

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo foram adotados dois tipos de materiais diferentes, um metálico (material 1) e outro compósito (material 2). Amostras destes materiais foram obtidas em produtos também diferentes.

Material 1: tambor metálico de aço de baixo carbono e estrutura ferrítica, adotado no encapsulamento de rejeitos radioativos da usina nuclear de Angra 1 (Figura 47).



Figura 47 – Tambor metálico.

Material 2: tubo de material compósito de matriz de poliéster insaturado reforçada por fibra de vidro, usado para transporte de água de injeção, sistemas de lastro e esgoto em unidades de exploração e produção no mar (Figura 48).



Figura 48 – Tubo de compósito.

3.1. Preparação das amostras

As amostras foram usadas para o estudo da eficiência e limitações das técnicas não destrutivas (ultrassom, raios penetrantes X e gama e partículas magnéticas) na detecção de descontinuidades simuladas.

3.1.1. Amostra metálica

A amostra metálica foi preparada em três fases distintas. Na primeira etapa foi retirada uma placa retangular com dimensões de 245 mm X 153 mm e espessura de 1,15 mm, cortada a plasma, conforme ilustrado na Figura 49.



Figura 49 – Esquema de retirada da amostra metálica.

Na segunda etapa a superfície interna da amostra foi desbastada com lixas de granulometria 200 e 400 para retirada da camada protetora (tinta epóxi) existente.

Na terceira etapa, descontinuidades circulares, lineares e irregulares foram usinadas na superfície desbastada por meio de eletroerosão, adotando eletrodos de cobre. As descontinuidades circulares foram admitidas como furos cegos rebaixados (Figura 50), com diâmetros de 5 e 11 mm (Figura 51) e diferentes profundidades (Figura 52). Para conhecimento das profundidades exatas dos furos, vide Tabela 18. As descontinuidades lineares e irregulares são apresentadas nas Figuras 53 a 55, respectivamente. O conjunto de descontinuidades pode ser observado na Figura 56.

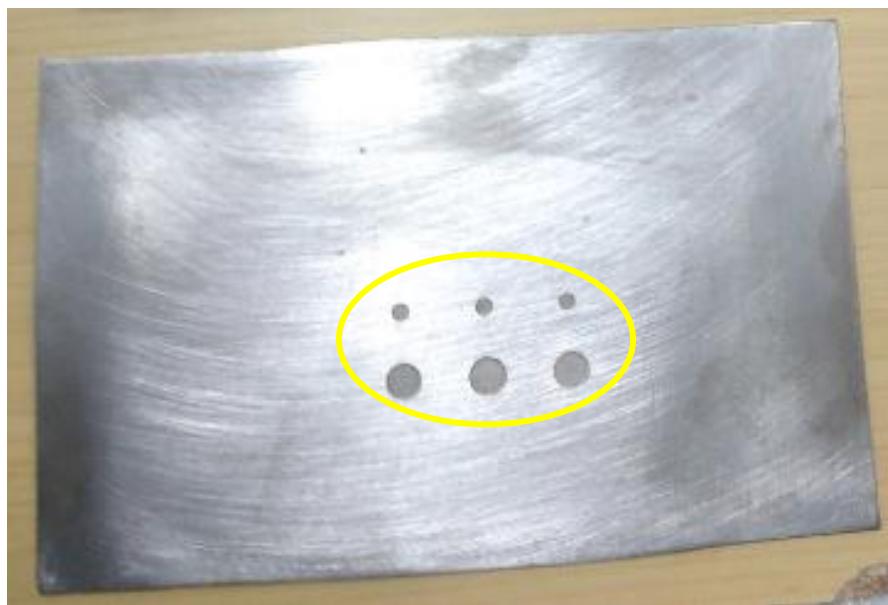


Figura 50 – Detalhamento das descontinuidades circulares na amostra metálica.

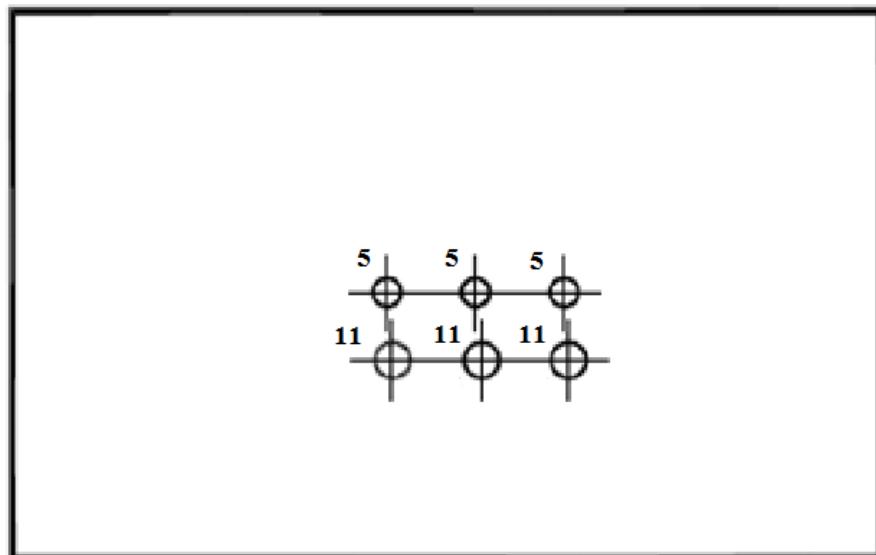


Figura 51 – Representação esquemática dos diâmetros adotados nas furações da amostra.

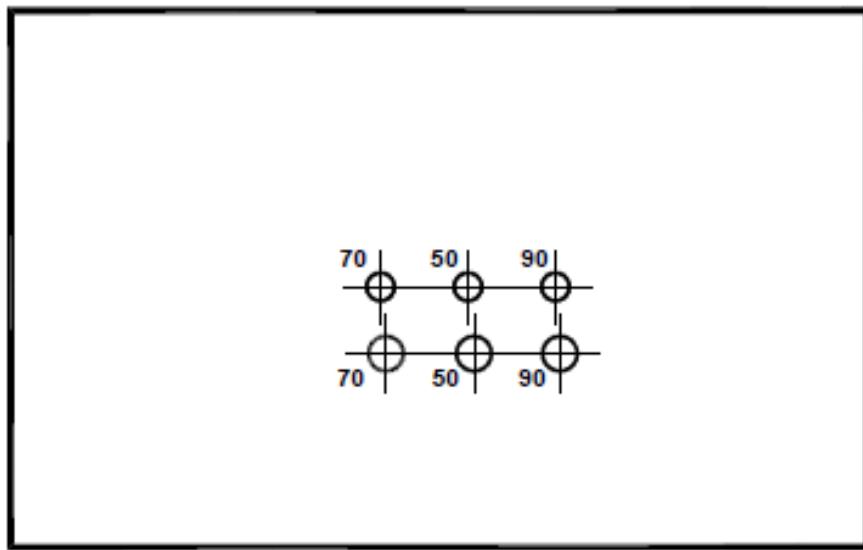


Figura 52 – Representação esquemática das espessuras residuais de parede (%) após furação das amostras.

