



Durabilidade de varões compósitos entrançados (BCR) submetidos a ambientes agressivos

Diego Hebert Seixas Costa^{1,a}, Raul Fangueiro^{2,b}, José Luís Barroso de Aguiar^{3,c}, Normando Perazzo Barbosa^{4,d}, Phelipe Marconi Freitas Mattos^{5,e}

¹ Universidade do Minho, Portugal

² Universidade do Minho, Portugal

³ Universidade do Minho, Portugal

⁴ Universidade Federal da Paraíba, Brasil

⁵ Universidade do Minho, Portugal

^adiegohebert@hotmail.com, ^brangueiro@civil.uminho.pt, ^caguiar@civil.uminho.pt,
^dnperazzob@yahoo.com.br, ^ephelipemattos@hotmail.com

Palavras-chave: Durabilidade, Fibra, Polímero, BCR, Sustentabilidade.

Resumo. As crescentes necessidades de otimização na área da engenharia civil, tanto no que se refere à velocidade e logística das construções quanto nos aspectos da qualidade e durabilidade dos edifícios, combinadas ao elevado impacto dos materiais estruturais tradicionais nas dimensões econômica, social e ambiental da sustentabilidade, tornam necessário o estudo de elementos construtivos alternativos. Dentre as soluções, estão os polímeros reforçados com fibras (FRP), materiais que, devido às suas características superiores em relação aos convencionais, apresentam várias aplicações potenciais, especificamente os varões compósitos entrançados (BCR) reforçadas com fibras de vidro e/ou carbono que possuem, quando comparadas ao aço, elevado desempenho mecânico, leveza e reduzidos consumos energéticos de produção. Apesar dos avanços, ainda há insuficiente conhecimento a respeito da longevidade destes varões no interior do concreto empregado em elementos estruturais. Deste modo, este trabalho objetiva a avaliação da influência da camada externa na durabilidade de varões compósitos entrançados para tal fim. Para tanto, foram produzidas quatro amostras com reforço constante de fibras de vidro e carbono, com diferentes matrizes epoxídicas termoendurecíveis (tipo 1 e tipo 2) e dois tipos de fibras (poliéster e acrílico), as quais foram submetidas a condições e ambientes agressivos, designadamente, soluções alcalina em temperatura elevada e de cloretos e exposição a raios UV e humidade. Foram ainda desenvolvidas verificações acerca das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos provetes, através de análise microscópica, verificação da variação de massa e de diferença de cor, da realização de espectroscopia infravermelho e ensaio de tração. Ao fim dos ensaios, constatou-se que a configuração de matriz formada por fibra acrílica impregnada com resina tipo 2 é a que apresenta melhores resultados e que os BCR mostraram, de modo geral, bom comportamento ao fim dos 80 dias de ciclo, apresentando adequadas propriedades após a exposição aos ambientes deletérios.

1. Introdução

A degradação prematura das edificações existentes ou de seus elementos, com sua consequente redução de desempenho, é um problema global e bastante corrente, dado, primordialmente, pelo envelhecimento precoce dos materiais empregados desencadeado pela baixa qualidade dos materiais empregados, por problemas de projeto e/ou execução e por falta de conservação nas construções. A citada deterioração aumenta os custos com

manutenção e reparos nas estruturas construídas com materiais tradicionais, designadamente estruturas metálicas e em betão armado.

Buscando-se maior durabilidade e qualidade nas edificações, vários materiais têm sido estudados como alternativa à substituição daqueles usualmente utilizados. Dentre estes materiais, estão os polímeros reforçados com fibras (FRP), materiais que, devido às suas características superiores em relação aos convencionais, apresentam várias aplicações potenciais, especificamente os varões compósitos entrançados de fibras de vidro e/ou carbono com polímeros, (BCR – braided composite rods) que possuem, quando comparadas ao aço, elevado desempenho mecânico, leveza e reduzidos consumos energéticos de produção.

Os BCR são varões leves, com relação tensão de rotura/peso específico elevada permitindo o reforço de elementos de betão nos quais o peso do material é uma condicionante. Esses tipos de varões não sofrem corrosão, eliminando, as necessidades de reabilitação das construções, no entanto, apresentam peso inferior ao dos varões de aço correntemente utilizados para reforço de betão (os BCR são 80% mais leves que os varões de aço). Desta forma, os BCR eliminam os custos de reabilitação e diminuem os custos com transporte para a obra, com deslocamentos internos e aplicação.

Há anos, produtores vêm enfrentando o desafio da economia de energia ao longo do processo de produção do aço, energia essa que tem como fonte principal, o carvão, combustível fóssil altamente prejudicial ao meio ambiente. Verifica-se, então que uma eventual incorporação dos perfis compósitos como alternativa ao emprego do aço causaria menos impactos ambientais relativamente a redução do consumo energético.

Tendo em vista que a durabilidade é um dos fatores mais importantes para o conhecimento, confiabilidade e conseqüente empregabilidade dos novos materiais, constata-se a necessidade de aprofundamento do conhecimento a respeito da longevidade dos varões compósitos entrançados (BCR) quando expostos a diferentes condições e ambientes.

Portanto o objetivo principal deste trabalho é contribuir para o estudo da durabilidade perfis de BCR produzidos pelo método do entrançamento e constituídos por diferentes composições em suas camadas externas.

De maneira geral, pretende-se analisar e quantificar a relação entre o tipo de ambiente de degradação, o período de exposição e a influência dos materiais empregados superficialmente na variação das propriedades mecânicas, físicas e químicas do material compósito em estudo.

2. Materiais e Metodologias.

A campanha experimental deste estudo visa a análise da influência da camada externa na durabilidade em termos de propriedades mecânicas, físicas e químicas, de varões compósitos entrançados (BCR) por períodos de ciclos predeterminados, em diferentes ambientes e condições agressivas. Mais especificamente, foram elaboradas 4 (quatro) tipos de amostras com diferentes composições a partir da variação de dois tipos de fibras (poliéster e acrílico) e de duas resinas epoxídicas (Biresin® CR141 será referida como resina epóxi tipo 1 e a resina Biresin® CR144 como resina epóxi tipo 2) empregadas na matriz para o acondicionamento em 3 diferentes ambientes deletérios - alcalino, de cloretos (salino) e de exposição a raios UV e humidade, por períodos de ciclos de 30, 60 e 80 dias.

