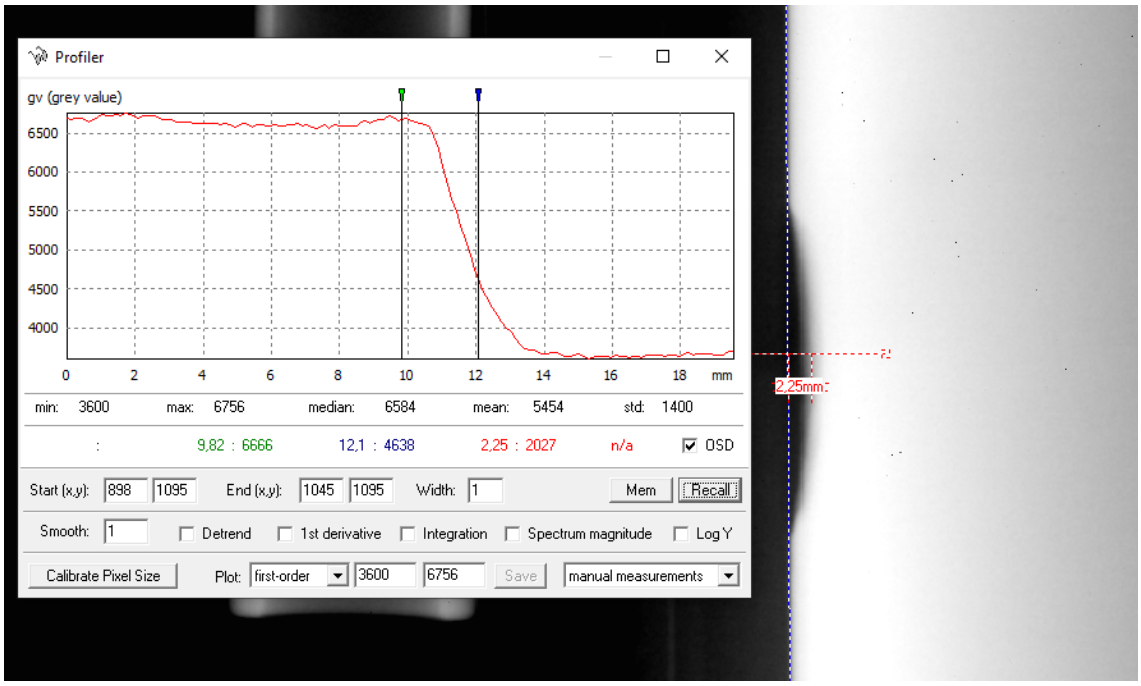


Figura D20. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP3 – Grupo II.

