4
Preparação experimental

Neste capítulo serão apresentadas todas as etapas desenvolvidas para a realização dos ensaios e testes experimentais. Isto envolve basicamente a elaboração e desenvolvimento de técnicas para a obtenção de um envelhecimento acelerado do material composto em estudo, sob as condições de radiação UV, água em temperatura de 70°C e temperatura de 70°C, bem como os testes realizados para a verificação da influência deste envelhecimento nas propriedades mecânicas e obtenção dos parâmetros determinantes neste processo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

4.1.
Ambientes de envelhecimento

Diversos foram os fatores considerados para escolha de qual ambiente seria levado em conta no estudo do envelhecimento do material composto em questão:

- **Radiação UV:** uma parte não desprezível dos dutos reparados com materiais compostos encontram-se em ambientes aéreos, onde neste tipo de ambiente um fator que normalmente encontra-se presente é a ação da radiação solar. Daí o interesse em analisar como se dá o seu processo de envelhecimento, quando submetidos a doses elevadas de radiação ultravioleta tipo UV. A temperatura média para este ambiente foi definida como 35ºC.

- **Água a temperatura elevada (70ºC):** considerando a aplicabilidade que este tipo de reparo vem tendo em dutos que estão em ambientes aquáticos e que muitos deles transportam substâncias a uma temperatura elevada, o que os mantém aquecidos. E ainda, considerando que num raio próximo à superfície do duto, a água, por transmissão de calor, também estaria

a um temperatura próxima de 70ºC, fez surgir o interesse em analisá-los sob estas circunstâncias;

- **Temperatura elevada (70ºC):** pelos mesmos fatores expostos anteriormente, porém considerando dutos aéreos. Outro ponto importante é a necessidade de isolar o fator temperatura, para que uma análise comparativa seja feita entre temperatura e água a temperatura elevada e radiação.

Vale salientar que em nenhuma das condições simuladas os dutos apresentavam-se pressurizados, todos encontravam-se a pressão atmosférica.

4.2. Estruturação

Abaixo segue o detalhamento de todo o processo de elaboração e concepção dos meios de envelhecimento.

4.2.1. Materiais

- **Caracterização do tubo estudado:**

Foi utilizado um tubo de aço carbono com 3 polegadas de diâmetro, 6,0 m de comprimento, sendo este cortado em 10 segmentos menores de 0,50 m. O mesmo apresentou limite de escoamento, Sy = 262 MPa, medido a 0,5% da deformação total, e limite de ruptura, Su = 294,7 MPa (valor obtido da Dissertação de Mestrado[4], por tratar-se de dutos similares ao utilizado nesta tese).

Os segmentos de dutos passaram por um processo de fresamento onde em sua parte central foi usinado um rebaixo com comprimento de 50 mm, largura de 14 mm e profundidade aproximada de 0,80mm, conforme mostrado nas figuras 4.1 e 4.2, objetivando simular condições de um duto danificado por perda metálica localizada por corrosão externa. O tubo apresenta uma espessura média de 2,04mm, medida em 8 pontos ao redor do duto, com a utilização de um micrômetro de ponta, vide tabela 4.1. Inicialmente tentou-se utilizar um medidor

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

ultrassônico, porém, devido à pequena espessura e o diâmetro reduzido a exatidão não foi boa. Estas medições apenas indicam que todos os segmentos possuíam aproximadamente a mesma espessura já que apresentavam a mesma leitura. Os defeitos foram medidos através de um relógio comparador, onde duas medidas foram identificadas, cada uma referente a uma extremidade do duto. Tais medidas apresentam divergências uma vez que se tratam de espessuras mínimas e de difícil exatidão no momento da usinagem, vide tabelas 4.1 e 4.2.

Espessura do Duto		
Pontos	Lado A (mm)	Lado B (mm)
1	2,04	2,03
2	2,04	2,04
3	2,04	2,04
4	2,04	2,04
5	2,05	2,05
6	2,05	2,05
7	2,04	2,04
8	2,04	2,03

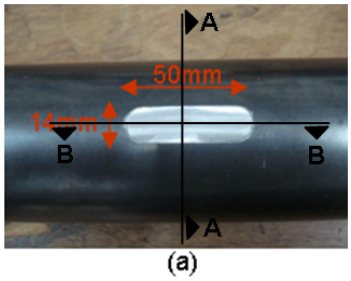
Tabela 4.1 – Medição da espessura do duto

Dutos	**Profundidade lado A (mm)**	**Profundidade lado B (mm)**
1	0,89	0,84
2	0,77	0,84
3	0,73	0,84
4	0,79	0,79
5	0,77	0,78
6	0,77	0,77
7	0,77	0,73
8	0,81	0,77
9	0,74	0,75

Tabela 4.2 – Profundidade dos defeitos

Conforme a figura 4.1, nas extremidades dos segmentos foram soldados flanges cegos para que, ao final do envelhecimento, pudessem ser ensaiados em testes hidrostáticos que os levasse a ruptura.