A pesquisa teve início na fabricação de 5 (cinco) provetes de cada amostra para cada ciclo, totalizando em 60 (sessenta) corpos de prova por ensaio e 180 no total. Após a produção, os corpos de prova foram colocados em cura durante 24 (vinte e quatro) horas em estufa, à 60 °C, e, então foram pesados para posterior comparação com suas versões envelhecidas.

Cada conjunto de 60 (sessenta) provetes seguiu então para seus respectivos ensaios de durabilidade e ficaram acondicionados durante cada tempo de ciclo predeterminado por ensaio.

Passado o primeiro tempo de ciclo, foram retirados de cada ambiente de ensaio, 20 provetes (5 de cada tipo de amostra), que, após nova cura nas mesmas condições de temperatura as quais estiveram submetidos anteriormente, foram pesados e testados mecânica, física e quimicamente. Os ensaios de durabilidade tiveram continuidade, agora com apenas 40

provetes em cada ambiente, e, em seguida, após o término dos próximos ciclos, os procedimentos descritos foram repetidos.

Paralelamente, 32 provetes de controle foram produzidos (2 corpos de prova por amostra para cada ciclo), os quais não ficaram expostos aos ambientes agressivos de ensaio.

2.1. Constituintes do BCR. Foram desenvolvidas quatro amostras a partir da variação das fibras de revestimento e das resinas escolhidas para a matriz dos varões, a fim de estabelecer uma análise comparativa adequada entre tais materiais. Optou-se por dois tipos de resinas epoxídicas termoendurecíveis de mesma marca e com especificações diferentes e dois tipos de fibras na camada exterior dos provetes: poliéster e acrílico.

As resinas empregadas foram escolhidas devido a sua baixa viscosidade e boa capacidade de impregnação, propriedades adequadas para seu emprego no processo de produção adotado, bem como, sua elevada performance, apropriada para utilização em compósitos de polímeros reforçados com fibras. Para efeito de nomenclatura, a resina Biresin® CR141 será referida como resina epóxi tipo 1 e a resina Biresin® CR144 como resina epóxi tipo 2.

A fibra de poliéster empregada na camada superficial dos varões compósitos possui 192 filamentos, massa linear total de 1100 dTex e massa volúmica de 1,38 g/cm³. Ao passo que a fibra de acrílico empregadas como composição do revestimento externo dos BCR investigados possui massa linear de 500 dTex e massa volúmica de 1,18 g/cm³.

Na fase de reforço, foram empregadas fibras de carbono e de vidro, na proporção de 25% e 75%, respectivamente, em todos corpos de prova. Em relação as fibras de vidro, foram utilizados 3 fios com massa linear de 4800 Tex (g/km), 1 fio com 1200 Tex (g/km) e mais 3 fios com massa linear de 554 Tex (g/km), todas possuindo massa volúmica de 2,54 g/cm³; no que se concerne as fibras de carbono, foram utilizados 3 tipos de fios, um com massa linear de 3200 Tex (g/km) e outros dois com 400 Tex de massa linear (g/km), ambos com densidade de 1,77 g/cm³, composição que totalizou em um diâmetro de aproximadamente 4 mm. Além disso, os varões produzidos foram cortados de modo que os provetes possuíssem aproximadamente 75 cm de comprimento.

A escolha destas fibras como componentes dos varões compósitos ocorreu devido às suas propriedades mecânicas adequadas e facilidade de aquisição e manipulação

2.2. Preparação das amostras. As amostras foram produzidas nas dependências do Laboratório de Processos da Universidade do Minho – Campus Azurém, Guimarães, a partir do processo desenvolvido pelo grupo de investigação Fibrenamics, denominado como técnica de entrançamento, que consiste na combinação e entrelaçamento de fios que compõem a base do entrançado.

A produção teve início com a colocação ou alimentação das fibras de reforço (75% vidro e 25% carbono), quando foram desenroladas das bobinas e colocadas nos diversos olhais cerâmicos, até passarem por sistema de barras metálicas corretamente distanciadas entre si, vertical e horizontalmente, para que as fibras permanecessem tensionadas durante o processo de produção. Posteriormente, tais fibras passam por um balseiro contendo uma das resinas adotadas para a configuração estabelecida, onde ocorre o processo de impregnação entre ambos.

Em seguida, o núcleo envolvido com a resina passa pela máquina de entrançamento, onde o reforço é coberto com as fibras de poliéster ou de acrílico.

A entrançadeira utilizada é da marca TrenzExport, modelo 40/100, e é constituída por 40 bobinas de fio que conferem o entrançado exterior do varão em uma velocidade controlada. O núcleo de fibras que chega da etapa anterior é coberto pelo entrançado exterior de poliéster ou acrílico gerado pela movimentação circular dos fusos com as bobinas. No trecho entre a máquina de entrançamento e a câmara de cura obtém-se um excedente de resina, provocado pela força de compressão dos fios exteriores sobre o núcleo e este é recolhido em uma chapa metálica que se encontra na zona inferior da entrançadeira para reaproveitamento no balseiro.

Na sequência o varão entra na câmara de cura, que tem como objetivo principal a promoção da cura da resina através do calor, permanecendo em uma temperatura em torno dos 180 °C, para que a camada exterior do entrançado não seja danificada. A estrutura da câmara é constituída por um painel tipo sanduiche, composto por duas chapas perfiladas contendo lâ

de rocha no seu interior, com 7,5 cm de espessura. Como fonte de calor, tem dois radiadores domésticos infravermelhos Equation com 1200 W e termóstato.

