

## 6

# Discussão

Neste capítulo serão descritos os principais pontos encontrados no pré e pós-envelhecimento versus realização dos ensaios.

### 6.1.

#### Radiação UV

Observou-se nitidamente a mudança gradativa na coloração dos cp submetidos à radiação UV, bem como a perda de brilho e um processo de esfarelamento apenas na camada superficial exposta diretamente à radiação, conforme figuras 6.1, 6.2 e 6.3. Este esfarelamento encontra-se notadamente na primeira camada, não vindo a comprometer as demais. Considerando que o reparo era composto por oito camadas e apenas a primeira foi danificada, uma boa aproximação seria a consideração de uma perda de 1/8 das propriedades do reparo. O esfarelamento e a mudança de coloração estão diretamente ligados à ocorrência de um processo foto-oxidativo, onde a cisão das cadeias poliméricas combinadas com a formação de reticulações podem ser as responsáveis pela formação de microfissuras, e consequentemente pelo esfarelamento. Tais alterações podem comprometer esteticamente a função deste material a depender de sua aplicação, bem como sua função estrutural, caso um período maior de exposição permita que a radiação atravesse as demais camadas. Neste caso, uma solução simples seria a instalação de uma camada extra de proteção, que já é inclusive mencionada e sugerida pela ISO 24817, e comprovada através do resultado encontrado na Tabela 6.1. Ainda em complemento a esta análise, foi colocado dentro da câmara de envelhecimento uma caixa de material polimérico termoplástico, possivelmente PS, presente no laboratório há alguns anos, vide figura 6.4. Esta nunca havia apresentado qualquer alteração de cor. Entretanto, após exposta à radiação por duas semanas, teve sua cor alterada. Após 12 semanas de exposição apresentou-se mais quebradiça, vindo a comprovar uma

maior dosagem de radiação dentro da câmara, bem como a ocorrência do processo de foto-oxidação.

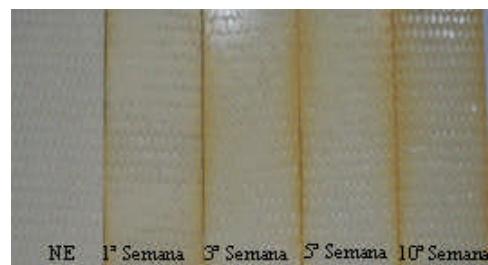
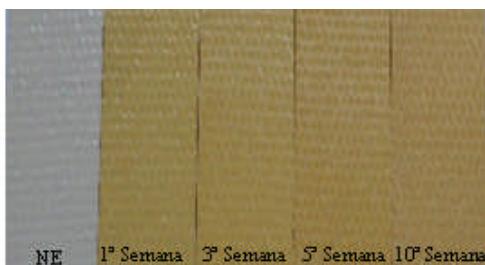


Figura 6.1 – Efeito da radiação sob a coloração

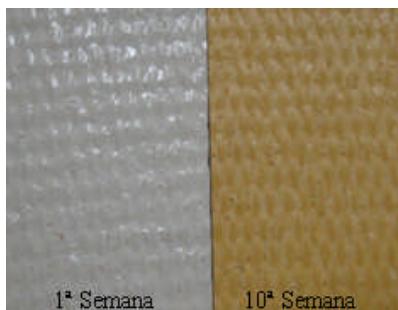


Figura 6.2 – Alteração da cor e perda de brilho



Figura 6.3 – Reparos expostos à radiação



Figura 6.4 – Material exposto à radiação

Nos gráficos 5.1 – Ensaios de tração, 5.7 - Variação da tensão de ruptura no tempo, 5.11 – Ensaios de Flexão e 5.17 – Variação da tensão no tempo, pode-se perceber que não houve variações significativas nas suas propriedades mecânicas, apontando-se inclusive linhas de tendência com valores pobres nos gráficos 5.7 ( $R^2 = 0,0803$ ) e 5.17 ( $R^2 = 0,3993$ ).

Porém, considerando a análise do comportamento do módulo de Elasticidade, pode-se perceber que no Gráfico 5.2 - Ensaios de tração – UV – Mód. de Elasticidade, o resultado apresentou uma tendência decrescente do módulo, onde  $R^2 = 0,8498$  e a variação do módulo foi de 6% com relação ao material composto não envelhecido. Com relação aos ensaios de flexão, no Gráfico 5.12 – Ensaios de flexão – UV – Mód. de Elasticidade, o resultado não apresentou nenhuma tendência de envelhecimento. A linha de tendência traçada tem característica pobre, onde  $R^2 = 0,0554$ . Entretanto, a variação do módulo foi de

aproximadamente 8,5% com relação ao módulo do material composto não envelhecido.