Figura 4.1 – Dutos



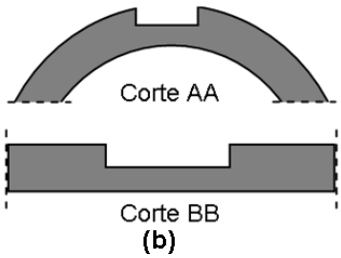


Figura 4.2 – Defeito usinado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

- **Caracterização e aplicação do material composto:**

O material composto utilizado é constituído de reforço por fibra de vidro e matriz de resina epóxi, onde as fibras do tecido estão distribuídas igualmente com 50% das fibras em uma direção e 50% na direção perpendicular. Após a cura completa da resina epóxi, o material composto transforma-se em homogêneo. Tal cura é ativada através de água ou qualquer outro líquido a base de água, podendo ser curado também em ambientes totalmente imersos em água ou ainda através da aplicação de spray de água. Durante o processo de cura, uma pequena quantidade de dióxido de carbono é liberada. Em qualquer uma destas situações, as características do produto final serão as mesmas e o tempo médio de vida do mesmo em prateleira é de aproximadamente 12 meses. O material é normalmente fornecido sob a forma de tecido impregnado com resina epóxi em rolos de 0,20m de largura e 9,14m de comprimento. Tal material foi gratuitamente fornecido e aplicado pela empresa OPTEC[*] nos segmentos de dutos.

Neste caso, o material foi recebido na forma de placas laminadas de 25 cm x 25 cm, para confecção dos corpos de provas para os ensaios de tração e flexão, e um rolo empacotado a vácuo, para aplicação do reparo no duto. O rolo só deve ser aberto no momento da aplicação do reparo, visto que a própria umidade do ar pode iniciar o processo de cura, que leva em média de 30 a 60 minutos.

Segue algumas das principais funções para qual este material pode ser aplicado:

- Reforço e/ou reabilitação de dutos;
- Proteção contra abrasão;
- Proteção contra corrosão;
- Proteção dielétrica.

Figura 4.3 – Material composto

[*] 19 – OPTEC - Vide Apêndice E - Glossário

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 seguem a caracterização das propriedades mecânicas, especificações técnicas e testes realizados pelo fabricante:

Propriedades Mecânicas		
Ensaios	**Normas**	**Resultados**
Tensão máx. de tração	ASTM – D3039/D638	35670psi / 245 MPa
Tensão máx. de flexão	ASTM – D790	26280 psi / 180MPa
Tensão máx. de compressão	ASTM – D695	12820 psi / 90 MPa
Tensão de cisalhamento interlaminar	ASTM – D2333-70	3850 psi / 25 MPa
Temperatura de transição vítrea	ASTM – E831	122ºC

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas (informações do fabricante)

Especificações técnicas	
Ensaios	**Normas**
Número de camadas	Para dutos < 10", mínimo de 8 camadas; Para dutos > 10", mínimo de 10 camadas.
Tempo de cura	30 - 60 minutos
Temperatura máx. para instalação	177º C
Método de aplicação	Aplicação de água em cada camada

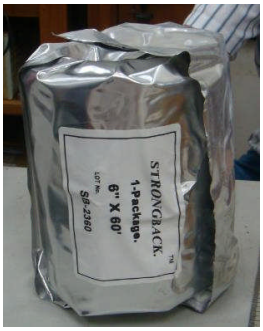
Tabela 4.4 – Especificações técnicas (informações do fabricante)

Testes realizados		
Químico	**Período de imersão**	**Resultados**
Acetona	30 dias	Aprovado
Óleo Diesel	30 dias	Aprovado
Álcool Etílico	30 dias	Aprovado
Gasolina	30 dias	Aprovado
Solução com 30% de HCL	30 dias	Aprovado / ligeiramente amolecido
Tolueno	30 dias	Aprovado
MEK (metiletilcetona)	30 dias	Aprovado

Tabela 4.5– Testes realizados (informações do fabricante)

Os espécimes tubulares foram reparados com 8 camadas de tecido do reparo. Não se obteve acesso ao dimensionamento do número de camadas por tratar-se de propriedade da empresa. A espessura total do reparo foi de aproximadamente 2,48mm, onde cada camada tem espessura aproximadamente de 0,31mm. Os reparos foram curados na temperatura ambiente de 25ºC com aplicação de água. A figura 4.4 apresenta a sequência de aplicação:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA



1- Material embalado a vácuo

2 – Aplicação da resina epóxi de secagem rápida no defeito

3 - Demarcação para aplicação do material composto

4 – Aplicação da resina epóxi de secagem lenta

5 – Aplicação das camadas

6 – Aplicação provisória de um filme para manter a umidade e garantir uma melhor cura

Figura 4.4 – Sequência de aplicação do reparo

O procedimento de aplicação do reparo resume-se em:

- Identificação da área danificada e elaboração do plano de reparo a ser executado;
- Preparar a superfície de aplicação do reparo, retirando as impurezas (ferrugens, graxas, óleos, etc.) conforme a norma SSPC SP3 (lixamento) [66];
- Aplicar somente sobre a área danificada o epóxi branco e preto GS154 Strongback de secagem rápida (mistura em proporções que podem variar até 1/3 e 2/3). Esta aplicação visa preencher e nivelar a área com defeito;
- Cobrir toda a área demarcada com epóxi azul e amarelo GS561 Strongback de secagem moderada, com uma fina camada aplicada de maneira a não deixar vazios entre esta área e o material composto. A área deve ser coberta de maneira que não seja possível visualizar a superfície do duto. O emprego da resina na superfície do duto objetiva aumentar a afinidade química da interface entre a camada niveladora e o material composto, facilitando assim a aderência entre os mesmos. Esta aplicação é de fundamental importância para garantir a aderência entre o material composto e a superfície do tubo;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

- Aplicar o composto Strongback com o mínimo de 8 camadas para dutos com diâmetro de até 10" e mínimo de 10 voltas para maiores que 10". O número de camadas deve estar em conformidade com o plano de reparo elaborado pela OPTEC;
- Durante a aplicação do reparo, deverá ser usada água para umedecer e agilizar o processo de cura;
- Após a aplicação, envolver o composto com filme de PVC visando a retenção da umidade e aceleração do processo de cura, com um mínimo de 2 camadas de sobreposição de 55%, sem perfurar o filme;
- Após 60 minutos, retirar o filme PVC e o reparo esta pronto.

Seguem ainda algumas condições e considerações importantes fornecidas pelo fabricante sobre este reparo:

- O duto não pode apresentar vazamentos;
- Pode ser aplicado com o duto pressurizado ou não;
- A temperatura máxima de aplicação é 177 ºC;
- O reparo é considerado permanente em dutos com danos externos e com espessuras comprometidas em até 80%;
- Pode ser aplicado em trechos retos, curvos ou derivações;
- Pode ser aplicado em qualquer diâmetro e pressão máxima de 28 MPa;
- Pode ser aplicado em tubulações aéreas, enterradas ou submersas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

4.2.2. Envelhecimento por radiação UV

A câmara de radiação UV foi preparada tendo como base a idéia de funcionamento das câmaras QUV que simulam envelhecimento por radiação, controlando tempo, comprimento de onda, umidade e temperatura. Inicialmente pensou-se na aquisição desta câmara, porém os custos envolvidos na compra (aproximadamente R$50.000,00) e manutenção eram altos, considerando que não há outros projetos previstos para sua utilização. De maneira simples e comparativa, foi projetada uma câmara de dimensões 0,10m x 0,60m x 0,40m para que os dutos coubessem em seu interior e que a superfície superior dos

mesmos estivessem a uma distância média de 30cm da lâmpada, atendendo assim as especificações do fabricante. Inicialmente a câmara foi equipada com bocais de cerâmica objetivando simular a radiação infravermelha[1]. Em seguida, optou-se pela utilização de lâmpadas fluorescentes de radiação UV, mais conhecida como luz negra, considerada em geral como predominantemente de radiação UVA. Foram instaladas 3 lâmpadas distribuídas igualmente. Como revestimento interno, foi aplicado papel alumínio para melhorar a reflexão da radiação. No interior da câmara foi mantido um termômetro e um copo com nível de água demarcado para garantir certa umidade do ar dentro da câmara. Após dois dias de funcionamento, a temperatura se manteve constante em aproximadamente 35ºC em todos os pontos da câmara.

Para confecção da câmara de envelhecimento, conforme figura 4.6, os seguintes materiais foram utilizados:

- Caixa de madeira de dimensões 1,0m x 0,60m x 0,50m;

- 03 lâmpadas tipo luz negra, marca Sylvania. Seguem abaixo dados da lâmpada e na figura 4.5, espectro luminoso similar a uma lâmpada de Luz Negra:

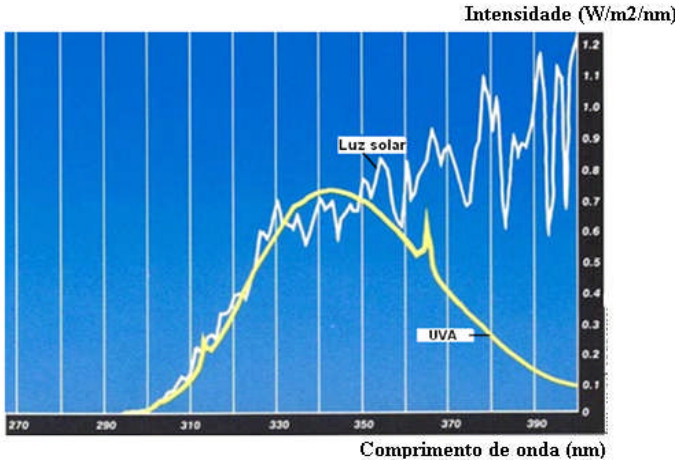


Figura 4.5 – Espectro Luz Negra [67]

Potência (Watts)	Comp. (mm)	Diâm. (mm)	Fluxo Lum. (lm)	Rendim, (lm/W)	Cor (K)	Vida Média (horas)
30 W	909	38	2,7	84	4000	7.500

- Papel alumínio;

- Material elétrico.