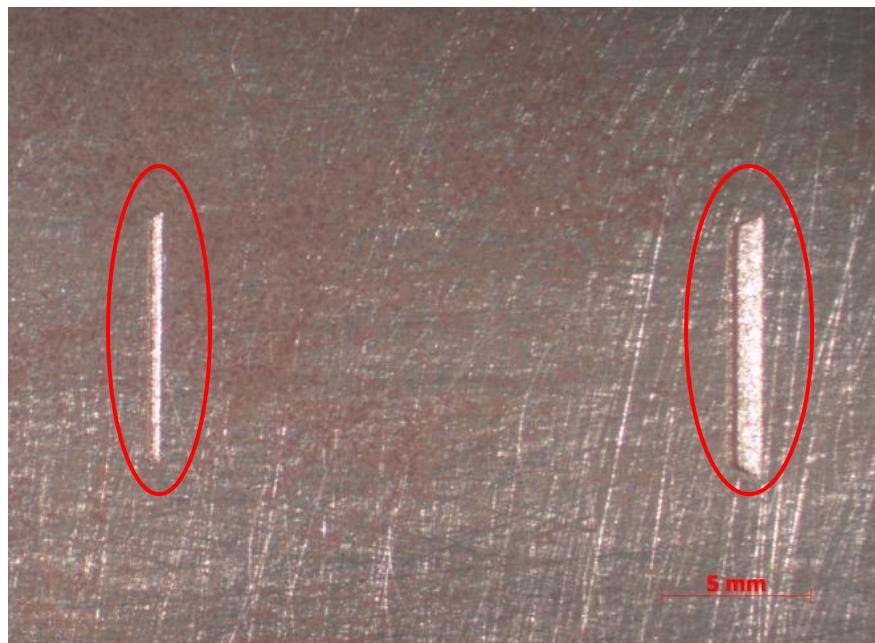


Figura 53 – Detalhamento das descontinuidades lineares verticais na amostra metálica.

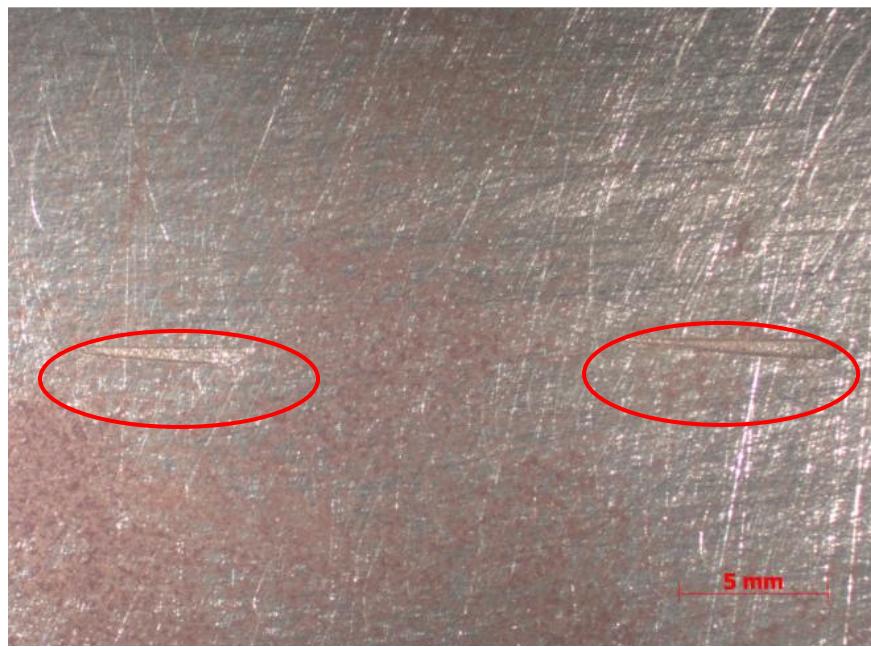


Figura 54 – Detalhamento das descontinuidades lineares horizontais na amostra metálica.

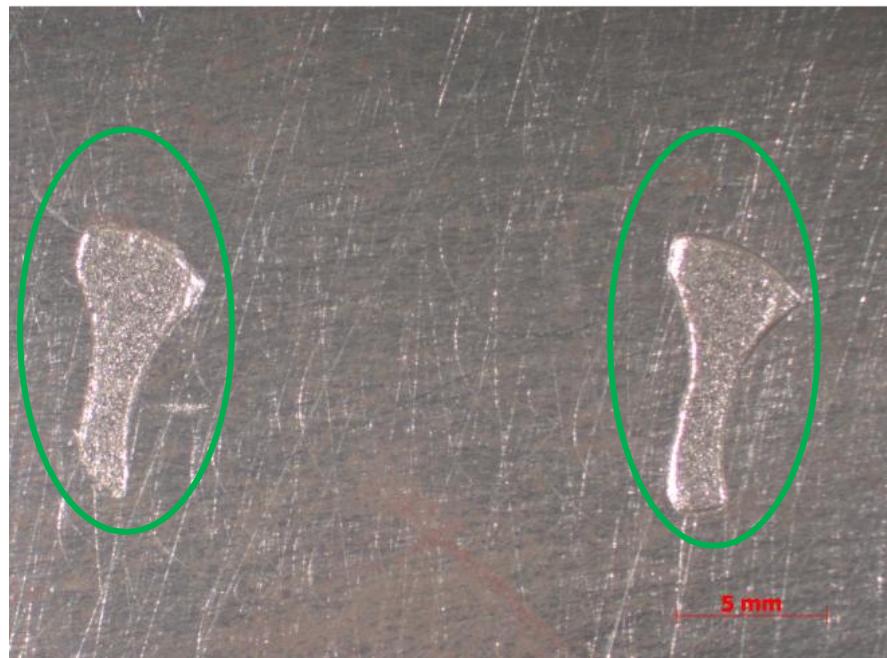


Figura 55 – Detalhamento das descontinuidades irregulares na amostra metálica.