O processo de tiragem é o último procedimento deste sistema produtivo de materiais compósitos, em que há a existência de um componente que desloca o material a uma velocidade constante através de maxilas que funcionam de forma pneumática, garantindo um deslocamento contínuo do material, puxando-o até que seja obtida a dimensão necessária para a quantidade de provetes que se deseja. Este sistema de tiragem situa-se a jusante da câmara de cura, desta forma, aquando da passagem do varão nas roldanas dentadas, este encontra-se totalmente curado, não causando danos em sua superfície.

Finalmente, após a produção dos provetes, os varões foram acondicionados em estufa a 60°C, permitindo sua completa cura, e, antes que fossem colocados nas condições de envelhecimento, foram identificados com etiquetas, pesados e verificados microscopicamente.

2.3. Preparação de soluções e ambientes.

a) Alcalino: O ambiente alcalino de ensaio foi preparado em conformidade com o Procedimento A, descrito na norma ASTM D7705/7705M-12 – *Standard Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars Used in Concrete Construction*, a qual fornece as exigências padronizadas para a determinação da resistência de varões de FRP a ambientes alcalinos em condições de laboratório. A solução foi preparada em 10 litros de água destilada, em um recipiente com dimensões de 85x45x15 cm, seguindo as indicações de compostos especificados na norma, a saber: 1.185,0 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 9 g de NaOH e 42 g de KOH.

Durante o período de ensaios, realizou-se o acompanhamento e o controle semanal do pH da solução, de tal maneira que seu valor não ficasse fora do intervalo de 12,6 a 13,0 estabelecido por norma. Os períodos dos ciclos foram 30, 60 e 80 dias.

b) Cloretos: A solução salina foi preparada de acordo com a norma ASTM D 1141-98 – *Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water*, a qual especifica os compostos químicos a serem associados para que se tenha uma representação adequada da água marinha. Para a preparação, a norma especifica que devem ser adicionados a 9 (nove) litro de água, dois compostos: cloreto de sódio (245,34 g) e sulfato de sódio anidro; e duas soluções contendo $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (111,12 g), CaCl_2 anidro (11,58 g) e $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,42 g) na solução 1; e KCl (6,95 g), NaHCO_3 (2,01 g), KBr (1,0 g), H_3BO_3 (0,27 g) e NaF (0,03 g) na solução 2. O recipiente (Figura 3 11) com a solução e os corpos de prova foram postos em local com temperatura ambiente e, analogamente ao ambiente de envelhecimento anterior, realizou-se um monitoramento semanal do pH da solução, de modo que seu valor fosse 8,2. O controle ocorreu por meio de adição de solução de hidróxido de sódio. Os períodos dos ciclos foram de 30, 60 e 80 dias.

c) Ambiente de condensação e de exposição a raios UV: Para tal avaliação, os provetes foram acondicionados na máquina QUV *Weathering Tester – Model QUV/spray* do Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil da Universidade do Minho, em ciclos de exposição determinados pelas normas ASTM G 151 e 154 e por referências bibliográficas, que determinam que um ciclo corresponde a 8 horas de exposição a raios UV a 60°C seguido de 4 horas de condensação à 50°C.

Devido a limitação de espaço da máquina, os varões não puderam ser completamente expostos as tais condições, conforme figura abaixo, portanto, sua avaliação não ocorreu por meio de teste de tração, visto que não seria cumprida a norma do ensaio mecânico bem como, não representaria o valor do desgaste sofrido pela amostra propriamente dito. Os provetes foram expostos a 720, 1440 e 1920 horas, ou 60, 120 e 160 ciclos.

2.4. Métodos de caracterização.

a) Variação de massa: Posteriormente à produção dos provetes e cura em estufa a 60°C durante 24 (vinte e quatro) horas, bem como ao fim de cada período de ciclo, lavagem e secagem nas mesmas condições, os varões foram pesados numa balança digital com

precisão de 0,001 g. A massa total dos varões representa o somatório das massas dos seus constituintes, incluindo resina, fibra e o entrançado.

b) Análise microscópica: A verificação microscópica sucedeu a pesagem e utilizou-se microscópio digital com capacidade de ampliação de 500 vezes.

c) Propriedades mecânicas: As propriedades mecânicas dos varões foram avaliadas com recurso a ensaios de tração mecânica uniaxial. Este ensaio permitiu avaliar o grau de proteção da camada externa frente aos ambientes agressivos para os diferentes períodos submetidos, ou seja, a degradação do reforço e da interface fibra-matriz visto que as propriedades de tração dos materiais compósitos dependem majoritariamente destas camadas. Os ensaios de tração foram realizados nas dependências internas do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho – Campus Azurém, Guimarães, baseado na norma de ensaio ASTM D 3916-02 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod*. O equipamento utilizado foi uma máquina universal de tração uniaxial LLOYD LR50K Plus, utilizando uma célula de carga com capacidade máxima de 50 kN. A velocidade aplicada foi de 2,0 mm/min e foi utilizado um comprimento livre entre as maxilas (amarras), de 250 mm.

Foram testados cinco provetes de cada tipo de amostra que tiveram que ser adaptados adequadamente para procedência dos ensaios. Após a retirada da estufa, os varões tiveram 20 cm de suas extremidades lixadas e coladas com resina SikaDur 32-EF a tubos metálicos de mesmo comprimento e diâmetros de 10mm. Este procedimento tem a finalidade de conferir apoio para a estrutura da máquina de tração e para o adequado andamento do ensaio, além de evitar interferências da matriz nos valores mecânicos encontrados.

d) Determinação de cor e escala de cinza: Os ensaios de determinação da cor e escala de cinza basearam-se na norma ISO 105 “*Test For Colour Fastness – Part A05 Instrumental Assessment of Change in Colour for Determination of Grey Scale Rating*” e foi realizado no Laboratório de Ultimação Têxtil na Universidade do Minho, através dos equipamentos Espectrofotômetro de Reflexão DataColor e Câmara de Luz VeriVide.

e) Espectroscopia do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR): O ensaio procedeu-se em um analisador de infravermelho com transformada de Fourier – Avatar 360 Thermo Nicolet (Figura 3 19) na gama dos 4000 a 400 cm^{-1} , com uma resolução de 4 cm^{-1} e 32 varrimentos, no Laboratório de Análise Instrumental nas dependências da Universidade do Minho.