[1] Porém, em testes inicias deparou-se com uma temperatura aproximada de 85ºC para uma única lâmpada. Como se fazia necessário a aplicação de 8 lâmpadas para garantir uma distribuição mais uniforme, já que este tipo de lâmpada possui foco, tal experimento tornou-se impraticável.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

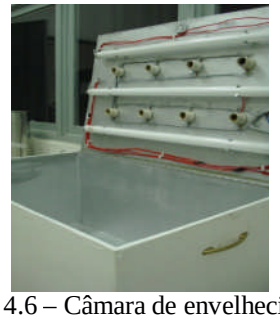


Figura 4.6 – Câmara de envelhecimento

4.2.2.1
Fonte de Iluminação

Para simular o efeito de degradação da luz solar na câmara de envelhecimento, fez-se necessário uma análise da intensidade e comprimento de onda em condições reais de exposição versus o tipo de dano que se pretendia simular, e para efeito de análise dos resultados, assumiu-se como sendo linear o processo de envelhecimento.

Primeiramente, através do site http://clima.meteored.com foi encontrada a irradiância média total provoca pelo sol na região de Teresópolis, medida durante o período de 24 horas. Da tabela 2.10, tem-se que 5,6% desta radiação encontram-se na região UVA, 0,5% na região UVB e 6,1% distribuídos nas regiões UVA e UVB. Desta forma, pode-se concluir que a distribuição diária aproximada de radiação UVA do sol em 2007, em Teresópolis, foi de 0,9 mW/cm^2, UVB de 0,08 mW/cm^2 e UVA+UVB de 1,0 mW/cm^2 conforme tabela 4.6.

TERESÓPOLIS	TEMP. DIÁRIA	MAX. ANUAL	MÍN. ANUAL	INT. MÉDIA	INT.MÉDIA DIÁRIA - UVA (5,6%)	INT.MÉDIA DIÁRIA – UVB (0,5%)	INT. MÉDIA DIÁRIA- UVA/UVB (6,1%)
PERÍODO 2007	(°C)	(°C)	(°C)	mW/cm^2	mW/cm^2	mW/cm^2	mW/cm^2
JAN	25.6	34.9	19.9	14.1	0.8	0.07	0.9
FEV	26.6	35.9	19.9	19.1	1.1	0.10	1.2
MAR	26.4	37.9	20.9	21.7	1.2	0.11	1.3
ABR	25.8	35.9	19.9	16.5	0.9	0.08	1.0
MAI	22.1	30.9	14.9	11.3	0.6	0.06	0.7
JUN	21.6	30.9	14.5	12.9	0.7	0.06	0.8
JUL	20.9	29.9	13.9	13.5	0.8	0.07	0.8
AGO	21.2	29.9	15.9	15.7	0.9	0.08	1.0
SET	22.0	32.9	16.9	17.1	1.0	0.09	1.0
OUT	22.4	30.8	16.2	18.6	1.0	0.09	1.1
NOV	23.4	35.9	17.9	15.3	0.9	0.08	0.9
DEZ	25.4	35.9	19.9	21.2	1.2	0.11	1.3
MÉDIA 2007	**23.6**	**33.5**	**17.6**	**16.4**	**0.9**	**0.08**	**1.0**

Tabela 4.6 – Dados Metrológicos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Segue mostrada na figura 4.7, a posição da cidade de Teresópolis com relação à cidade do Rio de janeiro:

Figura 4.7 – Dados metereológicos retirados de Teresópolis

A escolha da lâmpada depende da definição da velocidade em que o teste vai ser realizado e da degradação pretendida. As lâmpadas diferem basicamente no total de energia UV emitida e sua distribuição espectral.

As lâmpadas UV fluorescentes são usualmente categorizadas como lâmpadas UVA, UVB ou UVC, dependendo da região em que maior parte de sua irradiação se situa:

- Região UVA, 320 a 400 nanômetros;
- Região UVB, 280 a 320 nanômetros;
- Região UVC, abaixo de 280 nanômetros (não usada em testes de intemperismo).

Indicadas para diversas aplicações, as lâmpadas UVA fornecem um espectro mais extenso. Pelo fato de não possuírem irradiação abaixo do valor de corte da luz solar, de 295nm, elas não fazem degradação de materiais tão rapidamente quanto às lâmpadas UVB, mas de qualquer maneira são usadas frequentemente e fornecem melhor correlação com o efeito do intemperismo natural externo real.

Desta forma, este processo objetiva induzir mudanças nas propriedades do material associadas às condições de uso. Tal exposição não objetiva simular a deterioração causada por fenômenos climáticos localizados como, poluição atmosférica, ataques biológicos, etc.