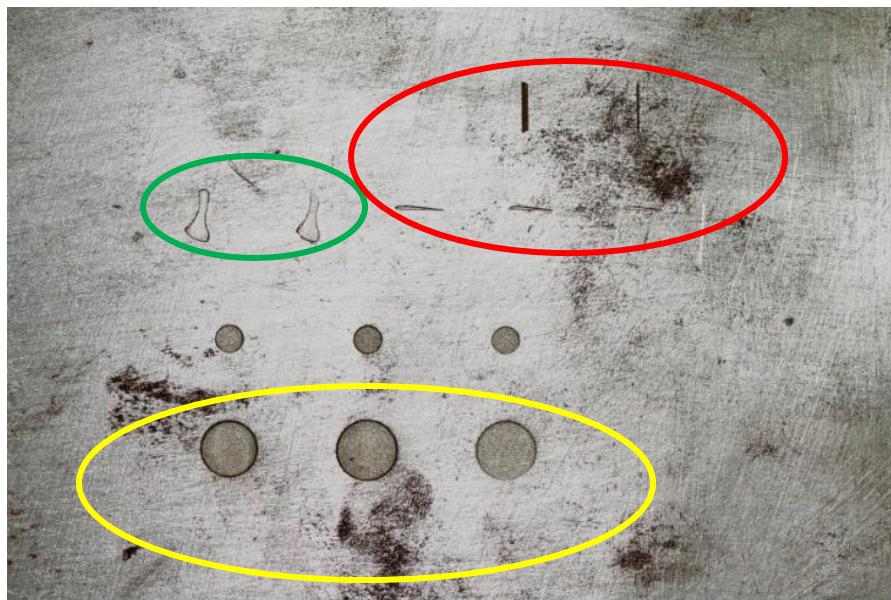


Figura 56 – Conjunto de descontinuidades usinadas por eletroerosão na amostra metálica.

3.1.2. Amostra de compósito

O tubo compósito possui dimensões de: 160 mm (diâmetro externo) x 150 mm (diâmetro interno) e 500 mm (comprimento). Na parede interna do tubo foram confeccionados 6 rasgos longitudinais e paralelos com o objetivo de simular descontinuidades lineares. Objetivando a confecção de diferentes dimensões, tais descontinuidades foram produzidas com auxílio de espátula (numeradas de 1 a 3) e ferro de solda (numerados de 4 a 6) como pode ser observado nas Figuras 57 a 61. Para conhecimento das profundidades das descontinuidades, vide Tabela 19.



Figura 57 – Confecção de descontinuidades com auxílio de uma espátula.



Figura 58 – Numeração de 1 a 3 nas descontinuidades.



Figura 59 - Confecção das descontinuidades com o auxílio de um ferro de solda.



Figura 60 – Numeração de 4 a 6 nas descontinuidades.



Figura 61 – Ferramentas utilizadas.

Após o processo de preparação das amostras, passou-se para a aplicação de ensaios não destrutivos, com o objetivo de promover a indicação das descontinuidades simuladas nas amostras. A Figura 62 resume a sequência experimental adotada.

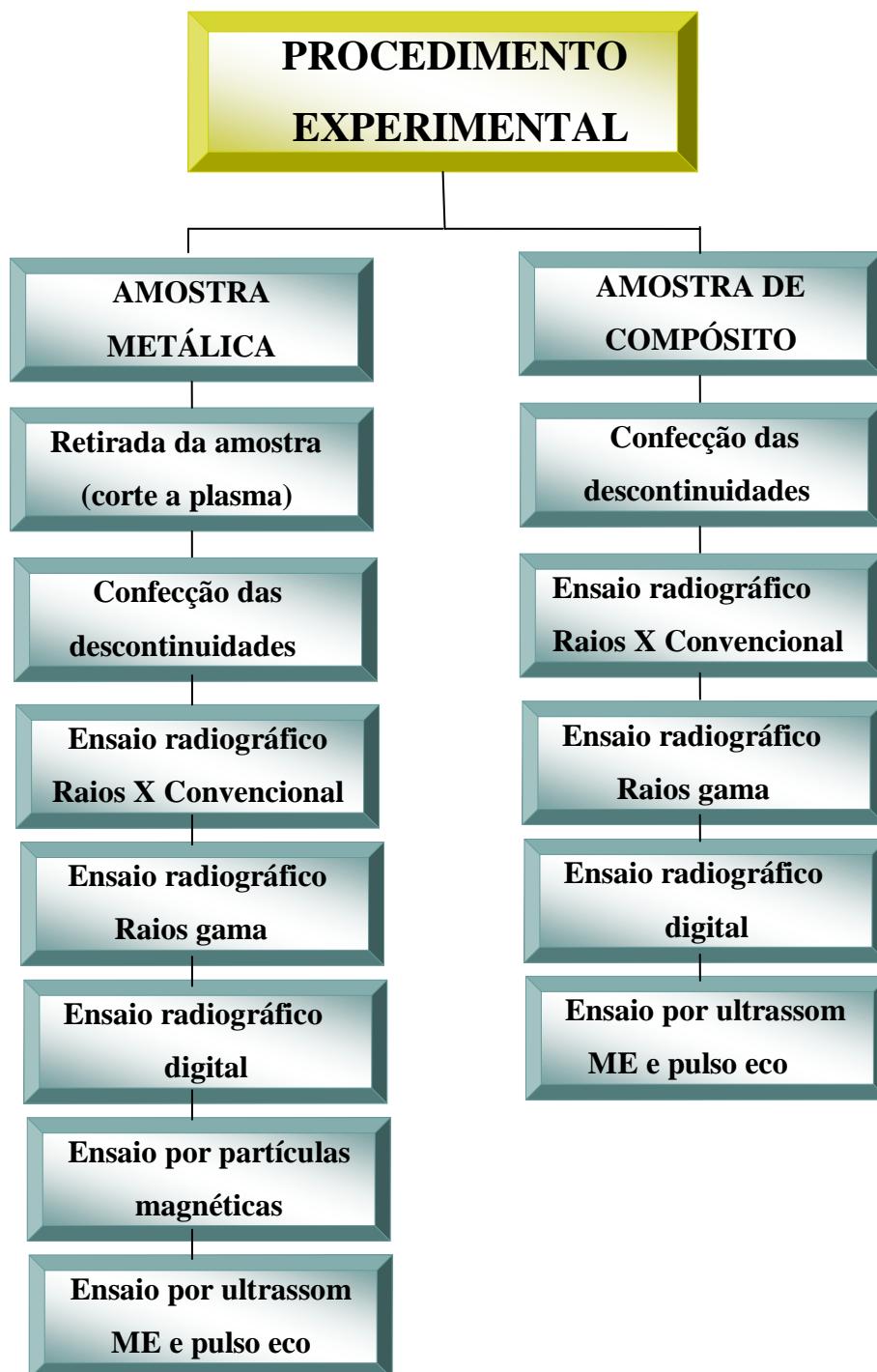


Figura 62 – Fluxograma ilustrando o procedimento experimental.