3. Resultados e discussão.

3.1. Comportamento à tração. As Tabelas 1 a 2 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 1 - Descrição das tensões máximas encontradas por amostra.

Ciclo/Amostra	Tensão máxima (MPa)							
	AA	AC	A'A	A'C	PA	PC	P'A	P'C
1° (30 dias)	1799,3	1729,9	1751,5	1769,5	1652,7	1629,0	1708,6	1509,7
2° (60 dias)	1721,0	1699,9	1654,7	1640,5	1575,8	1588,4	1522,4	1387,5
3° (80 dias)	1634,1	1672,6	1590,6	1680,9	1327,6	1563,8	1381,1	1364,1

Tabela 2 - Descrição dos módulos de elasticidade máximos encontrados por amostra.

Ciclo/Amostra	Módulo de elasticidade [E] (MPa)							
	AA	AC	A'A	A'C	PA	PC	P'A	P'C
1° (30 dias)	101.273	108.873	103.201	101.972	100.299	103.359	112.102	104.306
2° (60 dias)	101.496	96.890	101.024	95.035	97.013	98.092	100.275	95.514
3° (80 dias)	95.590	87.495	95.336	94.347	105.684	98.195	98.998	93.729

Pode-se verificar a partir da Tabela 1 uma redução mais acentuada da tensão máxima dos provetes de poliéster submetidos em solução alcalina. Em relação a amostra PA (varão de matriz composta por resina tipo 1 e poliéster como fibra de revestimento inserido em solução alcalina) houve uma redução de 4,7% do valor encontrado no segundo ciclo em relação ao primeiro e 19,7% de queda de resistência ao fim dos 80 dias. Já a amostra P'A (varão composto por poliéster e matriz resinosa tipo 2, inserido em solução alcalina) apresentou uma redução de 10,9% do valor encontrado no segundo ciclo em relação ao primeiro e 19,2% do terceiro para o primeiro.

Observa-se que no geral, as tensões máximas encontradas no último ciclo, após 80 dias, foram superiores para as amostras com revestimento de fibras acrílicas, se comparadas com os provetes compostos por poliéster submetidos as mesmas condições de ensaio.

Por outro lado, analisando a Tabela 2, foi verificado que no geral, os módulos de elasticidade encontrados no último ciclo, isto é, após 80 dias, foram superiores para as amostras com camada externa constituída por fibras de poliéster.

E finalmente, constata-se que é notório a redução dos valores de módulo de elasticidade para a totalidade das amostras após os períodos de degradação (com exceção da amostra PA).

Como próximo recurso de análise, são apresentados diagramas com a progressão de variação dos parâmetros ocorridos nos provetes em cada tipo de ambiente de envelhecimento.

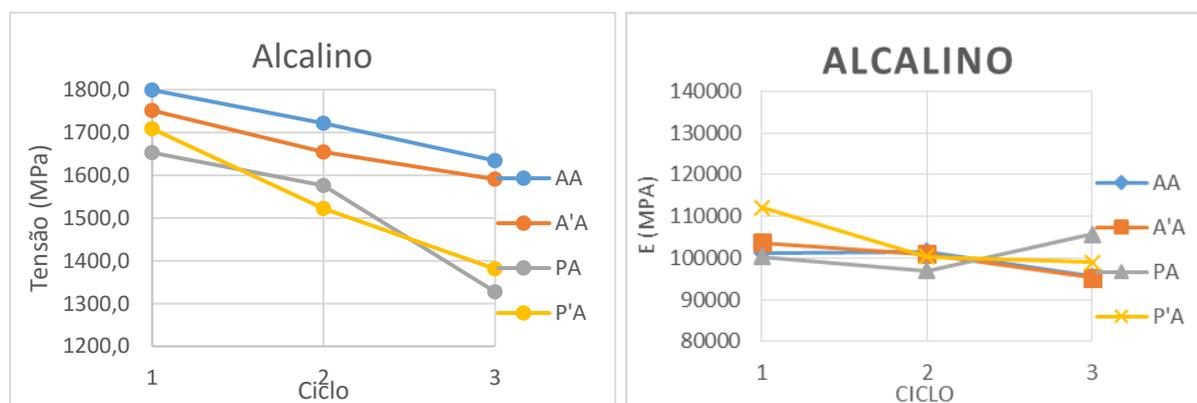


Figura 1 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras em meio alcalino.

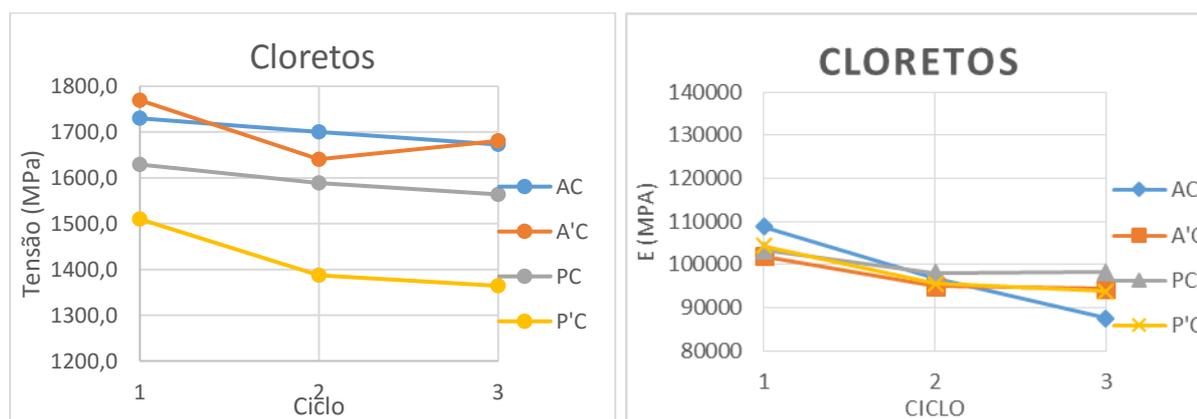


Figura 2 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras em meio de cloretos.