Com base nas características da lâmpada e no tempo de envelhecimento pretendido, optou-se por lâmpadas fluorescentes do tipo - LUZ NEGRA – Sylvania 30 W. Segundo informações fornecidas pelo fabricante, este tipo de lâmpada apresenta uma intensidade média total de 2,7 mW/cm^2, considerando um

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

ponto a uma distância média de 30cm, e tem radiação predominantemente UVA e UVB, conforme demonstrado qualitativamente no Apêndice C, [79]. O UV desta lâmpada é obtido principalmente através de uma lâmpada fluorescente sem a proteção do componente (fósforo) que a faz emitir luz visível. Dentro do tubo de vidro da lâmpada há um vapor (mercúrio) que, na passagem de elétrons, emite radiação no comprimento de onda do ultravioleta. Esta radiação liberada atinge a borda interna da lâmpada que é revestida por fósforo. O fósforo excitado devido à energia recebida re-emite energia em comprimentos de onda do visível.

Assim, com base nos dados da tabela 4.5 e nas informações fornecidas pelo fabricante da lâmpada utilizada, tem-se:

Considerando apenas a emissão de radiação UVA informada pelo fabricante e radiação UVA do Sol:

- Intensidade média total da lâmpada (para uma distância média de 30cm) = 2,7 mW/cm^2 *
- Intensidade média do sol em radiação UVA = 0,9 mW/cm^2
- Fator Intens. Média lâmpada / Instens. Média Sol em radiação UVA = 3
- Período Médio de exposição ao Sol diariamente = 8 horas

Tendo a câmara um funcionamento de 24h por dia, e considerando sua radiação constante e uniforme, obteve-se uma aproximação equivalente a 3 dias de 8h de radiação em apenas 01 dia.

Logo, 01 dia na câmara equivale a 3 x 3 ≈ 9 dias. Considerando o período de 12 semanas simulado, isto seria o equivalente a 756 dias ou 2,1 anos. Por tratar-se de 3 lâmpadas com distribuição uniforme na câmara, o tempo total simulado foi de aproximadamente 6,3 anos.

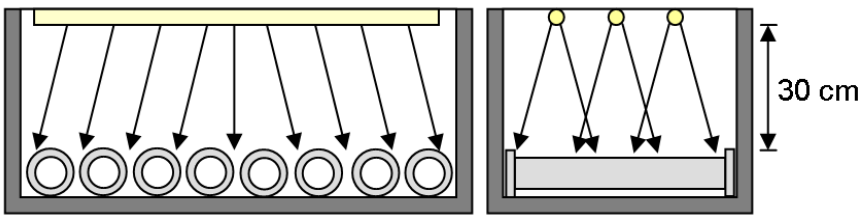


Figura 4.8 – Distribuição da radiação dentro da câmara.

* Esta intensidade, fornecida pelo fabricante para uma distância de 30cm, não foi comprovada pelas medidas de laboratório.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Visando confirmar a análise anterior, tentou-se inicialmente comprovar e medir a existência da radiação UVA dentro da câmara, porém, não foi possível conseguir um radiômetro.* Optou-se então pela tentativa de utilizar fitas UVTEC para medir a radiação, porém sem sucesso. Os resultados apresentados coloriram toda a fita uniformemente e não foi possível obter uma boa leitura. Uma solução alternativa foi a utilização de um jogo de filtros.* A partir desta análise, pode-se confirmar além presença de radiação UVA, a presença de radiação UVB na câmara. A informação qualitativa proveniente da análise mostrada no Apêndice C permite os cálculos apresentados nos parágrafos seguintes:

Considerando apenas a emissão de radiação UVA medida experimentalmente e radiação UVA do Sol:

- Intensidade média UVA da lâmpada (Vide Apêndice C) (para uma distância média de 30cm) = 0,370 mW/cm^2
- Intensidade média do sol em radiação UVA (conforme tabela 4.6) = 0,9 mW/cm^2
- Fator Intens. Média lâmpada / Instens. Média Sol em radiação UVA = 0,41
- Período Médio de exposição ao Sol diariamente = 8 horas

Logo, 01 dia na câmara equivale a 3 x 0,41 ≈ 1,23 dias. Considerando o período de 12 semanas simulado, isto seria o equivalente a 103,6 dias ou aproximadamente 3,5 meses.

Considerando apenas a emissão de radiação UVB medida experimentalmente e radiação UVB do Sol:

- Intensidade média UVB da lâmpada (Vide Apêndice C) = 0,396 mW/cm^2
- Intensidade média do sol em radiação UVB (conforme tabela 4.6) = 0,08 mW/cm^2

* Não se logrou conseguir um radiômetro em outros laboratórios. O custo (aproximadamente R$15.000,00) e o tempo necessário para importação inviabilizavam sua compra.

** Filtros sugeridos para análise pelo Professor Assistente Marco Cremona do Departamento de Física – PUC – Rio. Vide Apêndice C

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

- Fator Intens. Média lâmpada / Instens. Média Sol em radiação UVB = 4,95
- Período Médio de exposição ao Sol diariamente = 8 horas

Logo, 01 dia na câmara equivale a 3 x 4,95 ≈ 14,85 dias. Considerando o período de 12 semanas simulado, isto seria o equivalente a 1247,4 dias ou aproximadamente 3,4 anos.