3.2. Ensaios radiográficos

Os ensaios radiográficos foram realizados na empresa Arctest em Paulínia – SP. O tipo de radiação usado foi dos isótopos: Selênio-75, Irídio-192 e raios X, nos métodos convencional e digital. As exposições das amostras às radiações foram efetuadas dentro de um *bunker* construído com as dimensões de 6,0 m X 9,0 m, com altura de 2,8 m e paredes com espessura de 1,0 m revestidas com placas de chumbo. Na Figura 63 observa-se a vista externa do *bunker*.

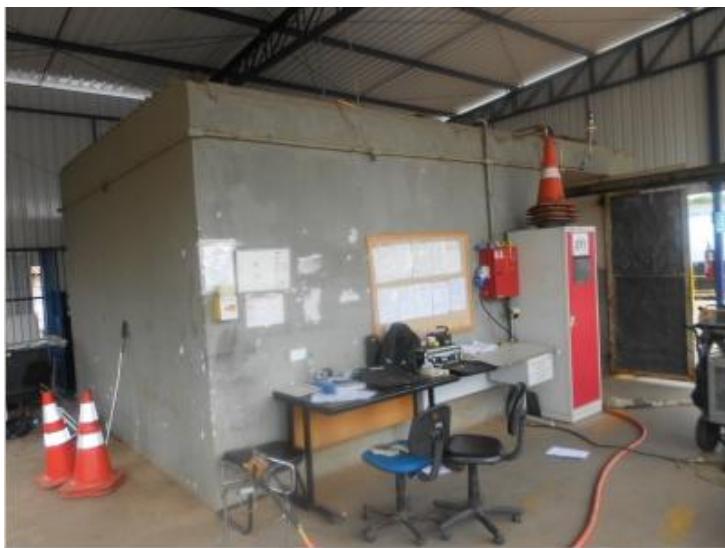


Figura 63 – *Bunker* usados nos ensaios radiográficos.

De acordo com a ASME Seção V artigo 2 SE – 1025 ou SE-747 [44] amostras metálicas (grupo 1) com espessuras entre 10 e 80 mm, devem ser irradiadas com Irídio 192 (Tabela 9). Entretanto, neste estudo, mesmo as amostras possuindo espessuras inferiores a 10 mm, as mesmas foram ensaiadas com raios X, Se-75 e Ir-192, com o objetivo de comparar a capacidade de indicação de descontinuidades das três radiações.

Grupo 1: Aço Carbono, Aços de Baixa Liga e Aços Inoxidáveis.

Tabela 1 – Grupo material 1.

Material	Irídio – 192 Espessura recomendável (mm)
Aços	10 a 80

Os ensaios por raios gama foram realizados usando os isótopos Selênio-75 e Irídio -192. A atividade dos isótopos foi definida em função das fontes existentes na Arctest, de acordo com as condições de execução do serviço. A atividade máxima é de 3700 Gbq – (100 Ci), nos ensaios as atividades usadas foram de acordo com a Tabela 10.

Tabela 2 – Atividade dos isótopos usados nos ensaios radiográficos.

Isótopo	Atividade (Ci)	
	Amostra	
	Metálica	Compósito
Selênio - 75	55	27
Irídio - 192	95	42

Os Irradiadores utilizados no ensaio gama originam-se do fabricante Sauerwein com manuseio por comando a distância. Os modelos usados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 3- Modelos de irradiadores usados nos ensaios radiográficos.

Isótopo	Irradiador	Modelo
Selênio - 75	Gammamat	TI - F
Irídio - 192		TI - FF

Na Figura 64 pode ser observado o irradiador dentro do *bunker*, antes do início do ensaio e na Figura 65 o comando a distância para liberação do isótopo, respectivamente.



Figura 64 – Irradiador utilizado nos experimentos.



Figura 65 – Comando a distância para liberação dos isótopos.

Os ensaios por raios X foram realizados usando um aparelho Modelo Pantak Seifert Isomobil, com tensão de até 160 kV e corrente de 10 mA. O aparelho adotado nas análises não destrutivas se encontra apresentado na Figura 66.



Figura 66 – Equipamento usado nos ensaio por raios X.

Foram empregados filmes radiográficos industriais, de acordo com a norma ASTM E-1815 [45]. O filme utilizado foi o Kodak M100 classe I, selecionado em função das dimensões e espessuras das amostras. A Tabela 12 ilustra uma comparação entre as classes, tipos de filmes e as marcas comerciais. As Figuras 67 e 68 apresentam o filme usado no ensaio.

Tabela 4 – Comparaçao entre tipos e classes de filmes.

Sistema de filmes Classe ASTM E-1815	Tipos de filmes ASTM E 94	Marca comercial
I	1	AGFA D4 ou KODAK M100
II	2	AGFA D7 ou KODAK AA
III	3	AGFA D8

