



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

DIEGO HEBERT SEIXAS COSTA

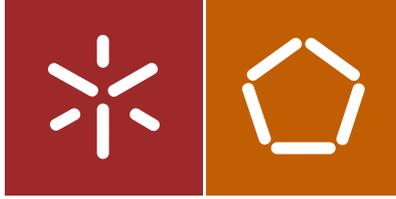
DURABILIDADE DE VARÕES COMPÓSITOS
ENTRANÇADOS (BCR) SUBMETIDOS A
AMBIENTES AGRESSIVOS

DURABILIDADE DE VARÕES COMPÓSITOS ENTRANÇADOS (BCR)
SUBMETIDOS A AMBIENTES AGRESSIVOS

DIEGO HEBERT SEIXAS COSTA

UMinho | 2016

julho de 2016



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

DIEGO HEBERT SEXAS COSTA

DURABILIDADE DE VARÕES COMPÓSITOS
ENTRANÇADOS (BCR) SUBMETIDOS A
AMBIENTES AGRESSIVOS

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Raul Figueiro
Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar

julho de 2016

*Não existe triunfo sem perda, não há vitória
sem sofrimento, não há liberdade sem sacrifício*



AGRADECIMENTOS

Ao término deste trabalho, é imprescindível o agradecimento a diversos intervenientes sem os quais não seria possível a realização desta investigação.

Inicialmente a Deus, pelas bênçãos providas e pela presença constante.

À minha família, a imensa gratidão por todo suporte e apoio para alcançar meu objetivo. Especialmente a meus pais Magleyno e Roberta, minha irmã Bruna e as minhas avós Leda e Leide, os quais nunca medem esforços para contribuírem para o meu crescimento.

À minha namorada Jéssica, pelo carinho e paciência despendidos, sempre solicita e disposta a buscar minha felicidade.

Ao sócio, companheiro nesta jornada e, acima de tudo, amigo Phelipe Mattos, pela coragem de sonharmos juntos pela construção de um mundo melhor e pela amizade de sempre.

Aos professores Dr. Raul Fangueiro e Dr. José Barroso de Aguiar, mestres na arte de ensinar, obrigado pela paciência e ensinamentos ao longo deste trabalho. Ao professor Dr. Normando Perazzo Barbosa, obrigado pelo incentivo. Ao professor Dr. José Marcílio Filgueiras Cruz, obrigado pelos ensinamentos e princípios partilhados.

Aos colegas e amigos do curso, da Fibrenamics, da Universidade do Minho e de Guimarães, muito obrigado.

Aos verdadeiros amigos, serei sempre grato.





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. Entre 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.

Palavras-chave: durabilidade, fibra, polímero, BCR, sustentabilidade.





ABSTRACT

Increasing optimization needs in the civil engineering area, both in terms of speed and logistics buildings as in aspects of quality and durability of buildings, combined with the high impact of traditional structural materials in the economic, social and environmental dimensions of sustainability, the study of alternative construction elements become necessary. Among the solutions are polymers reinforced with fibers (FRP) materials which, due to their superior characteristics compared to conventional, present a number of potential applications, specifically braided composite rods (BCR) reinforced with glass fibers and / or carbon have compared to steel, high mechanical performance, light weight and reduced energy production consumption. Despite advances, there is still insufficient knowledge about the longevity of these materials inside the concrete used in structural elements. Thus, this study aims the evaluation of the influence of the outer layer in the durability of the FRP composites for this purpose. To this end, four samples were produced using continuous reinforcement glass fibers and carbon and matrices composed of two types of fibers (polyester and acrylic) and two types of epoxy thermosetting resins (type 1 and type 2), which were subject to conditions and harsh environments, in particular, alkaline solutions at elevated temperature and chlorides and exposure to UV rays and humidity. They were also carried out checks on the physical, chemical and mechanical properties of samples by means of microscopic analysis, scanning mass variation and color difference, performing infrared spectroscopy and tensile test. At the end of the tests, it was observed that the matrix configuration formed by acrylic fiber impregnated with type 2 resin is that best results and that BCR showed generally good performance at the end of the 80 day cycle, with appropriate properties after exposure to deleterious environments.

Key words: durability, fiber, polymer, BCR, sustainability.