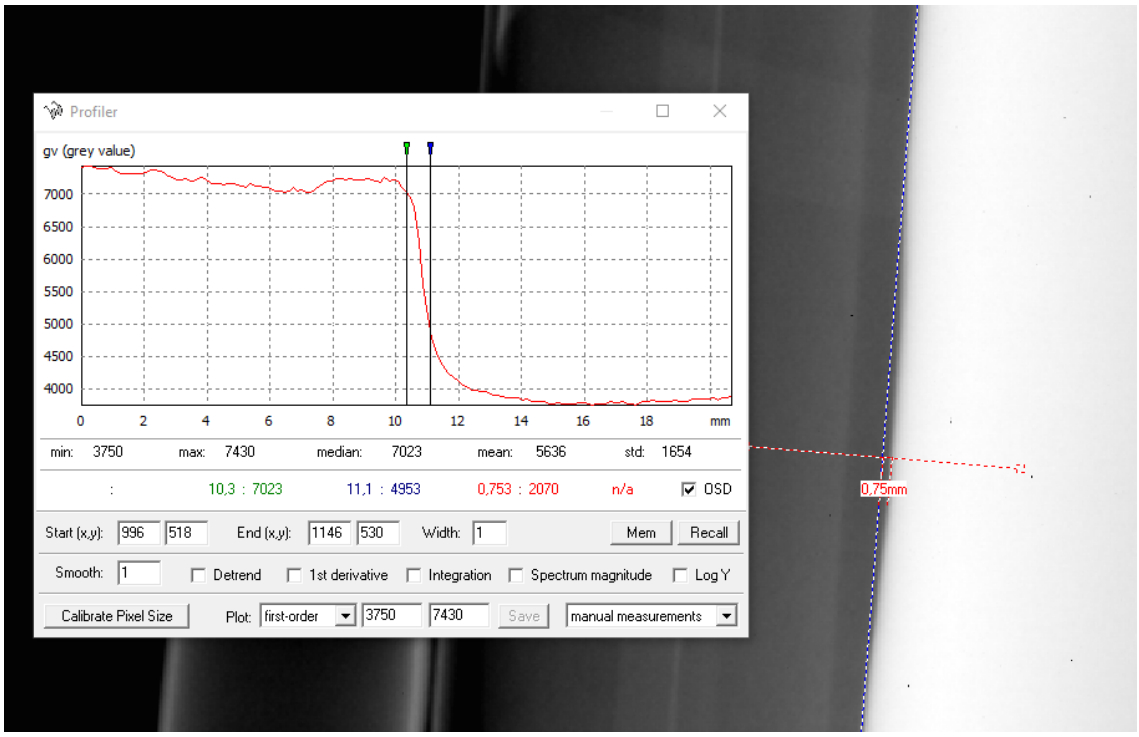


Figura D21. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP3 – Grupo II

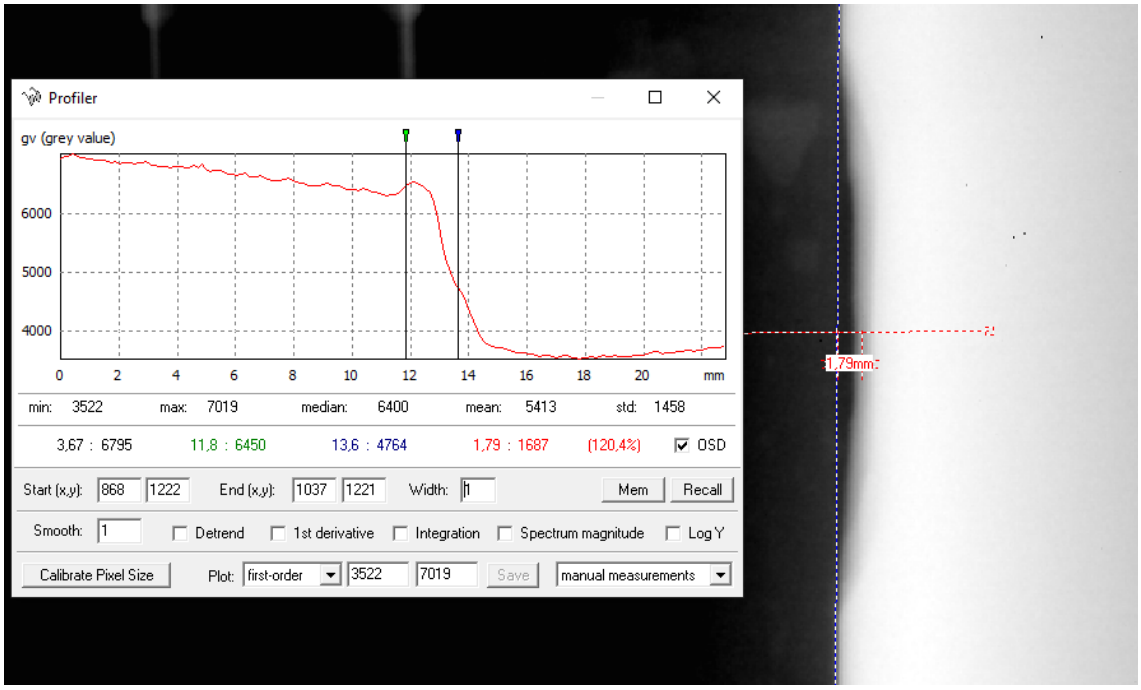


Figura D22. Imagem da medida de