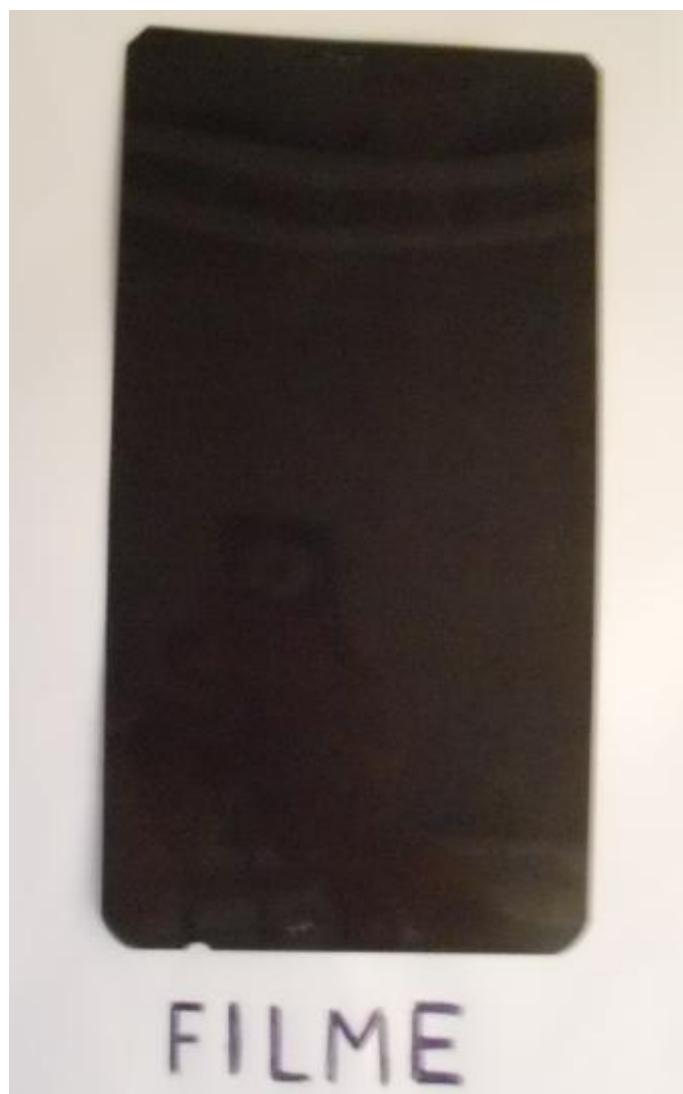


Figura 67 – Filme radiográfico KODAK M 100, classe I.

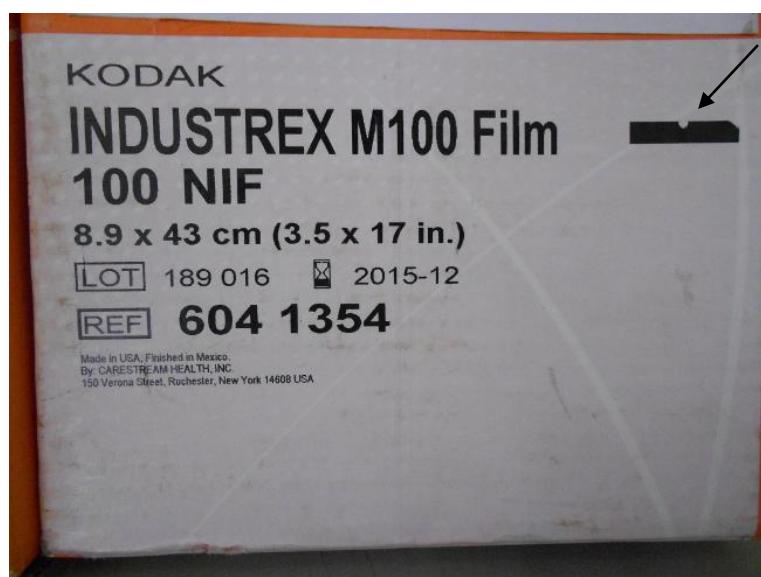


Figura 68 – Etiqueta do filme usado.

O filme apresentou densidade ótica na faixa entre 2,0 e 3,5 HD.

Telas intensificadoras são adotadas com o objetivo de reduzir os tempos de exposição dos ensaios. Para este estudo as telas intensificadoras foram escolhidas em função das dimensões do filme e da espessura da amostra. Na Tabela 13 as espessuras frontal e posterior das telas intensificadoras adotadas estão grifadas em negrito, enquanto que as próprias telas são apresentadas na Figura 69.

Tabela 5 – Espessura das telas intensificadoras.

Posição relativa	Material	Espessura a radiografar	Espessura das telas
Frontal do filme	Chumbo (Pb)	Até 50 mm	0,127 mm
Frontal do filme	Chumbo (Pb)	> 50 mm	0,254 mm
Posterior do filme	Chumbo (Pb)	< 50 mm	0,254 mm



Figura 69 - Telas intensificadoras.

Na parte superior das telas intensificadoras foram adicionadas etiquetas padrão da Arctest que permitem gravar informações no filme, sobre o nome do

cliente, tipo de obra, número ou região radiografada, espessura e material da amostra, tipo de fonte, o local, data de execução do ensaio e identificação do operador. Nas Figuras 70 e 71 o modelo da etiqueta identificadora Arctest e um filme radiografado identificado com as informações existentes na etiqueta são apresentados, respectivamente.

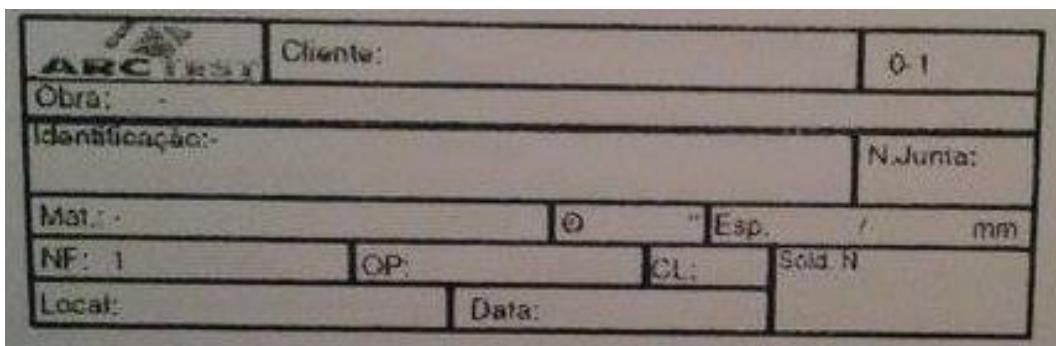


Figura 70 – Etiqueta identificadora Arctest.



Figura 71 – Identificação do filem radiográfico.

A Figura 72 apresenta, esquematicamente a montagem do conjunto (chassi) tela intensificadora, etiqueta e filme para os ensaios de radiação penetrante. A Figura 73 apresenta tais componentes.