ÍNDICE

1º. CAPÍTULO - INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2º. CAPÍTULO – ESTADO DA ARTE	5
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	5
2.1.1 Considerações Iniciais	5
2.1.2 Histórico	5
2.1.3 Composição	6
2.3.1.1 Matriz	8
2.3.1.1.1 Matrizes Metálicas	9
2.3.1.1.2 Matrizes Cerâmicas	10
2.3.1.1.3 Matrizes Poliméricas	10
2.3.1.2 Reforço	12
2.3.1.3 Fibras	12
2.3.1.3.1 Propriedades das Fibras.....	15
2.3.1.3.2 Fibra de Poliéster.....	16
2.3.1.3.3 Fibra Acrílica.....	18
2.3.1.3.4 Fibras de Vidro.....	21
2.3.1.3.5 Fibras de Aramida	22
2.3.1.3.6 Fibras de Carbono	22
2.1.4 Comportamento De Materiais Compósitos	23
2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)	24
2.2.1 Especificações dos Polímeros Reforçados Com Fibras.....	24
2.2.2 Processos Produtivos	27



2.2.3	Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) Como Reforço Estrutural.....	30
2.2.4	EBR (Externally Bonded Reinforcement).....	32
2.2.5	NSM (Near-Surface Mounted).....	33
2.3	OUTROS TIPOS DE COMPÓSITOS	34
2.4	CONCEITO DE VIDA ÚTIL E DURABILIDADE.....	34
2.4.1	Durabilidade dos FRP.....	37
2.5	VARÕES COMPÓSITOS.....	45
2.5.1	Varões Compósitos Entrançados (BCR)	45
3º.	CAPÍTULO - MATERIAIS E METODOLOGIA	47
3.1	PLANEAMENTO DAS AMOSTRAS	47
3.2	CONSTITUÍNTES DO BCR	48
3.3	PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	50
3.4	PREPARAÇÃO DE SOLUÇÕES E AMBIENTES	54
3.4.1	Ambiente Alcalino.....	54
3.4.2	Ambientes de Cloretos	55
3.4.3	Ambientes de Condensação e de Exposição a Raios UV	56
3.5	MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO	58
3.5.1	Variação de Massa.....	58
3.5.2	Análise Microscópica	59
3.5.3	Propriedades Mecânicas	59
3.5.4	Determinação de Cor e Escala de Cinza.....	61
3.5.5	Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier (ftir)	63
4º.	CAPÍTULO - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
4.1	COMPORTAMENTO À TRAÇÃO	65
4.2	VARIAÇÃO DE COR	76
4.3	ESPECTROSCOPIA DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	80



4.4 VARIAÇÃO DE MASSA	89
4.5 ANÁLISE MICROSCÓPICA	96
4.6 ANÁLISE COMPARATIVA.....	99
4.7 EQUIVALÊNCIA DO PERÍODO DE ENSAIO	100
5°. CAPÍTULO – CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	103
BIBLIOGRAFIA	105
6°. CAPÍTULO - ANEXOS	111





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Características dos compósitos utilizadas na sua classificação.	6
Figura 2-2 - Comparação de propriedades entre o aço, o alumínio e o compósito (Fonte: Taly, 1998).	7
Figura 2-3 - Classificação de materiais compósitos segundo o reforço (Fonte: Ventura 2009).	13
Figura 2-4 – Classificação de reforço segundo a direção (Fonte: Ventura 2009).	14
Figura 2-5 - Desenho esquemático de um processo de pultrusão (Fonte: Meier, 1997)	29
Figura 2-6 - Exemplo de aplicação do método EBR (Fonte: Sena Cruz, 2002).	33
Figura 2-7 - Técnica de colagem NSM de sistema FRP (Fonte: Juvandes et al., 2007)	33
Figura 2-8 - Representação dos constituintes do BCR (Fonte: Ahmadi, 2009).	46
Figura 2-9 - Aplicações práticas dos BCR. (Fonte: Fangueiro, 2015).	46
Figura 3-1 - Provetes produzidos.	48
Figura 3-2 - Fibras de poliéster e acrílica.	50
Figura 3-3 - Balseiro de resina.	51
Figura 3-4 - Máquina de entrançamento.	51
Figura 3-5 - Sistema de controle de velocidade da entrançadeira e do sistema de tiragem.	52
Figura 3-6 - Câmara de cura.	52
Figura 3-7 - Sistema de tiragem e roldana dentada.	53
Figura 3-8 - Câmara de cura à 60°C.	53
Figura 3-9 - Compostos químicos utilizados no preparo dos ambientes.	55
Figura 3-10 - Recipiente utilizado para acondicionamento dos provetes.	56
Figura 3-11 - Câmara QUV.	57
Figura 3-12 - Balança digital utilizada.	58
Figura 3-13 - Preparação dos provetes.	60
Figura 3-14 - Estrutura utilizada no ensaio de tração.	61
Figura 3-15 - Espectrofotômetro e câmara de luz utilizados em ensaio.	62
Figura 3-16 - Provetes preparados para ensaio.	63
Figura 3-17 - Pastilha de brometo de potássio (KBr).	64
Figura 3-18 - Analisador de infravermelho com transformada de Fourier.	64
Figura 4-1 – Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (acrílico + resina tipo 1).	66
Figura 4-2 - Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (acrílico + resina tipo 2).	67
Figura 4-3 - Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (poliéster + resina tipo 1).	68
Figura 4-4 - Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (poliéster + resina tipo 2).	69
Figura 4-5 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras revestidas por acrílico.	72
Figura 4-6 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras revestidas por poliéster.	72
Figura 4-7 - Evolução da variação da tensão de ruptura das amostras compostas por acrílico.	73
Figura 4-8 - Evolução da variação da tensão de ruptura das amostras compostas por poliéster.	73
Figura 4-9 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras em meio alcalino.	74
Figura 4-10 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras em meio de cloretos.	74
Figura 4-11 - Diferença física entre provetes com e sem degradação.	79