Considerando apenas a emissão de radiação UVA/UVB medida experimentalmente e radiação UVA/UVB do Sol:

- Intensidade média UVA/UVB da lâmpada (Vide Apêndice C) = 0,766 mW/cm^2
- Intensidade média do sol em radiação UVA/UVB (conforme tabela 4.6) = 1,0 mW/cm^2
- Fator Intens. Média lâmpada / Instens. Média Sol em radiação UVA/UVB = 0,766
- Período Médio de exposição ao Sol diariamente = 8 horas

Logo, 01 dia na câmara equivale a 3 x 0,766 ≈ 2,3 dias. Considerando o período de 12 semanas simulado, isto seria o equivalente a 193 dias ou aproximadamente 6 meses e meio.

Desta forma, com base nas análises acima, pode-se perceber que a câmara conseguiu simular uma radiação mais intensa que a solar, provocando assim um ambiente mais danoso, principalmente com relação à radiação UVB, diferente do que foi previsto inicialmente, porém com a vantagem de poder-se trabalhar de forma mais bem controlada e por períodos seguidos de 24horas.

4.2.3.
Envelhecimento por temperatura elevada (70ºC)

Para este tipo de envelhecimento foi utilizado um forno Photolastic (faixa de 40º a 230ºC), conforme figura 4.9. A temperatura foi mantida constante a 70ºC por 24h por dia, com um pirômetro registrando sua temperatura e um termômetro de mercúrio instalado em seu interior para comparação.

A temperatura provoca a agitação das moléculas da resina epóxi e consequentemente a quebra das ligações mais fracas. Com a quebra destas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

ligações, pode-se ter a formação de novos compostos ou mesmo a perda de rigidez devido à diminuição do tamanho das cadeias moleculares.

Figura 4.9 – Forno Photolastic

4.2.4.
Envelhecimento por água a temperatura elevada (70ºC)

Utilizando-se o mesmo forno mostrado anteriormente, foi posicionado em seu interior um recipiente tubular com diâmetro de 6" para que um espécime tubular reparado pudesse ficar imerso em água. Foi utilizado também um outro reservatório para imersão de corpos de prova de tração e flexão. Ambos reservatórios tiveram o nível da água completado diariamente.

Além do processo semelhante ao provocado pela temperatura elevada, a umidade pode ter duas ações diferentes nos mecanismos de degradação de materiais poliméricos. Primeiro seria provocar uma tensão mecânica pelo inchamento e contração do material. O segundo seria sua participação nas reações químicas do polímero tais como hidrólise direta[*], ou indireta da cadeia, formando principalmente radicais hidroxilas.

4.2.5.
Medições de Temperatura

Para medição da temperatura, foram utilizados os equipamentos abaixo listados. Os mesmo, sempre que possível, foram posicionados o mais próximo possível dos espécimes.

[*] 20 – Hidrólise Direta - Vide Apêndice E - Glossário

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

- Termômetro de mercúrio: com faixa de 0°C a 110°C e subdivisão de 1°C em 1°C, utilizado para medir a temperatura dentro do forno;
- Termopar (VICHY VC99): com faixa de temperatura de - 40°C a 110°C utilizado para medir a temperatura dentro da câmara de envelhecimento.

4.2.6. Cronograma de envelhecimento

O processo de envelhecimento foi dividido conforme a tabela 4.7, onde θ representa o meio sob temperatura de 70°C, $\theta_{úmido}$ o meio com água em temperatura de 70°C e, UV, o meio com exposição de radiação ultravioleta e temperatura de 35ºC.

Os corpos de prova para os ensaios de tração e flexão foram confeccionados a partir de chapas quadradas, já curadas, formadas por fibra de vidro e resina epóxi, do mesmo material utilizado no reparo dos espécimes tubulares.

Na tabela 4.7 tem-se o quantitativo dos espécimes testados em cada etapa de análise:

Semanas	Datas	Horas	Material	Não envelhecido	θ	$\theta_{úmido}$	UVA
-	-	0	Corpos de prova (cp) / dutos com e sem reparo	2 cp tração 2 cp flexão 1 Duto com reparo 1 Duto sem reparo e sem defeito 1Duto sem reparo e com defeito	-	-	-
1º	9/12/2008	168	Corpos de provas / dutos reparados	-	2 cp tração 2 cp flexão	2 cp tração 2 cp flexão	2 cp tração 2 cp flexão 1 Duto
3º	30/12/2008	504	Corpos de provas / dutos reparados	-	1 cp tração 1 cp flexão	1 cp tração 1 cp flexão	2 cp tração 2 cp flexão 1 Duto
5º	13/1/2009	840	Corpos de provas / dutos reparados	-	1 cp tração 1 cp flexão	2 cp tração 1 cp flexão	2 cp tração 2 cp flexão 1 Duto
10º	17/2/2009	1680	Corpos de provas / dutos reparados	-	2 cp tração 2 cp flexão	2 cp tração 2 cp flexão	2 cp tração 2 cp flexão 1 Duto
12º	10/3/2009	2016	Corpos de provas / dutos reparados	-	1 cp tração 1 cp flexão 1 Duto	1 cp tração 1 cp flexão 1 Duto	1 Duto

Tabela 4.7 – Cronograma geral de envelhecimento

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

4.2.7.
Ensaios realizados

Todos os ensaios de tração, de flexão, absorção de água e teor de resina, foram realizados no ITUC PUC – Rio*. Os testes de ruptura por pressão interna dos espécimes tubulares foram realizados no CTDUT– Campos Elíseos.