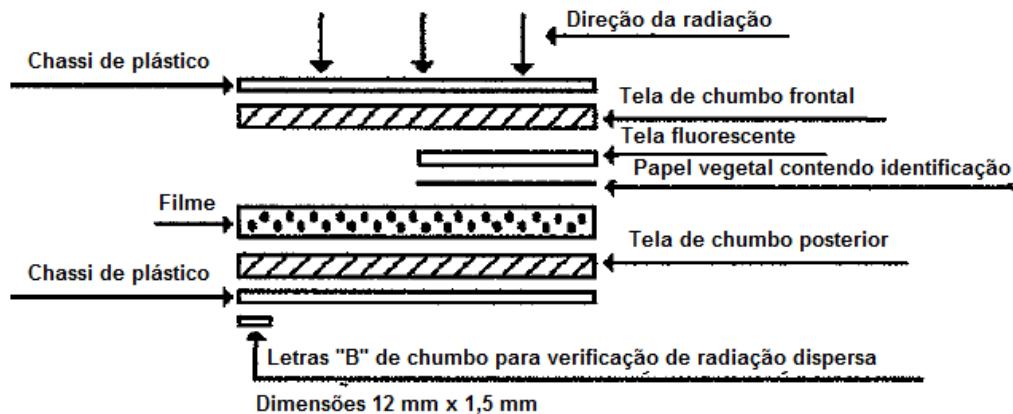


Figura 72 – Desenho esquemático da montagem do chassi.



Figura 73 – Chassi, Tela intensificadora e filme.

A sensibilidade radiográfica foi verificada pelo indicador de qualidade da imagem (IQI). No presente estudo a técnica radiográfica empregada é denominada PS-VS- Parede Simples – Vista Simples. Para esse tipo de técnica o IQI, foi posicionado do lado da fonte, de acordo com a ASME SE-1025 e SE-747 [44]. A qualidade radiográfica deve apresentar uma imagem perfeitamente definida, bem como os números e letras de identificação e o arame essencial bem visível. Neste trabalho adotou-se o fio essencial equivalente a 0,008" em função da espessura da amostra metálica. O arame essencial utilizado foi o de número 13, de acordo com a Tabela 14. A Figura 74, mostra o posicionamento do IQI na amostra.

Tabela 6 – Equivalência entre os IQIs.

Tabela de equivalência entre penetrâmetros de fio - ASTM E EM	
ASTM - Diâmetro do Fio Essencial (pol)	EM/ Fio Essencial
A - 0,0063	14
A - 0,008	13
A/B - 0,010	12
B - 0,013	11
B - 0,016	10
B - 0,020	9
B - 0,025	8
B/C - 0,032	7
C - 0,040	6
C - 0,050	5
C - 0,063	4
C - 0,080	3
C/D - 0,010	2
D - 0,126	1

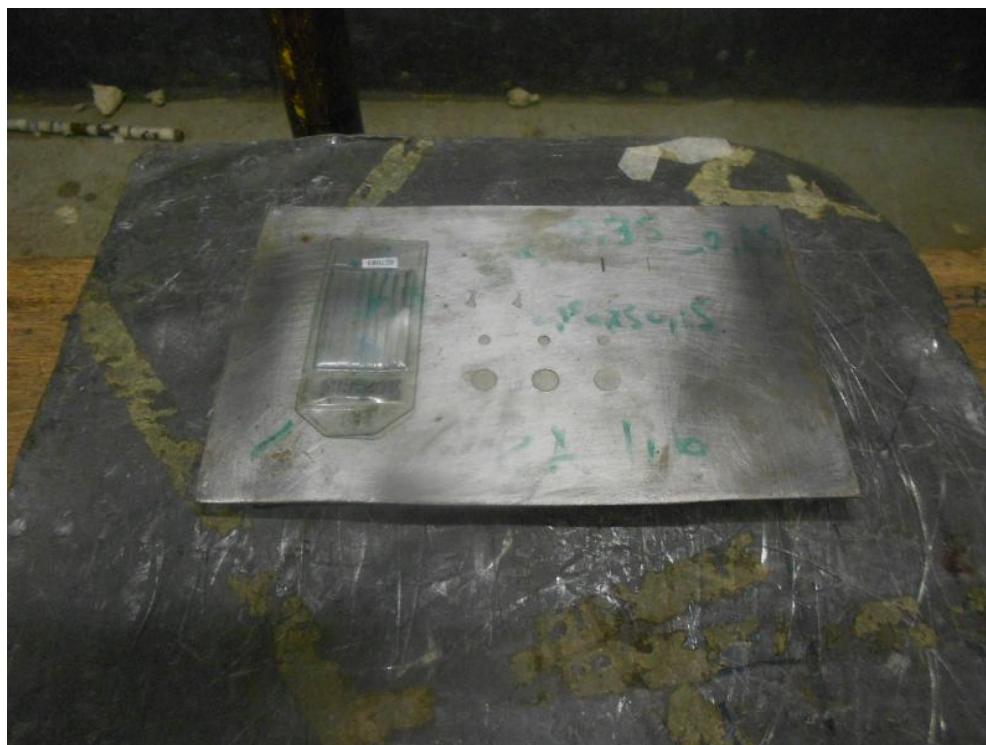


Figura 74 – Posicionamento do IQI.

Na amostra metálica, os ensaios foram realizados com uma distância da fonte ao filme de 520 mm. Na Figura 75 observa-se o posicionamento da fonte em relação ao filme dentro do *bunker* antes do ensaio radiográfico.



Figura 75 – Distância fonte filme na amostra metálica.

Na amostra de compósito, o filme foi fixado na superfície externa do tubo, como pode ser verificado na Figura 76.



Figura 76 – Distância fonte filme na amostra do tubo compósito.

O tempo de exposição das amostras dentro do *bunker* foi calculado de acordo com as curvas de exposição. Os tempos podem ser verificados na Tabela 15.

Tabela 7 – Tempos de exposição das radiografias.

Isótopo	Tempo de exposição	
	Amostra	
	Metálica	Compósito
Selênio - 75	2 min 05 s	52 segundos
Irídio - 192	1 min 40 s	16 segundos
Raios X	55 segundos	30 segundos

No processamento dos filmes foi utilizado um laboratório radiográfico composto dos equipamentos e acessórios de câmara escura: lanterna de segurança, lâmpada de 15 W, filtro Kodak 1 A e massa úmida (tanque de processamento) com 3 divisões, agentes químicos e água. Termômetro para controle da temperatura nos tanques, filtro de água. Secadora com exaustão quente e frio e um negatoscópio de intensidade variável. Na Figura 77 observa-se o layout do laboratório.