Figura 4-12 - Fibra acrílico isolada.	80
Figura 4-13 - Amostras: acrílico + resina tipo 1 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.....	81
Figura 4-14 - Amostras: acrílico + resina tipo 2 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.....	82
Figura 4-15 - Amostra: acrílico + resina tipo 1 exposto ao ambiente alcalino.....	82
Figura 4-16 - Amostra: acrílico + resina tipo 2 exposto ao ambiente alcalino.....	83
Figura 4-17 - Amostra: acrílico + resina tipo 1 exposto ao ambiente de cloretos.	83
Figura 4-18 - Amostra: acrílico + resina tipo 2 exposto ao ambiente de cloretos.	84
Figura 4-19 - FTIR - Fibra de poliéster isolada.....	85
Figura 4-20 - Amostras: poliéster + resina tipo 1 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.....	86
Figura 4-21 - Amostras: poliéster + resina tipo 2 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.....	86
Figura 4-22 - Amostra: poliéster + resina tipo 1 exposto ao ambiente alcalino.....	87
Figura 4-23 - Amostra: poliéster + resina tipo 2 exposto ao ambiente alcalino.....	87
Figura 4-24 - Amostra: poliéster + resina tipo 1 exposta (80 dias) ao ambiente de cloretos.	88
Figura 4-25 - Amostra: poliéster + resina tipo 2 exposta (80 dias) ao ambiente de cloretos.	88
Figura 4-26 - Variação de massa das amostras de poliéster expostos aos ambientes agressivos.	90
Figura 4-27 - Variação de massa das amostras de acrílico expostos aos ambientes agressivos.	91
Figura 4-28 - Perda de material da camada externa.....	92
Figura 4-29 - Perda de massa por degradação em ambiente alcalino.....	93
Figura 4-30 - Perda de massa por degradação em ambiente de cloretos.	93
Figura 4-31 - Perda de massa por degradação ao ambiente de condensação e raios UV.....	94
Figura 4-32 – Verificação microscópica de provetes de referência não degradados (poliéster / acrílico) – Ampliação: 300 vezes.	96
Figura 4-33 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 60 dias de degradação (ambientes alcalino/cloretos) – Ampliação: 300 vezes.....	96
Figura 4-34 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 80 dias de degradação (ambientes alcalino/cloretos) – Ampliação: 300 vezes.....	97
Figura 4-35 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 80 dias de degradação (ambientes QUV) – Ampliação: 300 vezes.	97
Figura 6-1 - Ficha técnica da resina tipo 2.	111
Figura 6-2 - Ficha técnica da resina tipo 1.	112
Figura 6-3 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra A.....	113
Figura 6-4 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra A'.....	114
Figura 6-5 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra P.	115
Figura 6-6 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra P'.	117
Figura 6-7 - Variação de força máxima de ruptura (amostras de acrílico).....	118
Figura 6-8 - Variação de força máxima de ruptura (amostras de poliéster).....	119
Figura 6-9 - Variação de tensão máxima de ruptura (amostras de acrílico).....	120
Figura 6-10 - Variação de tensão máxima de ruptura (amostras de poliéster).	121
Figura 6-11 - Variação do módulo de elasticidade máximo de ruptura (amostras de acrílico).....	122
Figura 6-12 - Variação do módulo de elasticidade máximo de ruptura (amostras de poliéster).	123