Provavelmente, a variação do Módulo de Elasticidade esta relacionada ao processo de terminação/cisão das cadeias poliméricas e consequente diminuição da massa molecular. A tabela 6.1 considera os cálculos segundo a ISO 24817. Pode-se perceber que, dimensionando-se o reparo nas condições pré e pós envelhecimento, houve uma variação na espessura da camada (8,3 %), vindo assim a requerer uma camada a mais do que a calculada inicialmente, antes do envelhecimento.

CARACTERÍSTICAS DO REPARO			
$E_c$ (MPa) =	20218	$t_{camada}$ (mm) =	0.31
$E_a$ (MPa) =	20218		
CARACTERÍSTICAS DO DUTO			
$D$ (mm) =	74.2	SMYS(MPa) =	262
$t$ (mm) =	2.03	$F$ =	0.72
$E_s$ (MPa) =	200000	$E$ =	1.00
SMUS (MPa)	310	$T$ =	1.00
CARACTERÍSTICAS DO DEFEITO			
$d$ (mm) =	0.79		
$L$ (mm) =	50		
PRESSÃO DE PROJETO			
$P_{Projeto}$ (MPa)	10.32		
Pressão de Operação			
B31.G		DNV-RP-F101	
$P_{Def}$ =	8.09		8.19
$S_{flow}$ =	288.20		310
$A/A_o$ =	0.26		0.39
$M$ =	3.98		2.48
$F_{Proj}$ =	0.72		0.67
CALCULO DO REPARO			
Espessura			
Considerando B31.G			
$t_{min,c}$ (mm) =	1.86	$F_{eq}$ (N) =	44610.12
Considerando DNV-RP-F101			
$t_{min,c}$ (mm) =	2.99		
Comprimento			
Considerando defeito tipo slot			
$l_{extra}$ (mm) =	24.55	$l_{extra}$ não pode ser < 50mm	
$l$ (mm) =	117.68	$l_{comprido}$ (mm) =	168.59
Considerando defeito tipo circular			
$l_{extra}$ (mm) =	200.00	$l_{extra}$ não pode ser < 50mm	
$l$ (mm) =	468.59		
$l_{chamfrado}$ (5:1) (mm) =	9.29		
Número de camadas			
$n$ =	9.64		

Tabela 6.1 – Resultado ISO 24817 – Pós-envelhecimento (UV)

Quando analisados visualmente e de maneira mais qualitativa, os cp submetidos aos ensaios de flexão não apresentaram ruptura completa, porém, ao tentar rompê-los manualmente, pode-se perceber que aqueles mais envelhecidos

tinham mais fragilidade enquanto os menos envelhecidos apresentavam maior resistência ao rompimento. Desta forma, trata-se então de um caso particular, onde uma possível explicação que justifique a diminuição do módulo de elasticidade e o aumento da rigidez pode estar relacionada com o surgimento de ligações cruzadas. Assim, o módulo diminui devido à quebra da cadeia polimérica e consequentemente diminuição da massa molecular. Porém, ao mesmo tempo em que houve a quebra da cadeia pode ter acontecido a formação de reticulações e grupos  $-\text{OH}$ , estes extremamente reativos, e que, combinados com outras moléculas, podem ter provocado o surgimento de ligações cruzadas, aumentando assim a rigidez do material.

Com relação aos cp submetidos aos ensaios de tração, não se encontrou grande diferença ou tendência entre os formatos de rupturas dos mesmos versus tempo de exposição. Vide figura 6.5 abaixo.