Com base na observação das Figuras 1 e 2, nota-se um decréscimo das grandezas investigadas ao longo dos períodos de ciclo para todos os corpos de prova expostos as soluções de envelhecimento. Convém ressaltar que as curvas do módulo de elasticidade dos 4 tipos de varões estudados convergem para um valor próximo. Entretanto com uma ligeira vantagem para as camadas externas com revestimento de fios de poliéster.

Por outro lado, sob o ponto de vista da tensão, analisa-se que os provetes compostas por fibras acrílicas chegaram ao terceiro estágio do ensaio em solução salina e em ambiente alcalino, com valores superiores aos constituídos com poliéster.

Finalmente, com posse dos dados e análises acima apontados, expõe-se abaixo tabelas que têm por objetivo, fazer um apanhado dos resultados, analisando comparativamente, de forma sucinta, o nível de degradação dos materiais. A Tabela 3 classifica as amostras de acordo com a variação de tensão máxima de ruptura, de modo que os provetes que apresentarem maior variação em relação a suas versões degradadas (após 80 dias) terão menor nota. Analogamente, a Tabela 4 classifica as amostras de acordo com a variação do módulo de elasticidade, de tal forma que os provetes que apresentarem menor variação em relação a suas versões envelhecidas (após 80 dias) terão melhor nota.

Tabela 3 - Classificação das amostras quanto a variação da tensão máxima.

Classificação das amostras (variação de tensão)		
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS
Acrílico + Resina tipo 1	4	4
Acrílico + Resina tipo 2	3	2
Poliéster + Resina tipo 1	1	3
Poliéster + Resina tipo 2	2	1

Tabela 4 - Classificação das amostras quanto a variação do módulo de elasticidade.

Classificação das amostras (variação de E)		
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS
Acrílico + Resina tipo 1	3	1
Acrílico + Resina tipo 2	2	3
Poliéster + Resina tipo 1	4	4
Poliéster + Resina tipo 2	1	2

De mesmo modo, as Tabelas 5 e 6 explanam a classificação das amostras de acordo com os valores máximos de tensão e módulo de elasticidade após o final do terceiro ciclo (80 dias). As classificações mais altas correspondem a propriedades mais elevadas.

Tabela 5 - Classificação das amostras quanto ao valor da tensão máxima.

Classificação das amostras (valor máximo tensão)		
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS
Acrílico + Resina tipo 1	4	3
Acrílico + Resina tipo 2	3	4
Poliéster + Resina tipo 1	1	2
Poliéster + Resina tipo 2	2	1

Tabela 6 - Classificação das amostras quanto ao valor do módulo de elasticidade máximo.

Classificação das amostras (valor máximo E)		
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS
Acrílico + Resina tipo 1	2	1
Acrílico + Resina tipo 2	1	3
Poliéster + Resina tipo 1	4	4
Poliéster + Resina tipo 2	3	2

3.2. Variação de cor. Nas Tabelas 7 a 10 listam-se os valores médios das coordenadas colorimétricas obtidas para os compósitos com camadas exteriores compostas por poliéster e acrílico, respectivamente, após os períodos de exposição. Adicionalmente, apresenta-se a variação da cor, ΔE^* , calculada com base nos valores médios das coordenadas colorimétricas e a classificação da escala de cinza, de acordo com as normas ISO A05 e AATCC, para os provetes degradados.

Tabela 7 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 1 e acrílico com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR				
Partida:	A3	Padrão:	A0	
	ISO A05	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*
D65/10	1-2	10,008	-9,970	-0,759
A/10	1-2	9,992	-9,961	-0,565
D65/2	1-2	10,042	-9,994	-0,833

Tabela 8 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 2 e acrílico com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR				
Partida:	A_3	Padrão:	A_0	
	ISO A05	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*
D65/10	2	7,322	0,079	6,914
A/10	2	8,279	0,681	8,021
D65/2	2	7,389	0,295	6,979



Tabela 9 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 1 e poliéster com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR				
Partida:	P3	Padrão: P0		
	ISO A05	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*
D65/10	1-2	9,395	9,146	1,994
A/10	1-2	9,544	9,280	2,212
D65/2	1-2	9,455	9,206	2,047

Tabela 10 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 2 e poliéster com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR				
Partida:	P_3	Padrão: P_0		
	ISO A05	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*
D65/10	1-2	9,595	8,787	3,841
A/10	1-2	9,562	8,908	3,473
D65/2	1-2	9,645	8,857	3,813

A partir dos resultados, é possível verificar que o valor de ΔE^* obtido para todas as amostras foi superior a zero, evidenciando-se, portanto, uma variação na cor, a qual foi mais significativa no compósito formado por acrílico e resina tipo 1 na matriz (Tabela 7). A mesma amostra apresentou uma redução relevante no valor de ΔL^* e ΔC^* , indicando um escurecimento na cor do provete e uma perda na intensidade da cor amarela respectivamente. Desta análise, elabora-se a Tabela 11. Deste modo, elucida-se que as amostras contendo matrizes do tipo 1 são as mais suscetíveis a variação de cor.

Tabela 11 - Classificação das amostras quanto a variação de cor.

Classificação das amostras			
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS	QUV
Acrílico + Resina tipo 1	-	-	1
Acrílico + Resina tipo 2	-	-	4
Poliéster + Resina tipo 1	-	-	2
Poliéster + Resina tipo 2	-	-	3

3.3. Variação de massa. Nos gráficos seguintes (Figura 3 à Figura 5), é demonstrado o percentual degradado de cada amostra em relação aos ambientes agressivos. A variação percentual da massa é definida tendo como base a massa dos provetes de referência não acondicionados nas condições de degradação (dia 0).