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Propriedades desejáveis para os materiais da matriz (Fonte: Moreira 2009).	8
Tabela 2-2 - Vantagens e desvantagens das fibras de vidro (Fonte: Moreira 2009).	21
Tabela 2-3 - Vantagens e desvantagens das fibras de aramida (Fonte: Moreira 2009).	22
Tabela 2-4 - Vantagens e desvantagens das fibras de carbono (Fonte: Moreira 2009).	23
Tabela 2-5 - Propriedades de fibras de carbono, aramida e vidro (Fonte: Fangueiro & Pereira, 2011).	31
Tabela 2-6 - Especificações dos ensaios (Fonte: Fonseca et al. 2011)	40
Tabela 2-7 - Número de amostras por teste (Fonte: Cromwell, 2011).	41
Tabela 2-8 - Número de amostra por ensaio (Fonte: Micelli e Nanni 2004).	43
Tabela 2-9 - Métodos de envelhecimento das amostras de tamanho normal (Fonte: Kim et al. 2008).	44
Tabela 2-10 - Método de envelhecimento das amostras de tamanho reduzido (Fonte: Kim et al. 2008).	44
Tabela 3-1 - Amostras e esquema de nomenclatura.	47
Tabela 4-1 - Descrição das tensões máximas encontradas por amostra.	70
Tabela 4-2 - Descrição dos módulos de elasticidade máximos encontrados por amostra.	70
Tabela 4-3 - Classificação das amostras quanto a variação da tensão máxima.	75
Tabela 4-4 - Classificação das amostras quanto a variação do módulo de elasticidade.	75
Tabela 4-5 - Classificação das amostras quanto ao valor da tensão máxima.	75
Tabela 4-6 - Classificação das amostras quanto ao valor do módulo de elasticidade máximo. .	76
Tabela 4-7 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 1 e acrílico com e sem degradação.	77
Tabela 4-8 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 2 e acrílico com e sem degradação.	77
Tabela 4-9 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 1 e poliéster com e sem degradação.	78
Tabela 4-10 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 2 e poliéster com e sem degradação.	78
Tabela 4-11 - Classificação das amostras quanto a variação de cor.	79
Tabela 4-12 - Interpretações para grupos encontrados no espectro da fibra acrílica.	81
Tabela 4-13 - Interpretações para grupos encontrados no espectro da fibra poliéster.	85
Tabela 4-14 - Classificação das amostras quanto à variação química.	89
Tabela 4-15 - Classificação das amostras quanto à variação de massa.	95
Tabela 4-16 - Classificação das amostras quanto ao desgaste observado.	98
Tabela 4-17 - Somatório das classificações das amostras para os ensaios investigados.	99





1º. CAPÍTULO - INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

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 nos âmbitos econômico, social e ambiental da sustentabilidade, tornam necessário o estudo de elementos construtivos alternativos.

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. Entre 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 consequente 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.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é contribuir para o estudo da durabilidade varões 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.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- ✓ Desenvolvimento dos provetes investigados pelo processo do entrançamento;
- ✓ Caracterizar cada provete, através de ensaios de natureza física, química e mecânica;
- ✓ Avaliar comparativamente o comportamento dos diferentes materiais empregados na camada superficial dos varões: fibras e resinas;



- ✓ Fundamentar as possíveis causas das variações ocorridas na camada externa dos perfis, através de ensaios químicos e físicos;
- ✓ Relacionar os períodos dos ciclos dos ensaios de degradação acelerada com a duração equivalente;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Visando a melhor disposição do conteúdo, esta dissertação está organizada em sete capítulos.

O capítulo 1 contém a introdução à pesquisa, em que são ressaltados a importância do tema na conjuntura atual, os objetivos a serem alcançados na investigação e a descrição da estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, em que são abordados os conhecimentos disponíveis na bibliografia. São discutidos os materiais compósitos, suas propriedades e aplicações, bem como, os materiais que foram utilizados no desenvolvimento deste estudo.

O terceiro capítulo envolve a descrição dos materiais e metodologias utilizadas para o desenvolvimento da investigação. Aqui são apontadas as normas e diretrizes utilizadas e descritos os materiais e métodos empregados para o alcance dos objetivos propostos.

No capítulo 4 a análise dos resultados é dissertada, abordando-se as informações e os valores obtidos a partir dos ensaios experimentais.

Por fim, o capítulo 5 concerne à discussão das considerações finais, abordando as conclusões obtidas e as proposições para trabalhos futuros.

O capítulo 6 indica a bibliografia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 7 é destinado aos documentos anexos.





2º. CAPÍTULO – ESTADO DA ARTE

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Beber (2003) afirma que o termo compósito é derivado do latim *compositus*, que por sua vez tem como raiz a palavra *componere*: *com*-junto + *ponere*-colocar; ou seja, aglutinar, juntar. Genericamente, considera-se compósito todo material multifásico, artificialmente construído, que apresente frações das propriedades de cada material que o integram, de tal forma que seja possível a melhor combinação destas características.

Os materiais compósitos não têm uma definição universalmente aceita. De um modo geral, um material diz-se compósito quando é constituído por dois ou mais constituintes (fases) diferentes. Entretanto, no âmbito das aplicações da engenharia estrutural, os compósitos devem ser definidos de maneira mais específica.

De acordo com Carneiro e Teixeira (2008), compósitos são materiais cuja estrutura é constituída por uma combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si. Um dos seus produtos é chamado de fase de reforço e outro de matriz.