profundidade para o defeito 2 do CP4 – Grupo II

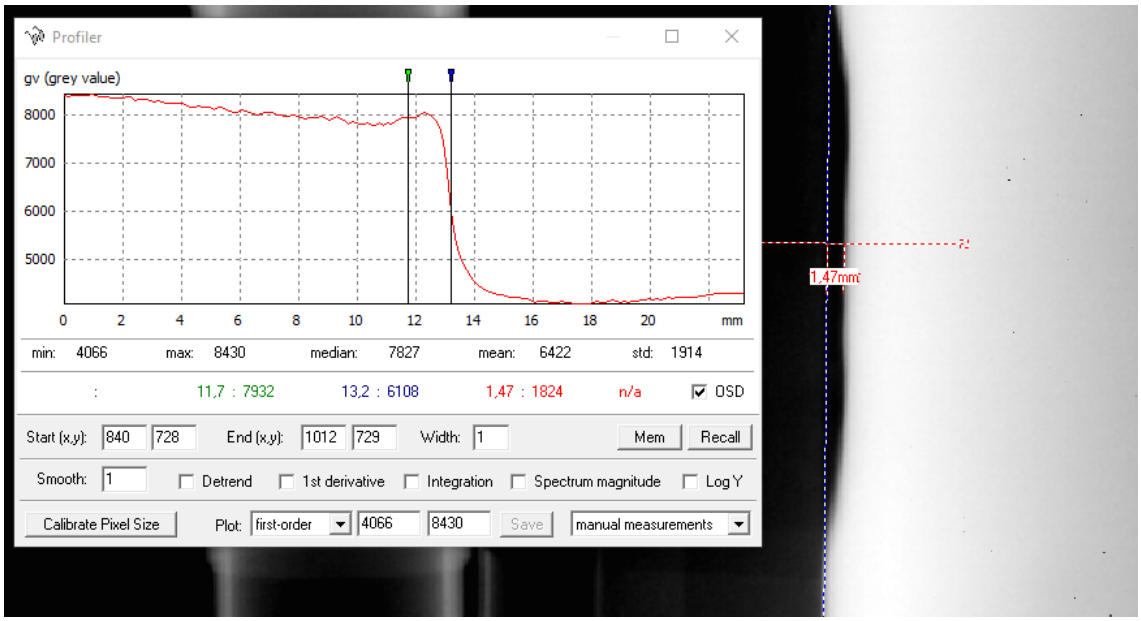


Figura D23. Imagem da medida de profundidade para o defeito 3 do CP4 – Grupo II

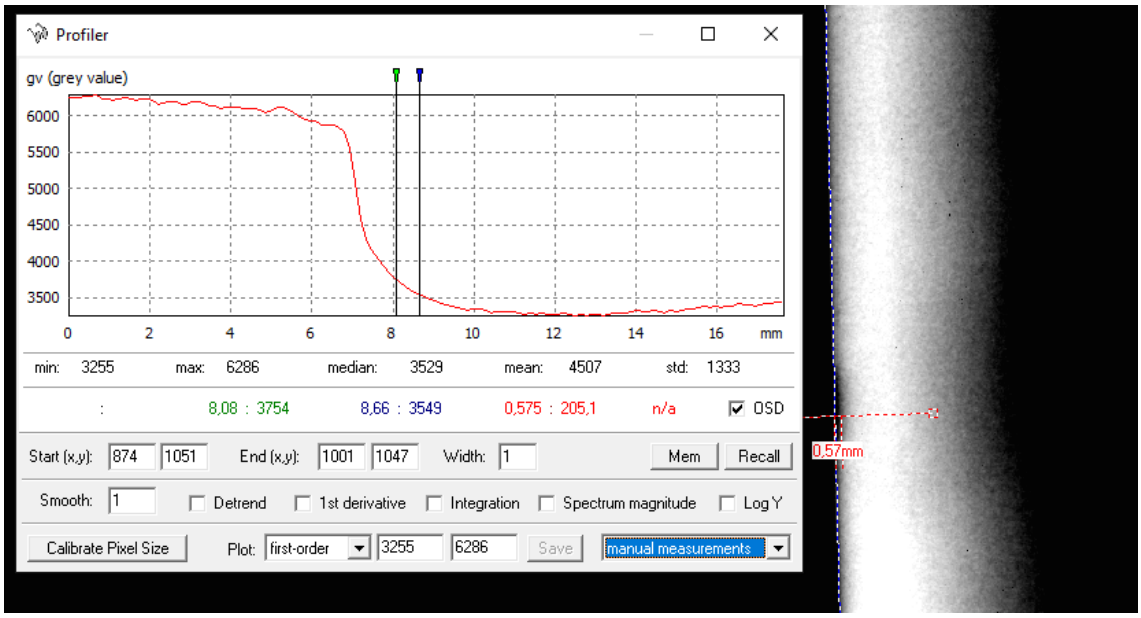