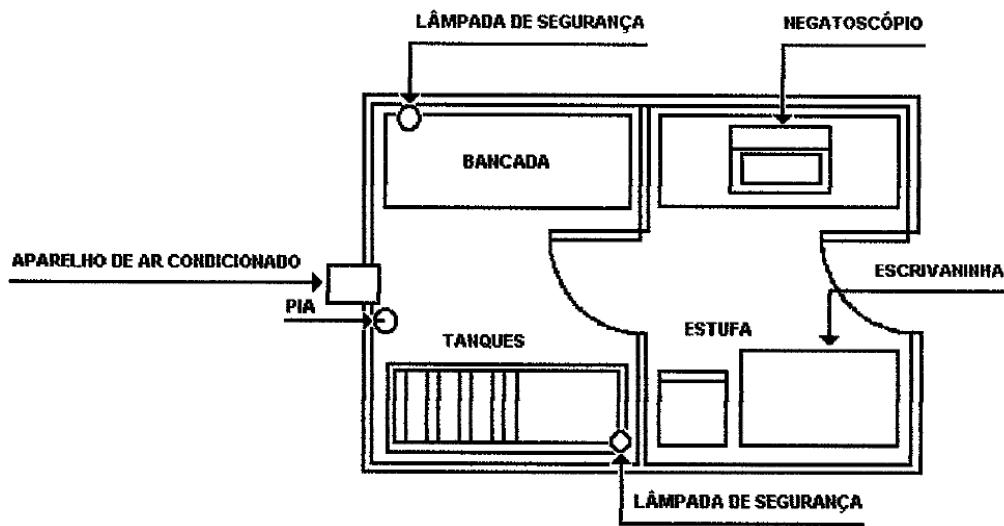


Figura 77 – Layout do laboratório.

Na Tabela 16, observa-se os fabricantes e marcas comerciais dos agentes químicos usados, destacados em negrito.

Tabela 8 – Agentes químicos usados na revelação dos filmes radiográficos.

Revelador		Fixador		Água	Agent e umectante
Fabricante	Marca comercial	Fabricante	Marca comercial		
KODAK	Industrex	KODAK	Industrex	Filtrada	AGEPON
AGFA	Structurix G 128	AGFA	Structurix G 328	Filtrada	ASPERGOL
					PHOTO FLOOD

O processamento dos filmes foi realizado de acordo com a prática SE-94 do artigo 22 do código ASME-V [44] e foi composto das etapas de revelação, banho de parada, fixação, lavagem final, banho final e secagem. Os filmes foram presos a colgaduras para imersão nos agentes químicos. Cada banho foi preparado em recipientes individuais. A Figura 78 ilustra o tanque com as divisões dos agentes químicos e na Figura 79 observa-se o filme secando na estufa, pendurado pelas colgaduras.

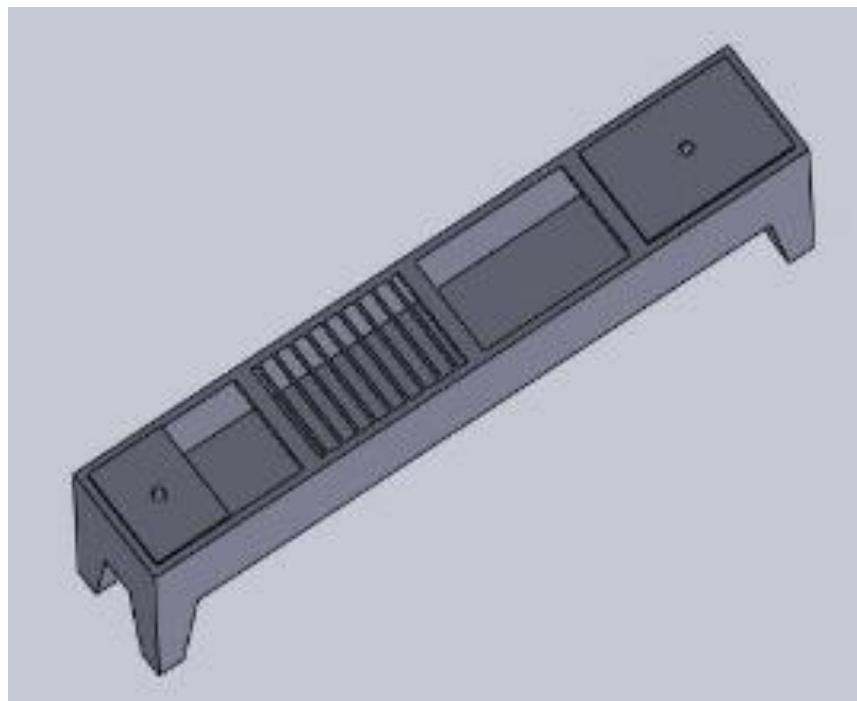


Figura 78 – Desenho esquemático do tanque com os agentes químicos usados na revelação dos filmes radiográficos.



Figura 79 – Secagem do filme na estufa.

3.3. Ensaio radiográfico computadorizado

O ensaio radiográfico computadorizado foi realizado com a finalidade de aumentar a capacidade de detecção das descontinuidades existentes nas amostras. A técnica radiográfica executada foi PS-VS parede simples vista simples. As radiações utilizadas foram o raios X e os isótopos Selênio-75 e Irídio-192.

3.4. Equipamento radiográfico

O equipamento de radiografia usado foi composto por um PC, monitor e Leitor ótico – Kodak, modelo ACR 2000i. O software adotado foi o INDUSTREX da Kodak e telas aquisitoras (para rastreamento da imagem processada) Kodak modelo HR. Na Figura 80 observa-se o laboratório para revelação do ensaio radiográfico.



Figura 80 – Laboratório para execução do ensaio radiográfico computadorizado.

3.5. Partículas magnéticas

O material inspecionado foi a amostra metálica e sua superfície foi limpa com detergente orgânico e seca com pano limpo.

3.6. Aparelho

Os aparelhos disponíveis aos ensaios se encontram na Tabela 17, sendo aquele utilizado nesta dissertação destacado em negrito.

Tabela 9– Yoke usado no ensaio por partículas magnéticas.

Fabricante	Modelo	Tensão de alimentação
Metal-Check	HMM-6 (pernas móveis)	110/220 V
Magnaflux do Brasil / Magnaflux-Imaden	Y-6B (pernas móveis) Y-6 (pernas móveis)	110/220 V
Serv End	SEY – 101/A (pernas móveis)	127/220 V

O yoke aplicado em todos os ensaios foi do fabricante Metal-Check, modelo HMM-6 com pernas móveis e tensão de alimentação de 110/ 220 V. A técnica de magnetização foi longitudinal e a corrente de magnetização foi a corrente alternada. Na Figura 81 observa-se o yoke usado no ensaio.