2.1.2 HISTÓRICO

Os materiais compósitos, de origem natural ou sintetizados pelo homem, vêm sendo utilizados por milhares de anos. Os egípcios, por exemplo, utilizavam a palha misturada à argila para a fabricação de tijolos com o objetivo de melhorar o seu desempenho estrutural. Antigos artesãos conheciam a relação simbiótica entre fases contínuas e descontínuas quando utilizavam o piche para colar o junco e fabricar barcos, 7000 anos atrás (Emmons et al, 1998).

Juvandes (2002) afirma que, no século XX, a investigação na área da ciência dos materiais da construção proporcionou aos engenheiros uma linha de orientação dos novos elementos destacando-se, os compósitos. Tal estudo propiciou uma análise dos



comportamentos mais eficientes nas aplicações específicas de engenharia, de modo a colmatar as lacunas evidenciadas com a utilização dos tradicionais. Desta forma, atualmente, tem havido uma grande procura de materiais com características apropriadas aos novos projetos de engenharia, visto ser cada vez mais urgente a aplicação de materiais mais resistentes, duráveis, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de rotura frágil.

2.1.3 *COMPOSIÇÃO*

Em princípio, os compósitos podem ser construídos a partir da combinação de dois ou mais materiais, sejam eles metálicos, orgânicos ou inorgânicos. Embora as combinações possíveis sejam potencialmente ilimitadas, as formas dos componentes são mais restritas, de tal modo que as mais usadas são fibras, partículas, lâminas, flocos, fillers e matrizes.

Uma definição mais adequada para os materiais compósitos seria que são materiais formados por uma matriz e um reforço (Figura 2-1) com excelente afinidade química entre si, processados sinteticamente para atingir excelentes propriedades mecânicas com a menor massa possível – o que é impossível de ser alcançado com materiais convencionais.

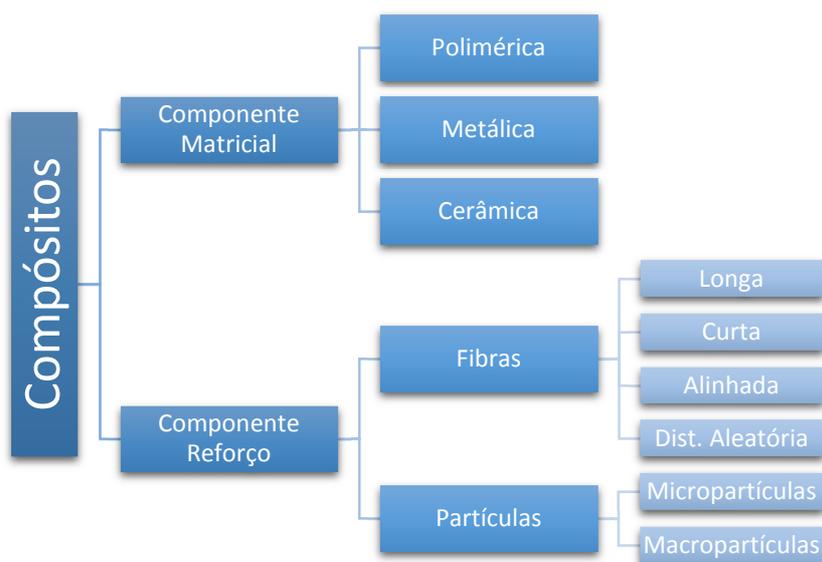


Figura 2-1 - Características dos compósitos utilizadas na sua classificação.



A fase dispersa ou reforço pode ser encontrada em diversas formas sendo a classificação mais geral feita em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas e compósitos de fibras contínuas.

No geral, os constituintes do reforço dos compósitos proporcionam força e rigidez, mas também aumentam a resistência ao calor, corrosão e condutividade do compósito constituinte. Esta fase do material pode ser utilizada para facultar todas ou apenas determinadas características necessárias dependendo dos requisitos exigidos pelo novo material. Para que o reforço represente um benefício para o compósito, além de possuir as vantagens descritas, deve apresentar boa interação com o seu invólucro, influência esta, garantida pela criação de uma interface entre ambos, que por sua vez, tem como função, assegurar a adequada distribuição das propriedades entre cada fase do material. A resultante das propriedades dos materiais compósitos, a partir deste comportamento, está demonstrada na Figura 2-2.