Figura D24. Imagem da medida de profundidade para o defeito 4 do CP4 – Grupo II

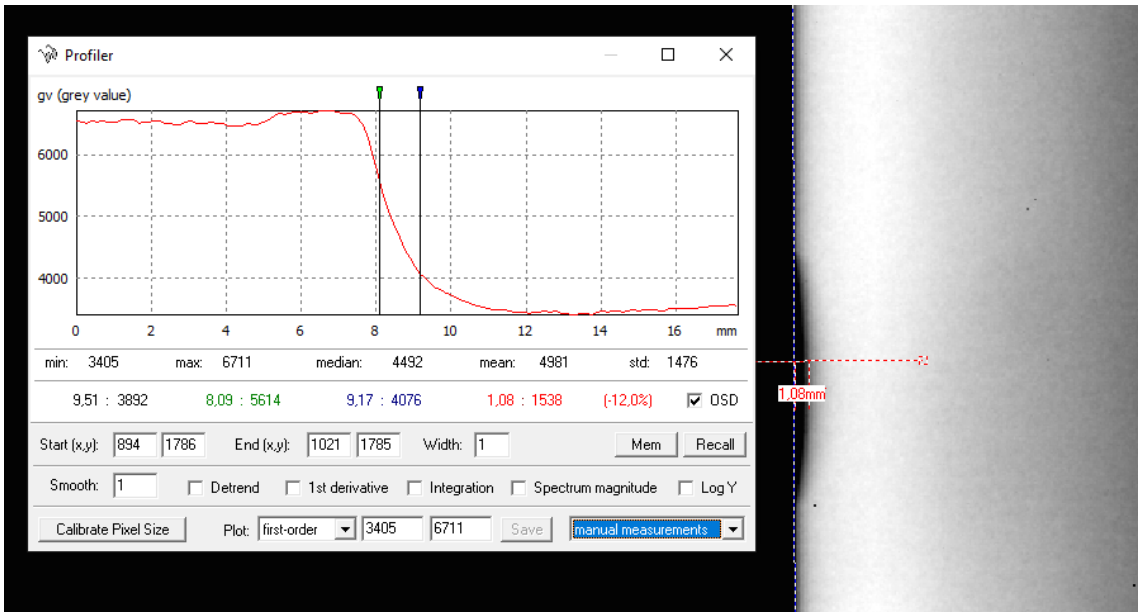


Figura D25. Imagem da medida de profundidade para o defeito 5 do CP4 – Grupo II