4.2.7.1
Análise para determinação da absorção de água

Os ensaios foram realizados de acordo com o método descrito na norma ASTM D 570 “Standard Test Method for Water Absorption of Plastic”, Procedimento 7.1. [68]

Os corpos de prova foram acondicionados numa estufa a uma temperatura de 50°C, durante um período de 24 horas. A etapa posterior consistiu na imersão dos corpos de prova em água destilada a uma temperatura de 50°C, por um período de 24 horas. Todas as etapas acima descritas foram acompanhadas de pesagem.

4.2.7.2
Análise para determinação do teor de resina

Os ensaios foram realizados de acordo com o método descrito na norma ISO 1172 “Textile Glass Reinforced Plastics - Determination of Loss on Ignition”. [69]

Os corpos de prova foram acondicionados numa estufa a uma temperatura de 50°C, durante um período de 24 horas e posteriormente pesados. A etapa posterior consistiu na queima da resina a temperatura de 650°C seguido de pesagem final.

4.2.7.3
Ensaios de tração

Para que os corpos de prova tenham um número suficiente de fibras na direção transversal, que represente as propriedades do material, dimensões

* 21 – ITUC - PUC - Vide Apêndice E - Glossário

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

mínimas são estabelecidas segundo a norma ASTM D3039 (Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials) [70]. A mesma foi utilizada como base para todos os ensaios de tração.

Tais corpos foram confeccionados com dimensionamento das abas de maneira a prevenir o aparecimento de falhas prematuras durante aplicação do carregamento. Alguns cuidados como alinhamento, material a ser utilizado, ângulo de aplicação, tipo de adesivo para as abas, tipo de garra e pressão na garra, foram adotados no momento de sua confecção.

Segue nas figuras 4.10 e 4.11, a representação esquemática dos corpos de prova bem como os copos de provas utilizados nos ensaios. A tabela 4.8 apresenta o dimensionamento recomendado segundo a norma ISO 24817:

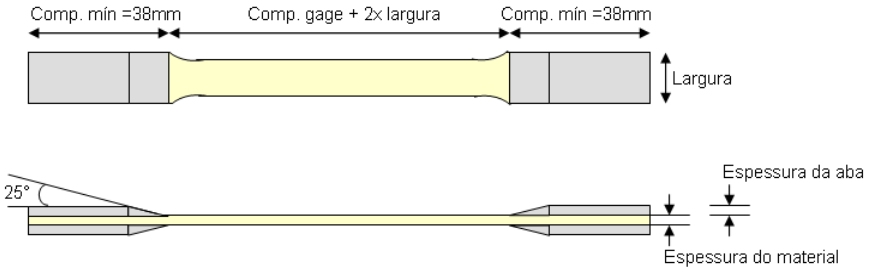
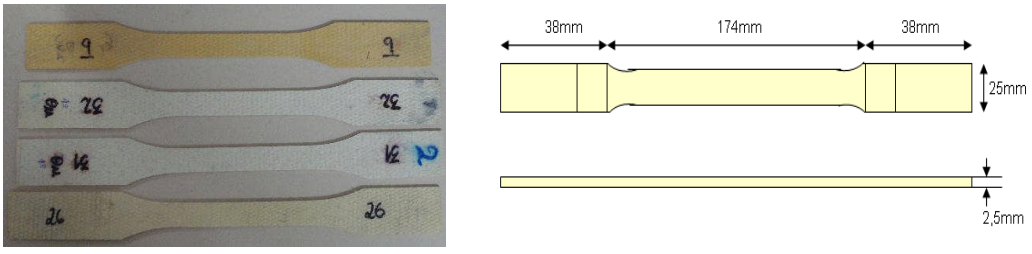


Figura 4.10 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração – ISO24817

Geometrias recomendadas para ensaio de tração em fibras						
Orientação das fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Esp. (mm)	Comp. Aba (mm)	Esp. Aba (mm)	Ângulo da Aba (°)
0° Unidirecional	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° Unidirecional	25	175	2,0	25	1,5	90
Fios descontínuos	25	250	2,5	-	-	-
Simétricos*	**25**	**250**	**2,5**	-	-	-

*Material utilizado nesta tese apresentava distribuição simétrica das fibras.

Tabela 4.8 – Geometria dos corpos de prova – ISO24817



(a) (b)

Figura 4.11 – Corpos de prova dos ensaios de tração.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada uma máquina INSTRON, modelo 5500R, conforme figura 4.12. Os ensaios foram realizados a velocidade de 2mm/min de deslocamento entre as garras, em conformidade com a norma mencionada. O programa utilizado para captura dos dados foi Bluehill 2.

Figura 4.12 – Máquina com corpo de prova para ensaio de tração

4.2.7.4
Ensaios de flexão

Para realização dos ensaios de flexão, a norma ASTM D790-03 (Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials) [71] foi tomada como referência.