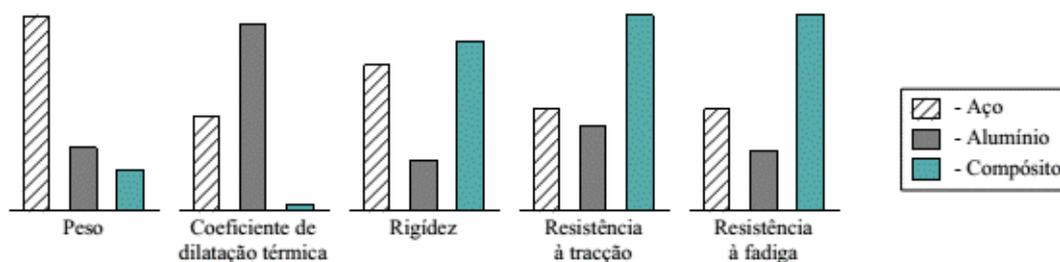


Figura 2-2 - Comparação de propriedades entre o aço, o alumínio e o compósito (Fonte: Taly, 1998).

Os compósitos existem em diferentes formas e tipos, mas no campo da Engenharia Civil, os mais usuais são constituídos por um reforço de fibra embebido por uma matriz polimérica. Portanto, resultando de um princípio de heterogeneidade, ressalta-se que essa categoria de material compósito é constituída essencialmente por duas fases. A camada interna apresenta grande resistência, elevado módulo de elasticidade e tem a forma de filamentos de pequeno diâmetro, denominada reforço. A fase externa é relativamente dúctil, tem características sinérgicas e envolve completamente as fibras da camada anterior, permitindo boa transferência de tensões para as fibras, denominada matriz.



2.3.1.1 MATRIZ

Tipicamente, os compósitos são classificados pelo material que forma a matriz. Esta fase, denominada por contínua, pode ser constituída por metal, polímero ou cerâmica, e deve proporcionar as seguintes funções:

- Manter a coesão da fase de reforço;
- Proteger o reforço do meio envolvente;
- Proteger o reforço do dano durante o manuseamento;
- Distribuir o carregamento pelo reforço;
- Redistribuir o carregamento pelo reforço resistente em caso de ruptura.

Constata-se, portanto, que essa camada tem a função de envolver e aglutinar as fibras para garantir adequada transferência de tensões entre as mesmas e protegê-las contra agressões ambientais e desgastes. Suas propriedades também devem conduzir a uma adequada aderência entre as interfaces do aglomerante (betão, por exemplo) e material de reforço e proporcionar adequadas durabilidade e aplicabilidade ao compósito. E apesar de desempenharem pouca influência na resistência aos esforços no compósito, são importantes para evitar a flambagem das fibras nos compósitos submetidos à compressão e para um acréscimo na resistência ao cisalhamento do compósito. Na Tabela 2-1 apresenta-se um resumo das propriedades esperadas para as matrizes dos materiais.

Tabela 2-1 - Propriedades desejáveis para os materiais da matriz (Fonte: Moreira 2009).

Propriedades Mecânicas

- Resistência à tração elevada
- Ductilidade
- Resistência ao corte
- Tenacidade
- Resistência ao impacto

Propriedades Térmicas

- Resistência à temperaturas extremas
- Coeficiente de dilatação térmica próxima a da fibra
- Baixa condutividade térmica

Propriedades Químicas

- Boa adesão às fibras
- Resistência à degradação em ambientes agressivos quimicamente
- Baixa absorção da umidade

Outras Propriedades

- Baixo custo
- Solidificação e/ou cura rápida



As matrizes poliméricas utilizadas em compósitos podem ser constituídas por resinas de duas classificações, do tipo termoendurecíveis, que são as mais comuns e compostas por epóxi, fenol, poliéster, viniléster, poliuretano e silicone, ou do tipo termoplásticas, constituídas por polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila na sua composição.

As resinas termoplásticas possuem a capacidade de poderem ser repetidamente fundidas quando aquecidas e endurecidas quando resfriadas, isto devido à ligação de cadeias moleculares emaranhadas, mantidas primariamente por ligações químicas fracas do tipo forças de Van der Waals, que se deformam facilmente sob ação da temperatura. Têm as vantagens sobre as resinas termoendurecíveis de serem mais resistentes a impactos e à micro fissuração, devido à sua maior ductilidade e tenacidade, bem como, de poderem ser completamente reaproveitadas após sua formação. Por outro lado, a fabricação de compósitos de fibras com resinas termoplásticas é limitada, pois a sua alta viscosidade dificulta a incorporação de fibras longas.

Em contrapartida, as resinas termoendurecíveis possuem endurecimento irreversível por apresentarem estrutura formada de moléculas ligadas entre si, de forma cruzada e tridimensional com alto grau de polimerização, isto é, caso sejam aquecidas depois de curadas, não fundem e sofrem decomposição. Entre as resinas termoendurecíveis, as compostas por epóxi apresentam melhores propriedades mecânicas e de resistência à humidade, são mais duráveis e mais caras do que as resinas de poliéster ou viniléster (CEB, 2001). Segundo Weatherhead (1980), uma das principais vantagens da resina epóxida com relação à resina de poliéster é sua baixa retração durante o processo de cura, variando de 1% a 2%, podendo ser considerada nula quando fillers são adicionados à sua composição. A sua baixa viscosidade permite que as fibras sejam adequadamente saturadas e não apresentem desalinhamento entre seus fios.