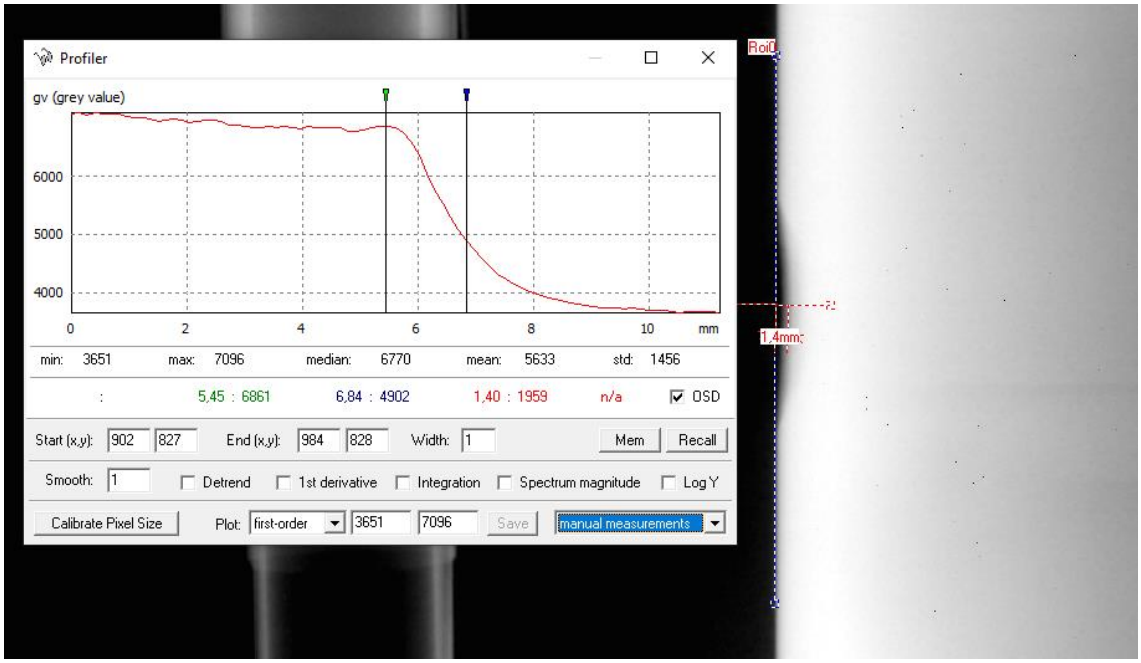


Figura D26. Imagem da medida de profundidade para o defeito 6 do CP4 – Grupo II

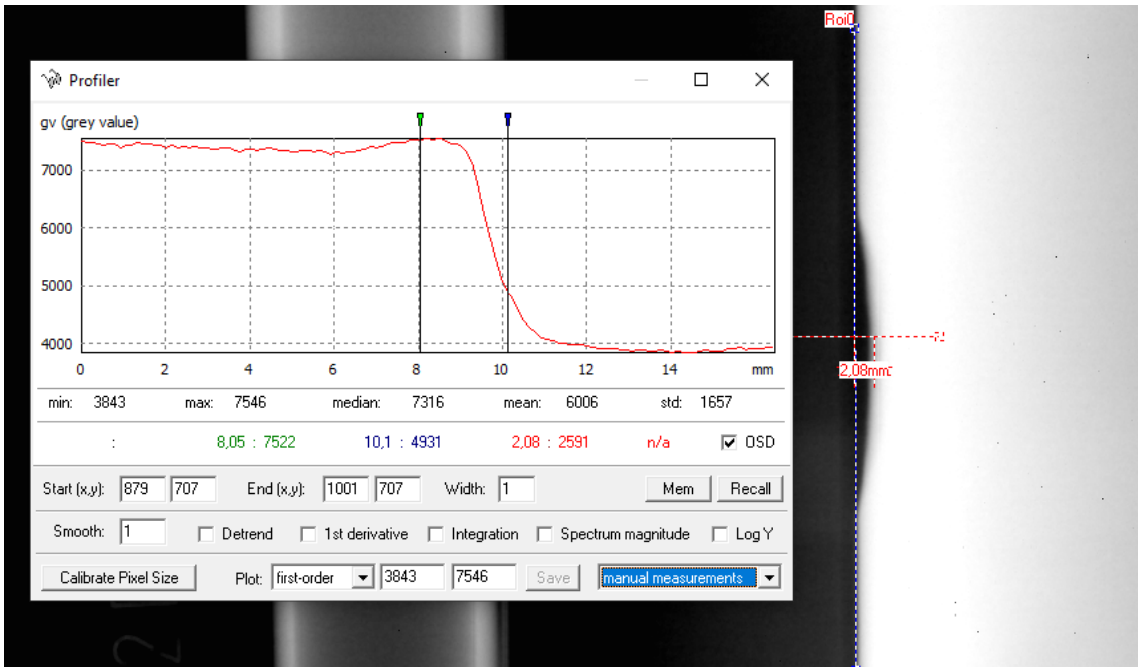