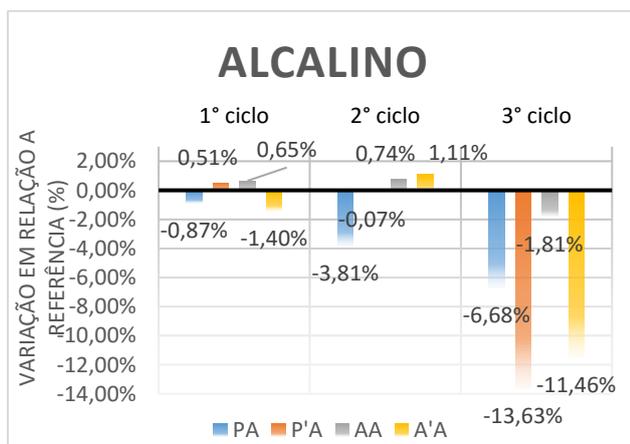


Figura 3 - Perda de massa por degradação em ambiente alcalino.

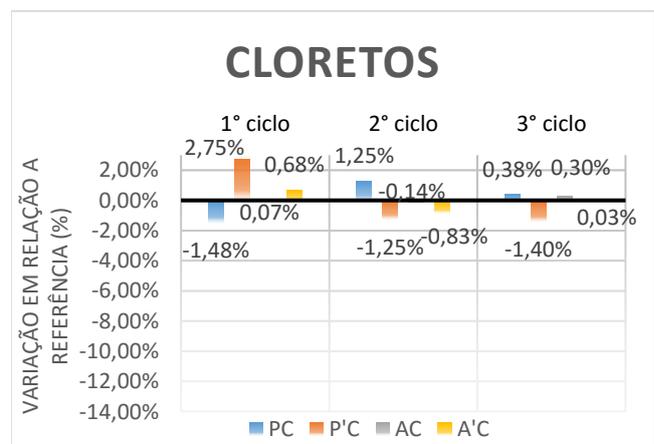


Figura 4 - Perda de massa por degradação em ambiente de cloretos.

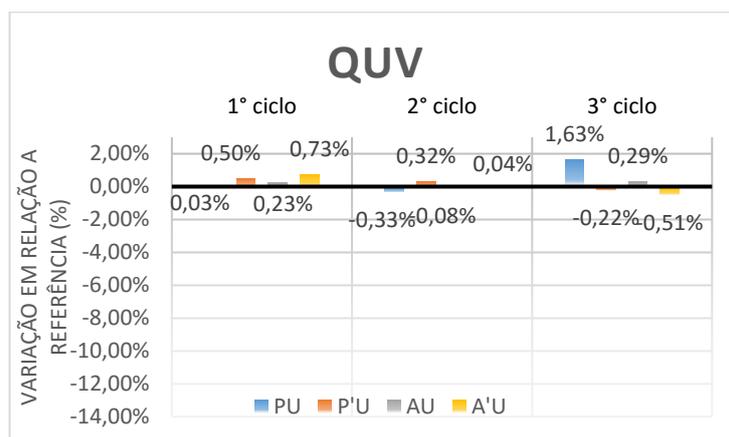


Figura 5 - Perda de massa por degradação ao ambiente de condensação e raios UV.

O ambiente alcalino foi o que demonstrou maior potencial de redução do peso das amostras.

Se por um lado observou-se que, em geral, os valores do primeiro e segundo ciclo se mantiveram aproximadamente constantes, por outro, notou-se que, no terceiro ciclo os provetes submetidos a esta condição tiveram uma redução bastante acentuada. Fato ocorrido, pelo desgaste excessivo dos provetes em exposição, levando a perda de material da camada externa;

Os baixos percentuais de variação dos provetes submetidos à condensação e raios UV, ocorreu devido a exposição de apenas 10 cm de uma face dos perfis. Pois, de acordo com Cromwell *et al.* (2011), a absorção de água pelas matrizes dos FRP pode ocasionar danos físicos ao invólucro, a incluir, a plastificação e a redução na temperatura de transição vítrea, os quais podem resultar em um colapso da resina constituinte desta fase, e conseqüentemente, na exposição do reforço de fibra do compósito. Se por um lado, as fibras de carbono (CFRP) são relativamente inertes, as fibras de vidro (GFRP) são suscetíveis a extração dos íons do vidro pela humidade (corrosão do vidro) e a ataques químicos. O vidro também é degradável pela sua exposição à radiação UV (radiação solar).

3.4. Análise microscópica. Através desta análise foi possível identificar visualmente a degradação causada por cada ambiente em ciclo, bem como relacionar e prever os comportamentos mecânicos e físicos por meio da interpretação adequada das imagens obtidas (Figuras 4 32 à 4 35).



Figura 6 - Verificação microscópica de provetes de referência não degradados (poliéster / acrílico) – Ampliação: 300 vezes.

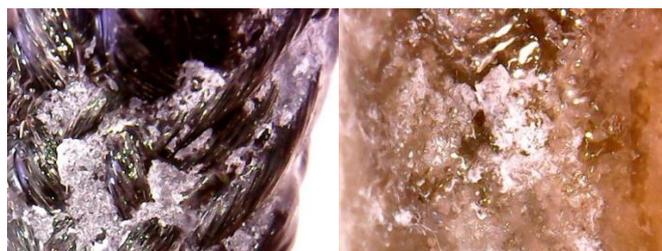


Figura 7 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 60 dias de degradação (ambientes alcalino/cloretos) – Ampliação: 300 vezes.

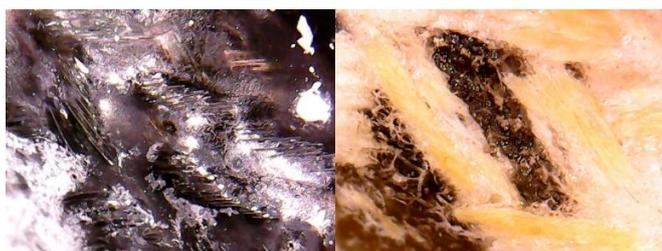


Figura 8 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 80 dias de degradação (ambientes alcalino/cloretos) – Ampliação: 300 vezes.