2.3.1.1.1 *MATRIZES METÁLICAS*

Segundo Garcez (2007), os compostos mais utilizados neste tipo de matriz são metais leves e resistentes, como o alumínio, o magnésio e o titânio. Pode igualmente utilizar-se o cobalto ou as ligas de cobalto-níquel, quando se espera a ação de temperaturas elevadas.



A fabricação de compósitos de matriz metálica envolve duas etapas: a consolidação, ou síntese, e a conformação. A complexidade dessas operações aumenta o custo de fabricação de matrizes metálicas, o que limita sua aplicação.

2.3.1.1.2 *MATRIZES CERÂMICAS*

As matrizes cerâmicas, em geral, apresentam boa resistência ao calor, sendo aplicadas em situações marcadas pela exposição a altas temperaturas.

A principal matriz cerâmica empregada na Engenharia Civil é a cimentícia, que, de acordo com Nogueira *et al.* (1999), apresenta boa resistência à compressão e ao calor, sendo aplicadas em situações marcadas pela exposição a altas temperaturas. Em contrapartida, possui comportamento frágil, baixo módulo de elasticidade e reduzida resistência a tração. Como solução para incrementar tais características, são usados componentes de reforço em forma de fibras, como as de aço, vidro, aramida e carbono (que serão detalhadas mais adiante).

Garcez (2007) afirma que, além da cimentícia, também são utilizadas matrizes cerâmicas confeccionadas com óxido de alumínio (Al_2O_3 , conhecido como alumina) e sulfato de cálcio (gesso).

2.3.1.1.3 *MATRIZES POLIMÉRICAS*

O grupo mais importante de compósitos em termos de desempenho e campo de aplicação é o que utiliza matrizes poliméricas (PMC – Polymer Matrix Composites).

Um material polimérico pode ser considerado como constituído por muitas partes, unidas ou ligadas quimicamente entre si, de modo a formar um sólido. Este grupo de materiais encontra-se dividido em dois, dependendo a sua classificação, do modo como estão ligados quimicamente e estruturalmente: termoplásticos ou termoendurecíveis. A principal diferença entre os dois é que os primeiros quando voltam a ser aquecidos podem adquirir nova forma, enquanto os segundos, uma vez arrefecidos a sua forma não se altera.



Os polímeros termoplásticos possuem cadeias moleculares emaranhadas, mantidas primariamente por ligações químicas fracas do tipo forças de Van der Waals, que se deformam facilmente sob ação da temperatura e apresentam a vantagem de amolecerem, durante o seu aquecimento, voltando a endurecer após o seu arrefecimento. Estes processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos um determinado número de vezes. Esta propriedade dos termoplásticos facilita aplicações em técnicas convencionais de compressão para moldar compostos.

Além disso, os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis, e podem permanecer em um determinado estado durante longos períodos de tempo, o que torna estes materiais muito flexíveis. Resinas termoplásticas têm vindo a distinguir-se como um grupo importante de compósitos. Muitas investigações nesta área têm sido feitas, sobretudo no que diz respeito ao melhoramento das suas propriedades, de modo a obter maiores vantagens funcionais.

Segundo Filho e Garcez (2007), exemplos comuns de polímeros termoplásticos são o poli (éter-éter-cetona) ou PEEK, o poli (sulfeto de fenileno), ou PPS; a poli-imida, ou PI; e a poli(éter-imida), ou PEI. Outra conveniência que se pode considerar no que concerne os polímeros termoplásticos é que depois de fabricados, eles podem ser curvados, admitindo diferentes formatos, o que não acontece com os termoendurecíveis. Por outro lado, a principal desvantagem destes tipos de polímeros é que a sua elevada viscosidade, dificulta sua aplicação e pode provocar o desalinhamento das fibras e a formação de bolhas na matriz.

Os polímeros termoendurecíveis, assumem forma e rigidez permanentes após a polimerização, não amolecendo com subseqüentes aquecimentos. Geralmente possuem melhor estabilidade dimensional, são mais duros e resistentes, possuem adequada estabilidade térmica em temperaturas de serviço, boa resistência química e reduzida deformação, quando comparados com a maioria dos polímeros termoplásticos. Devido às suas significativas propriedades, os polímeros termoendurecíveis são muito aplicados na engenharia estrutural.