Figura D27. Imagem da medida de profundidade para o defeito 7 do CP4 – Grupo II

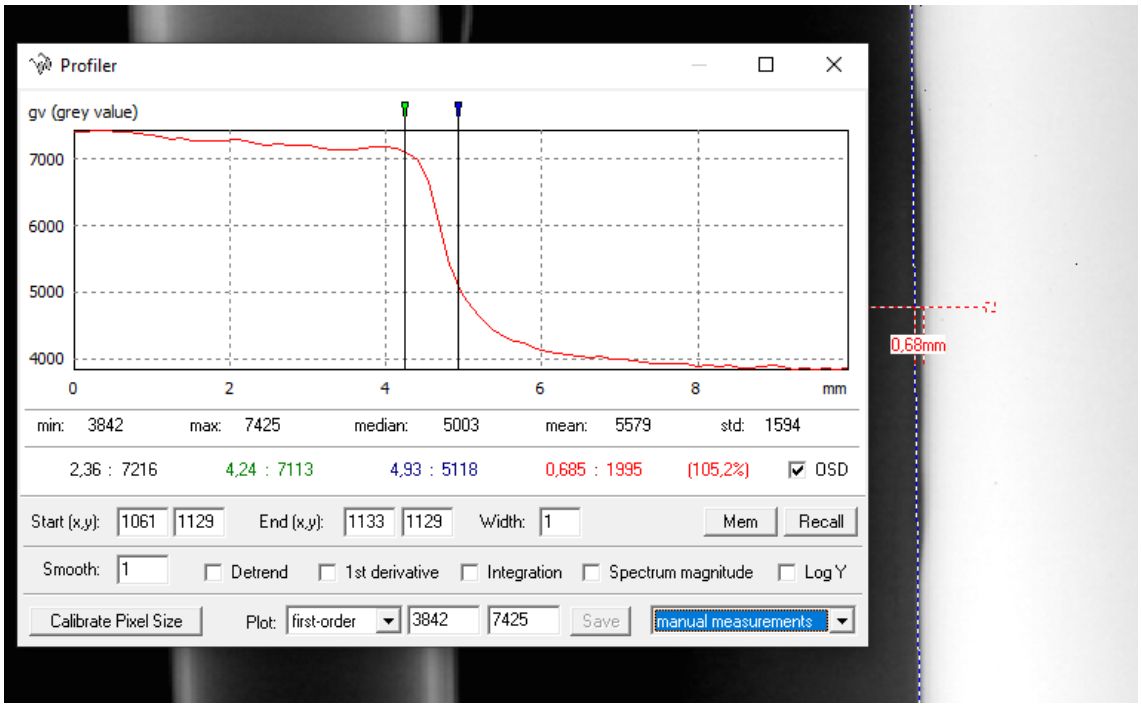


Figura D28. Imagem da medida de profundidade para o defeito 8 do CP4 – Grupo II