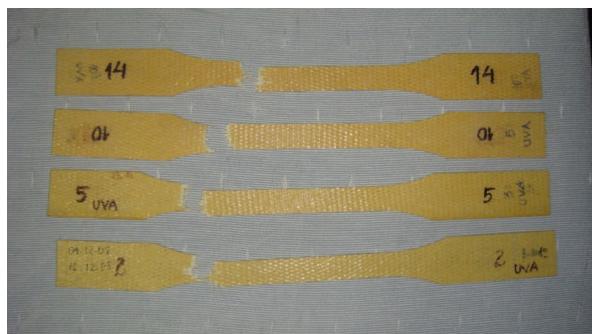


Figura 6.5 – Cp submetidos a ensaio de tração

Nos ensaios de ruptura dos dutos submetidos à radiação UV também não se pode perceber grandes variações mecânicas. A partir dos gráficos 5.22 – Variação da Tensão de Ruptura no tempo e 5.23 – Variação do volume no tempo, foram traçadas linhas de tendência obtendo-se  $R^2 = 0,6983$  e  $R^2 = 0,6088$  respectivamente, porém, não se pode afirmar que refere-se especificamente a algum tipo de envelhecimento do reparo, uma vez que todos os dutos romperam fora do reparo, e desta forma, estaria comparando-se metal versus metal.

Em complemento a esta análise, os dutos reparados foram cortados transversalmente na região do reparo e pode-se comprovar, conforme comentado e estimado anteriormente, que apenas a primeira camada do reparo foi atingida pela radiação.

## 6.2.

### Água em temperatura de 70°C

Visualmente, não se pode perceber grandes diferenças entre os cp retangulares submetidos às condições de pré e pós-envelhecimento em água à 70°C, já o duto submetido a esta mesma condição, apresentou notório processo de corrosão, conforme figura 6.6.



Figura 6.6 – Cp submetidos à água em temperatura de 70°C

Nos gráficos 5.3 – Ensaios de tração, 5.13 – Ensaios de Flexão, 5.8 – Variação da tensão de ruptura no tempo e 5.18 – Variação da tensão no tempo, pode-se perceber que houve certa tendência decrescente das propriedades mecânicas do material, apontando-se inclusive linhas de tendência com valores nos gráficos 5.8 ( $R^2 = 0,8942$ ) e 5.18 ( $R^2 = 0,9693$ );

Considerando a análise do comportamento do módulo de Elasticidade, pode-se perceber que no Gráfico 5.4 - Ensaios de tração – Água em Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade, o resultado apresentou uma linha de tendência pobre com  $R^2 = 0,2534$  e variação do módulo de aproximadamente 5,7% com relação ao material composto não envelhecido. Já com relação aos ensaios de flexão, no Gráfico 5.14 Ensaios de flexão – Água em Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade, o resultado apresentou um tendência decrescente, com boa aproximação da linha de tendência, sendo  $R^2 = 0,9176$  e variação do módulo de aproximadamente 16% com relação ao material não envelhecido. Desta forma, tanto neste caso como no dos cp expostos à radiação UV, pode-se perceber uma diminuição do módulo de elasticidade, que também deve estar relacionada à cisão da cadeia polimérica e consequentemente a diminuição da massa molecular, e uma maior fragilidade ao tentar romper manualmente os cp submetidos aos ensaios de flexão. Este fato, da mesma forma que proposto para o ambiente de UV, pode estar relacionado com o surgimento de grupos -OH, ligações cruzadas e

ainda o aumento da tensão intermolecular pela presença de moléculas de água. Somado a isto, tem-se ainda que as ligações intermoleculares e interatômicas podem ter sido facilitadas e/ou aceleradas pelo processo de hidrólise combinado com a temperatura elevada.

Segue abaixo a tabela 6.2 considerando os cálculos segundo a ISO 24817, onde segundo esta, houve apenas uma pequena variação na espessura da camada (4,8 %).

CARACTERÍSTICAS DO REPARO			
$E_c$ (MPa) =	20680	$t_{camada}$ (mm) =	0.31
$E_a$ (MPa) =	20680		
CARACTERÍSTICAS DO DUTO			
D (mm) =	74.2	SMYS(MPa) =	262
t (mm) =	2.03	F =	0.72
$E_s$ (MPa) =	200000	E =	1.00
SMUS (MPa) =	310	T =	1.00
CARACTERÍSTICAS DO DEFEITO			
d (mm) =	0.79		
L (mm) =	50		
PRESSAO DE PROJETO			
$P_{Projeto}$ (MPa) =	10.32		
Pressao de Operacao			
B31.G		DNV-RP-F101	
$P_{Def}$ =	8.99		8.19
$S_{flow}$ =	288.20		310
A/A <sub>o</sub> =	0.26		0.39
M =	3.98		2.48
F <sub>Proj</sub> =	0.72		0.67
CÁLCULO DO REPARO			
Espessura			
Considerando B31.G			
$t_{min,c}$ (mm) =	1.82	$F_{eq}$ (N) =	44610.12
Considerando DNV-RP-F101			
$t_{min,c}$ (mm) =	2.92		
Comprimento			
Considerando defeito tipo slot			
$l_{extra}$ (mm) =	24.55	$l_{extra}$ não pode ser < 50mm	
$l$ (mm) =	117.26	$l_{corrigida}$ (mm) =	168.17
Considerando defeito tipo circular			
$l_{extra}$ (mm) =	200.00	$l_{extra}$ não pode ser < 50mm	
$l$ (mm) =	468.17		
$l_{chamfrado}$ (5:1) (mm) =	9.09		
Número de camadas			
$n$ =	9.42		