Os corpos de prova apresentaram o dimensionamento, conforme a figura 4.13:

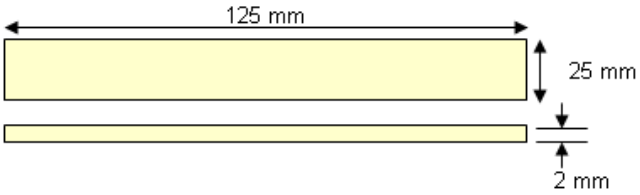


Figura 4.13 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de flexão

Figura 4.14– Máquina com corpo de prova para ensaio de flexão

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

Para a realização dos ensaios de flexão foi utilizada a mesma máquina dos ensaios de tração, porém com a adaptação conforme figura 4.14 acima. Todo o ensaio foi realizado a taxa de 0,01 mm/mm/min, em conformidade com a norma mencionada. O programa utilizado para captura dos dados foi Bluehill 2.

4.2.7.5
Ensaios de ruptura dos espécimes tubulares

Os ensaios de ruptura dos espécimes tubulares foram realizados no laboratório do CTDUT em Campos Elíseos – RJ, onde já existe toda uma estrutura montada para este tipo de ensaio. Segue abaixo o detalhamento da preparação experimental:

1. Enchimento do espécime tubular com água;
2. Retirada de ar da mangueira que pressuriza o espécime tubular com água;
3. Acoplamento de válvula, por meio de rosca, permitindo a injeção de água;
4. Amarração do espécime tubular ao cavalete;
5. Reset dos parâmetros no programa AQdados 7;
6. Acionamento da bomba hidráulica, dando início à pressurização no interior do duto (vide figura 4.15);
7. Aumento da pressão de forma relativamente constante, através de uma válvula controladora de pressão do ar comprimido de acionamento da bomba (vide figura 4.15);

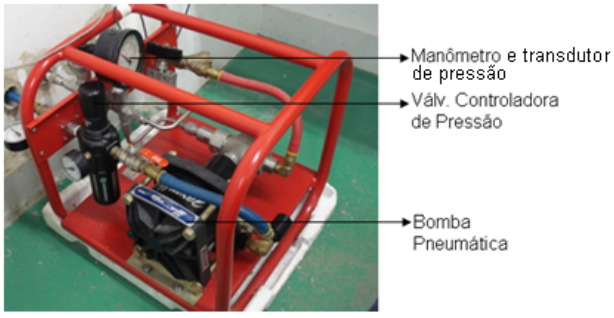


Figura 4.15- Conjunto Bomba / Acessórios

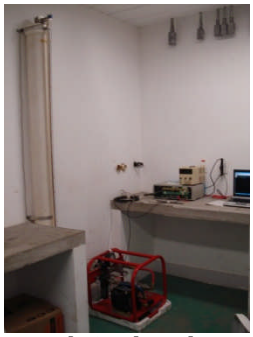
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

8. Monitoramento constante do ensaio através do programa AQdados 7 da empresa LYNX na aquisição dos sinais de pressão e variação de volume;
9. Após o rompimento do espécime tubular, a bomba pneumática é desligada e o ensaio finalizado;
10. O duto é então retirado e os dados são salvos. Este processo foi repetido para todos os demais espécimes tubulares.

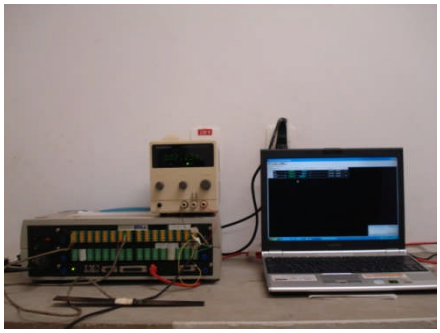
Segue abaixo uma lista dos equipamentos utilizados nos ensaios de ruptura dos espécimes tubulares. A figura 4.16 mostra estes equipamentos:

1. Bomba hidráulica HASKEL, com acionamento pneumático, para pressurização do duto, equipada com manômetro Aschcroft e transdutor de pressão Gefran (0 a 500bar);
2. Tubo em PVC com água para ser injetada no espécime tubular. O mesmo possui uma escala e um sensor resistivo para medição do volume de água injetado;
3. Sistemas condicionador de sinais Lynx ADS 2000 e software AQdados 7 para medição e registro da pressão interna e da variação do volume;
4. Válvula para ser acoplada (rosqueada) ao duto para a injeção de água;
5. Estrutura utilizada para suportar o duto durante os ensaios (cavalete);
6. Monitor de acompanhamento e filmagem dos ensaios.

1-Bomba hidráulica com acionamento pneumático



2-Medição do volume de água injetado



3-Condicionador de sinais Lynx ADS 2000 e software AQdados 7 para medição e registro da pressão interna e da variação do volume

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA

4-Enchimento do duto

5-Estrutura suporte

6-Filmagem

Figura 4.16- Equipamentos utilizados no Ensaio de ruptura

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711115/CA