Figura 81 – aparelho utilizado no ensaio.

3.7. Processos

3.7.1. Via úmida visível

As partículas ferromagnéticas usadas foram do fabricante Metal-Check, tipo RW – 222, cor vermelha, veículo aquoso formado por água e condicionador BC – 502 / BC – 502 SN, 30 a 50 mL / L e concentração de preparo 10,0 g/L.

A tinta de contraste aplicada foi a do fabricante Metal-Check, do tipo Supermagma 104 e o modo de aplicação foi o aerosol. Na Figura 82 observa-se a tinta de contraste e na Figura 83 sua aplicação na amostra.



Figura 82 – Tinta de contraste usada no ensaio por partículas magnéticas.



Figura 83 – Tinta de contraste sendo aplicada na amostra metálica.

A suspensão das partículas foi mantida sob agitação constante durante a execução do ensaio e foram aplicadas por meio de aspersão com borrifador manual.

A verificação da decantação das partículas foi realizada de acordo com a norma ASTM E-706, usando um tubo centrífugo tipo pera.

A primeira etapa, antes da execução do ensaio foi a realização do teste de elevação de carga e o yoke levantou uma massa de 5,5 kg. O ensaio foi executado através do método contínuo, ou seja a magnetização externa permaneceu atuando durante a aplicação das partículas, formação e observação das indicações. O yoke foi posicionado nas direções horizontal, vertical e oblíqua em relação a maior dimensão da chapa (245 mm), cobrindo toda a área da chapa. A Figura 84 apresenta a execução do ensaio.



Figura 84 – Execução do ensaio por partículas magnéticas.

3.7.2. Via úmida fluorescente

As partículas ferromagnéticas usadas foram do fabricante Metal-Check, tipo LY – 200, veículo água + condicionador BC – 502/ BC – 502 SN, 30 a 50 mL/L e concentração de preparo 1,3 g/L. O ensaio foi executado num ambiente escuro e o yoke foi posicionado nas direções horizontal, vertical e oblíqua em relação a maior dimensão da chapa (245 mm) cobrindo toda a área da chapa.

Dois tipos de rastreamento das descontinuidades foram aplicados. No primeiro, as pernas do yoke estavam separadas na dimensão de 100 mm, e, no segundo rastreamento as pernas foram aproximadas para a dimensão de 30 mm, para concentração do campo magnético. As Figuras 85 e 86 demonstram esse processo.



Figura 85 – Inspeção com as pernas do yoke no espaçamento de 100 mm.

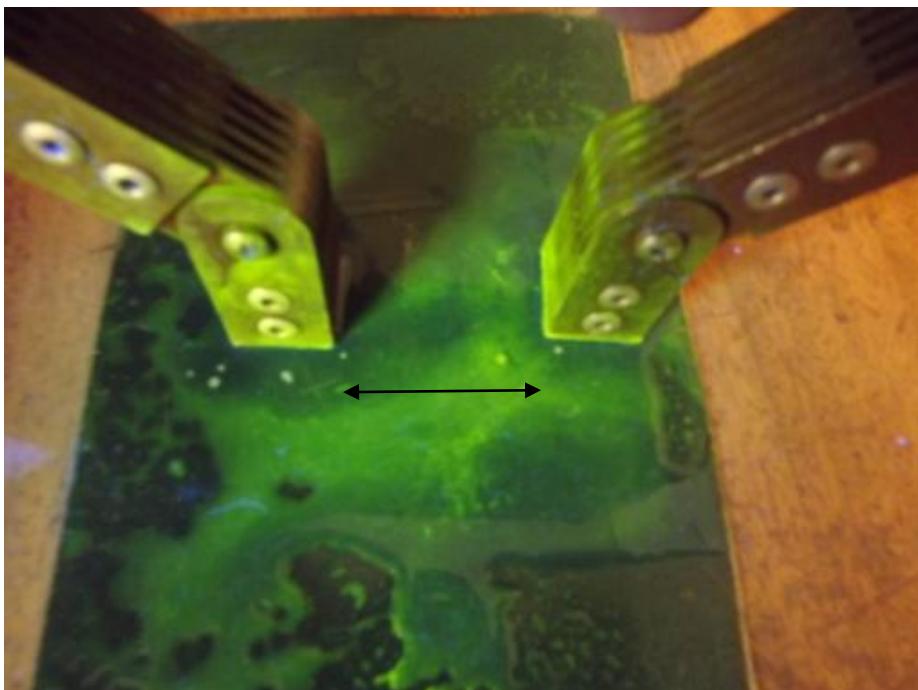


Figura 86 – Inspeção com as pernas do yoke no espaçamento de 30 mm.

3.8. Ensaio por ultrassom

O ensaio por ultrassom foi realizado através de dois métodos:

MÉTODO PULSO ECO – Neste ensaio os equipamentos usados foram de dois tipos.

Na amostra metálica: aparelho de ultrassom digital, modelo Epoch 600, marca Olympus e transdutor monocristal Panametrics – NDT, modelo PF 4R – 10, frequência 4 MHz dimensão de 10 mm.

Na amostra do compósito: aparelho de ultrassom digital, modelo USM 35, da marca GE, transdutor angular de 70°, modelo MWB 70-4, de dimensões 8 mm x 9 mm, frequência 4 MHz.

As velocidades de propagação usadas foram:

Amostra metálica - 3200 m/s.

Compósito - 2700 m/s.

A Figura 87 e 88 apresentam os ensaios sendo executados.



Figura 87 – Execução do ensaio por ultrassom método pulso eco na amostra metálica.



Figura 88 – Execução do ensaio por ultrassom método pulso eco na amostra do tubo compósito.

MEDIÇÃO DE ESPESSURA – Neste método foi usado o aparelho, modelo DM-4 da marca GE, cabeçote DA 401 operando a 5 MHz, duplo cristal. A calibração do aparelho na amostra metálica foi realizada com o bloco padrão. No compósito a calibração foi efetuada medindo-se a amostra com paquímetro. Nas Figuras 89 e 90 pode-se observar a calibração e o ensaio sendo executado na amostra metálica e do compósito, respectivamente.



Figura 89 – Calibração do aparelho de ultrassom.



Figura 90 – Execução do ensaio por ultrassom pelo método medição de espessura na amostra do tubo compósito.