Tabela 6.2 – Resultado ISO 24817 – Pós envelhecimento (Água em temperatura de 70°C)

Comparando-se os cp submetidos aos ensaios de tração, não se encontrou grande diferença ou tendência entre os formatos de ruptura dos mesmos. Vide figura 6.7 abaixo.

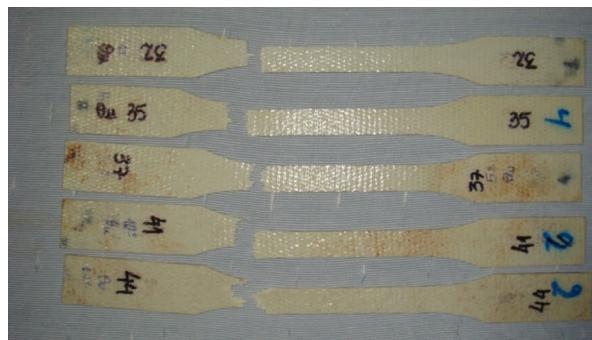


Figura 6.7 – Cp submetidos à água em temperatura de 70°C

No ensaio do duto submetido a este tipo de envelhecimento, também não se pode perceber uma variação mecânica muito significativa quando comparado ao duto não envelhecido, conforme demonstrado na tabela 5.9. Porém, é perceptível que o duto sofreu realmente um processo corrosivo acelerado (figura 6.6), podendo ser identificado visualmente e através do formato da ruptura apresentado. Todos os dutos apresentaram um traçado de ruptura retilíneo, enquanto este apresentou um traçado irregular, como se acompanhasse pequenos pontos de maior corrosão.

### 6.3.

#### Temperatura de 70°C

Na figura 6.8, pode-se perceber que visualmente houve um leve amarelamento entre os cp pré-envelhecimento e pós-envelhecimento.

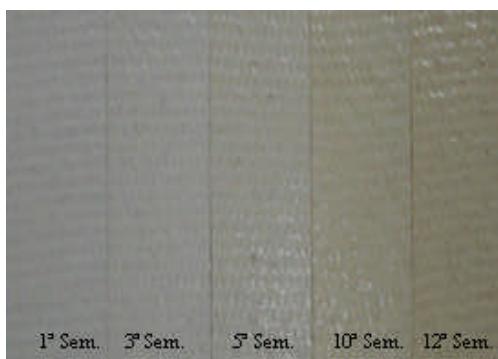


Figura 6.8 – Cp submetidos à temperatura de 70°C

Considerando a análise do comportamento do módulo de Elasticidade, pode-se perceber a partir do Gráfico 5.6 - Ensaios de tração – Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade, que o resultado apresentou uma linha de tendência pobre com  $R^2 = 0,4441$  e variação do módulo de aproximadamente 5% com

relação ao material composto não envelhecido. O mesmo aconteceu com os ensaios de flexão, Gráfico 5.16 - Ensaios de flexão – Temperatura de 70°C – Mód. de Elasticidade, onde  $R^2 = 0,3005$ . Como já explicado, a variação do módulo de elasticidade provavelmente esta relacionada com a cisão da cadeia polimérica e consequentemente uma diminuição da massa molecular.

Analizando os gráficos 5.5 – Ensaios de tração, 5.9 – Variação da tensão de ruptura no tempo, 5.15 – Ensaios de Flexão e 5.19 - Variação da tensão no tempo, pode-se perceber que não houve uma tendência bem definida nas variações das propriedades mecânicas, apontando-se inclusive linha de tendência com valor pobre no gráfico 5.19 ( $R^2 = 0,3399$ ).

Analizando o Gráfico 5.9 – Variação da tensão de ruptura no tempo - Temperatura de 70°C, pode-se perceber uma certa tendência na diminuição da tensão de ruptura. Ainda com relação aos cp submetidos aos ensaios de tração, não se encontrou grande diferença ou tendência entre os formatos de rupturas dos mesmos. Vide figura 6.9 abaixo.