Figura 9 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 80 dias de degradação (ambientes QUV) – Ampliação: 300 vezes.



Percebe-se que no geral, as amostras têm camada superficial bastante heterogênea e irregular. Nota-se uma variabilidade acentuada na quantidade de material impregnado ou seja, é possível observar que em determinados pontos, as fibras possuem diferentes níveis de exposição ao ambiente.

Relativamente às amostras de referência, foi possível notar diversos vazios, ou pequenas bolhas de ar nas resinas, característica em destaque na Figura 6, o que tornou a matriz mais porosa, propiciando, deste modo, a possibilidade de uma maior velocidade no desgaste desta fase.

No que diz respeito às amostras desgastadas em meio alcalino e de cloretos, se observou diversas manifestações patológicas na camada superficial causadas pelos ambientes agressivos, desde a completa degradação das matrizes, até o desfiamento das fibras tanto de poliéster quanto de acrílico.

No primeiro e no segundo ciclo, como já era esperado, observou-se menos problemas em relação a integridade das camadas externas. Dentre as manifestações patológicas encontradas, pode-se citar as microfissuras, desfiamento e abertura de orifícios em decorrência dos poros encontrados nos provetes de controle (Figura 7).

No terceiro ciclo, as degradações identificadas foram mais significativas, dentre as quais pode-se citar o destacamento da camada superficial e exposição do reforço (Figura 8).

De maneira qualitativa, é desenvolvida a Tabela 12 a qual demonstra as amostras mais desgastadas ao fim dos 80 dias.

Destaca-se que as amostras compostas pelas matrizes do tipo 2 apresentaram menor degradação visual, bem como pode-se avaliar que os provetes contendo fibras poliéster no revestimento apresentaram maior nível de desgaste.

Tabela 12 - Classificação das amostras quanto ao desgaste observado.

Classificação das amostras			
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS	QUV
Acrílico + Resina tipo 1	3	4	3
Acrílico + Resina tipo 2	4	3	4
Poliéster + Resina tipo 1	1	2	1
Poliéster + Resina tipo 2	2	1	2

3.5. Espectroscopia do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Analisando a variação química encontrada para os provetes com acrílico e resina tipo 1 como constituinte da matriz, submetidos a condensação e a raios UV em relação as amostras não degradadas é possível verificar uma constância no valor do pico da banda de 3500 cm^{-1} , correspondente ao grupo O-H, sendo possível ainda observar uma acentuação generalizada dos valores dos demais picos, de frequências correspondentes aos compostos acrilonitrilo, acetato de vinila e acetato de vinila acrilonitrilo.

No que se refere à comparação do resultado encontrado para esta amostra com o espectro encontrado para a fibra de acrílico, constatou-se uma quebra, quase completa dos grupos $\text{-C}\equiv\text{N}$ na frequência de 2.240 cm^{-1} .

Da análise comparativa entre os espectros das amostras constituídas por acrílico e resina tipo 2, expostas às condições de alta humidade e a raios UV com os provetes não degradados de mesma composição, verifica-se um aumento dos picos da banda 2920 cm^{-1} e 1730 cm^{-1} , correspondentes aos grupos CH_2 (acrilonitrilo) e =C=O (acetato de vinila), respectivamente. Mantendo-se inalterável os valores dos picos encontrados para os demais compostos.

Relativamente as amostras compostas por fibra de acrílico e resina tipo 1, submetidas a ambiente alcalino durante 80 dias, verificou-se um aumento considerável em basicamente todas as bandas. Ainda constatou-se a presença, apesar de uma ligeira redução, dos grupos $\text{-C}\equiv\text{N}$ na frequência de 2.240 cm^{-1} em relação a fibra de acrílico testada isoladamente, diferentemente do que foi observado nas amostras acondicionadas na câmara QUV.

As amostras compostas por fibra de acrílico embebida em resina tipo 2 submetidas a ambiente alcalino durante 80 dias, apresentaram espectro com picos mais acentuados nas bandas 3500 cm⁻¹, correspondente ao grupo O–H, e 1730 cm⁻¹ equivalente ao grupo =C=O, ao passo que as demais frequências, demonstraram redução dos picos de absorção relativamente as amostras não degradadas.

Através da análise comparativa entre os varões submetidos ao ambiente alcalino constituídos por acrílico com as diferentes resinas, avalia-se maiores picos dos compostos em toda a extensão do espectro nos provetes com a resina tipo 1 em sua composição.

Na análise comparativa entre as amostras constituídas por acrílico e resina tipo 1 na matriz submetidas ao ambiente de cloretos, com os provetes de mesma composição não degradados, constata-se relativa constância na banda de absorção de 3500 cm⁻¹ e aumento acentuado dos demais picos do espectro. Com destaque para a reparação do grupo –C≡N correspondente a frequência de absorção de 2.240 cm⁻¹.

Dando prosseguimento a análise das amostras submetidas ao ambiente salino, observa-se que os provetes constituídos com matrizes de resina do tipo 2 e fibra de acrílico na camada externa obtiveram picos mais evidenciados para todos as bandas de absorção do espectro quando comparados com a amostra não degradada.

Avaliando comparativamente as amostras submetidas ao ambiente de cloretos por 80 dias com diferentes resinas, observa-se maiores picos nas que possuem a resina do tipo 1 na composição da matriz, com exceção da banda 3500 cm⁻¹, a qual constata-se maior pico no espectro da amostra composta pela resina do tipo 2.

Da análise comparativa entre a amostra constituída por poliéster e resina tipo 1 na matriz submetida as condições de alta humidade e de exposição a raios UV por 80 dias, e os provetes sem degradação, avalia-se uma relativa constância da banda com frequência de 3500 cm⁻¹ correspondente ao estiramento dos grupos hidroperóxidos e –OH, acentuação do pico da frequência de 2900 cm⁻¹ por parte da amostra degradada e maior evidenciação dos demais picos do espectro das amostras não expostas as condições deletérias.