Figura 6.9 – Cp submetidos à condição de temperatura à 70°C.

Segue abaixo a tabela 6.3 que considera os cálculos segundo a ISO 24817, onde pode-se perceber apenas uma pequena variação (1,3%) na espessura da camada requerida entre os resultados pré e pós envelhecimento.

CARACTERÍSTICAS DO REPARO			
$E_c$ (MPa) =	21383	$t_{camada}$ (mm) =	0.31
CARACTERÍSTICAS DO DUTO			
$D$ (mm) =	74.2	$SMYS$ (MPa) =	262
$t$ (mm) =	2.03	$F$ =	0.72
$Es$ (MPa) =	200000	$E$ =	1.00
$SMUS$ (MPa) =	310	$T$ =	1.00
CARACTERÍSTICAS DO DEFEITO			
$d$ (mm) =	0.79		
$L$ (mm) =	50		
PRESSÃO DE PROJETO			
$P_{Projeto}$ (MPa) =	10.32		
Pressão de Operação			
B31.G		DNV-RP-F101	
$P_{def}$ =	8.99	8.19	
$S_{flow}$ =	288.20	310	
$A/Ao$ =	0.26	0.39	
$M$ =	3.98	2.48	
$F_{Proj}$ =	0.72	0.67	
CALCULO DO REPARO			
Espessura			
Considerando B31.G			
$t_{min,c}$ (mm) =	1.76	$F_{eq}$ (N) =	44610.12
Considerando DNV-RP-F101			
$t_{min,c}$ (mm) =	2.83		
Comprimento			
Considerando defeito tipo slot			
$l_{extra}$ (mm) =	24.55	$l_{extra}$ não pode ser < 50mm	
$l$ (mm) =	116.66	$l_{comprido}$ (mm) =	167.57
Considerando defeito tipo circular			
$l_{extra}$ (mm) =	200.00	$l_{extra}$ não pode ser < 50mm	
$l$ (mm) =	467.57		
$l_{chanfro}$ (5:1)(mm)=			
Número de camadas			
$n$ =	9.11		

Tabela 6.3 – Resultado ISO 24817 – Pós envelhecimento (Temperatura de 70°C)

No ensaio do duto submetido a este tipo de envelhecimento, também não se pode perceber uma variação mecânica muito significativa quando comparado ao duto não envelhecido, conforme demonstrado na tabela 5.9

Desta forma, os resultados aqui encontrados não foram muito expressivos, provavelmente em consequência da temperatura de ensaio encontrar-se bem abaixo da temperatura de transição vítreia do composto, somado ao fato de tratar-se de um material amorfó e com ligações cruzadas que fornecem certa estabilidade à estrutura molecular do composto.

## 6.4.

### Comparativo Radiação UV / Água em temperatura de 70°C / Temperatura de 70°C

Considerando os resultados de tração e flexão pode-se perceber que os ensaios que apresentaram maior variação foram àqueles submetidos aos ambientes de radiação UV e água a temperatura de 70°C, pelos motivos já expostos anteriormente.

Considerando as simulações de envelhecimento dos dutos reparados, pode-se perceber no Gráfico 5.24 – Comparativo – Não envelhecido versus 12 semanas de envelhecimento, que o duto submetido ao ambiente de água em temperatura de 70°C apresentou uma menor variação de volume e pressão de ruptura quando comparado àqueles não envelhecidos. Porém, isto provavelmente se deve ao processo de corrosão apresentado pelo duto, e não necessariamente a um processo de envelhecimento do material compostos, conforme já mencionado.

Não se encontrou diferença ou tendência entre os formatos de rupturas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração versus os diferentes tipos de exposição. Vide figura 6.10 abaixo.



Figura 6.10 – Cp submetidos ao ensaio de tração

Com relação aos ensaios de flexão, nenhum dos cp apresentou ruptura completa. Porém, após análise qualitativa, pode-se perceber que àqueles submetidos à radiação UV e água a temperatura de 70°C apresentaram uma maior fragilidade à ruptura. Apenas uma simples tentativa de flexionar os cp ensaiados, permitia a completa ruptura dos mesmos. Vide figuras 6.11 e 6.12 abaixo.



Figura 6.11 – Cp submetidos ao ensaio de flexão



Figura 6.12 – Cp submetidos ao ensaio de flexão