Relativamente aos provetes com camada externa constituída por resina do tipo 2 e fibra de poliéster, verifica-se uma redução do pico nas bandas entre 2.850-3.000 cm⁻¹ correspondente ao estiramento simétrico de CH, por parte das amostras acondicionadas por 80 dias na câmara QUV, mantendo-se constante os picos das demais frequências.

As amostras compostas por acrílico e embebida pelas resinas investigadas expostas ao ambiente alcalino durante 80 dias apresentaram acentuação generalizada dos picos, em relação aos provetes não degradados. No mais, verifica-se a presença de um pico mais evidente na frequência de 3500 cm⁻¹ correspondente ao estiramento dos grupos hidroperóxidos e –OH e um aumento dos grupos carboxílicos insaturados nos provetes constituídos pela resina 1.

Analogamente, as amostras com poliéster e impregnação com ambas as resinas estudadas em ambiente de cloretos por 80 dias apresentaram picos mais acentuados em relação as amostras não degradadas. Sendo possível ainda admitir maior presença de grupos carboxílicos insaturados dos provetes com a resina do tipo 2, quando comparados com os corpos de prova constituídos com a resina do tipo 1 na camada externa.

Na Tabela 13 são apresentadas as classificações das amostras em termos de variação dos compostos químicos presentes na camada externa (resina epóxi e fibra). O critério adotado consistiu em que quanto menor o nível de alteração química global, maior o valor da classificação.

Tabela 13 - Classificação das amostras quanto à variação química.

Classificação das amostras			
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS	QUV
Acrílico + Resina tipo 1	1	1	2
Acrílico + Resina tipo 2	3	2	1
Poliéster + Resina tipo 1	2	4	3
Poliéster + Resina tipo 2	4	3	4

3.6. Análise comparativa. Ao fim das análises individuais é apresentada a Tabela 14 que possui o somatório das pontuações de cada amostra para cada ambiente, tal a se obter um resultado que possibilite a indicação dos materiais mais ou menos suscetíveis aos ataques estudados.

Tabela 14 - Somatório das classificações das amostras para os ensaios investigados.

Classificação das amostras				
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS	QUV	Σ
Acrílico + Resina tipo 1	21	17	9	47
Acrílico + Resina tipo 2	18	21	11	50
Poliéster + Resina tipo 1	16	21	8	45
Poliéster + Resina tipo 2	15	11	12	38

Portanto, ao analisar a Tabela 14 conclui-se que, dentre as amostras submetidas em ambiente alcalino, os provetes contendo fibras de acrílico na camada superficial dos varões ou mais especificamente a que possui resina do tipo 1 como matriz é a menos suscetível a variações de suas propriedades. Sua elevada nota, ocorreu essencialmente pelo alto valor de tensão máxima e pela baixa variação ao longo do período estudado, da massa e do valor de tensão de ruptura, bem como, pelo baixo nível de desgaste de sua superfície.

Ainda pode-se destacar a alta propensão de variação de propriedades e baixa resistência das amostras contendo poliéster e resina tipo 2 na fase externa dos provetes submetidos em ambiente de cloretos. Ressalva-se ainda, as adequadas propriedades das resinas tipo 2, face ao ataque de raios UV e umidade.

4. Conclusões

Dentre as metas instituídas, ressalta-se que a caracterização dos materiais indicou considerável coerência com relação à literatura, que as análises comparativas almejadas foram possíveis e possibilitaram distinguir qual material se apresentou mais ou menos durável.

Relativamente aos valores das propriedades mecânicas obtidos, foi possível constatar que as amostras que continham fibras acrílicas na fase externa, possuíam vantagem em relação à de poliéster uma vez que os seus módulos de elasticidade eram equiparáveis, entretanto apresentavam uma ligeira superioridade em relação aos valores de tensão máxima.

A análise efetuada por amostras indicou que a configuração da camada superficial formada por fibra acrílica impregnada com resina tipo 2 é a que apresenta melhores resultados (ver Tabela 14), levando em consideração seu adequado comportamento frente aos ambientes agressivos demonstrado por suas elevadas propriedades (mecânicas, físicas e químicas) e baixa variabilidade dos valores encontrados quando comparadas com as demais composições estudadas.

Constatou-se ainda que as manifestações patológicas identificadas por meio de imagens microscópicas tiveram bastante influência nos resultados finais, tendo em vista que tais problemas se agravaram no decorrer do estudo, chegando ao caso extremo de ocorrer perda de material da camada superficial, conforme apurado no ensaio de verificação de variação de massa. Neste contexto, foi possível atestar pelos resultados, que o ambiente alcalino foi o que apresentou maior influência nas alterações de peso dos provetes.

Não obstante as contrariedades relatadas, os BCR apresentaram, de modo geral, bom comportamento ao fim dos 80 dias de ciclo, apresentando adequadas propriedades após a exposição aos ambientes deletérios.

Sob o ponto de vista holístico, avalia-se que os resultados obtidos foram adequados e satisfatórios, e serviram de contributo para o enriquecimento do conhecimento a respeito destes materiais.

5. Referências

J.R. Cromwell, K.A. Harries, B.M. Shahrooz – “Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures, *Construction and Building Materials*”, Volume 25, Issue 5, Pages 2528-2539, Maio 2011.

Juvandes, Luís; Marques, A. T.; Figueiras, J. A.; “Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão”, FEUP, 1996.

Juvandes, L.F.P. – “Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP”, Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, 1999.

Pereira, C. G., Figueiro R., Jalali S., Araújo, M. e Marques, P. P. - “Varões Compósitos Entrançados para Reforço do Betão”. Acta de Conferencia, Encontro Nacional BE2008, UM, 2008. [4] E 463 Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2004).

Sena-Cruz J.M., Barros J.A.O., Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pull-out bending tests. In: Proceedings of the international symposium “Bond in concrete – from research to standards”, Budapest (Hungary). p. 614–21, 2002.

Sena-Cruz, J., et al. – "Efeitos de ciclos térmicos e de ciclos de gelo/degelo no comportamento estrutural de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP pela técnica NSM" em JPEE-14: 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2014.