As principais desvantagens dos polímeros termoendurecíveis incluem o modo de ruptura frágil, os longos ciclos de cura e a dificuldade de pós-processamento destes materiais.



As fases formadas por matrizes poliméricas são usadas na mais ampla diversidade de aplicações dos compósitos uma vez que apresentam propriedades mecânicas vantajosas à temperatura ambiente, baixo peso, bem como processos fáceis de fabrico e custo reduzido. Além disso, Ventura (2009) considera que sua principal vantagem está relacionada com o seu processo de produção, o qual, envolve altas pressões e baixas temperaturas evitando problemas associados com a degradação do reforço. Por esta razão o desenvolvimento deste grupo de materiais cresceu rapidamente.

As propriedades dos compósitos formados a partir de matrizes poliméricas podem variar largamente dependendo da sua combinação com reforços utilizados. Entre as suas desvantagens, pode-se citar a impossibilidade de trabalho a altas temperaturas, a instabilidade dimensional devido aos elevados coeficientes de expansão térmica, a sensibilidade à radiação e, em alguns casos, a absorção da humidade ambiente.

2.3.1.2 REFORÇO

O reforço é o componente que realça as propriedades mecânicas e eletromagnéticas do material compósito como um todo. É, em regra, mais resistente do que a matriz, podendo ser caracterizado pelos tipos de partículas ou fibras. Os três principais tipos de fibras sintéticas que se usam para reforçar matrizes poliméricas são: vidro, aramida e carbono.

2.3.1.3 FIBRAS

A “American Society for Testing Materials (ASTM) - Committee D30” define fibras como materiais filiformes com dimensão na razão de 10/1, no mínimo, com uma secção transversal de $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ e uma espessura máxima de 0,25 mm.

A escolha do tipo de fibra depende das características que se deseja fornecer ao compósito, podendo ser classificadas como:

Naturais – fibras vegetais, minerais ou animais;



Sintéticas – fibras de aço, vidro, carbono e fibras poliméricas (polipropileno, nylon, poliéster, aramida, celulose, PVA, borracha, polietileno e acrílico).

De acordo com Ripper e Scherer (1999), as fibras sintéticas são filamentos contínuos e rígidos, das quais pode-se citar como as mais utilizadas, as de carbono, de vidro ou de aramida. Têm em comum o comportamento linear da curva tensão – deformação específica até a ruptura, variando, de acordo com o tipo e processo de fabricação, o seu módulo de elasticidade longitudinal e a sua resistência.

O desempenho mecânico do compósito reforçado com fibras é influenciado pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz. O arranjo, a massa volúmica e a distribuição das fibras influenciam significativamente o comportamento mecânico e outras propriedades dos compósitos.

Existem diversas disposições possíveis para a orientação das fibras: alinhamento paralelo ao eixo longitudinal do elemento em uma só direção, uma disposição bidirecional em relação aos eixos do compósito ou até um arranjo totalmente aleatório. Normalmente, as fibras contínuas estão alinhadas enquanto as fibras descontínuas podem estar desalinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. A Figura 2-3 expõe um fluxograma de forma a elucidar os tipos de orientações dos materiais compósitos.

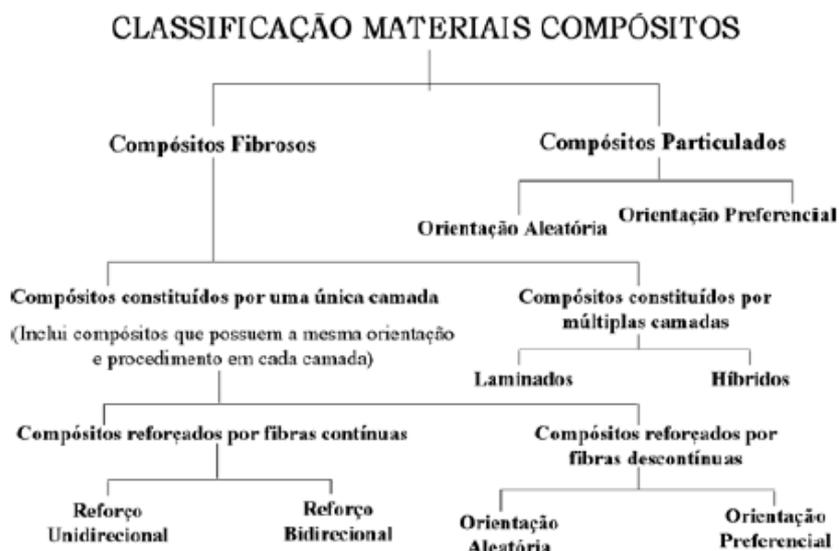


Figura 2-3 - Classificação de materiais compósitos segundo o reforço (Fonte: Ventura 2009).

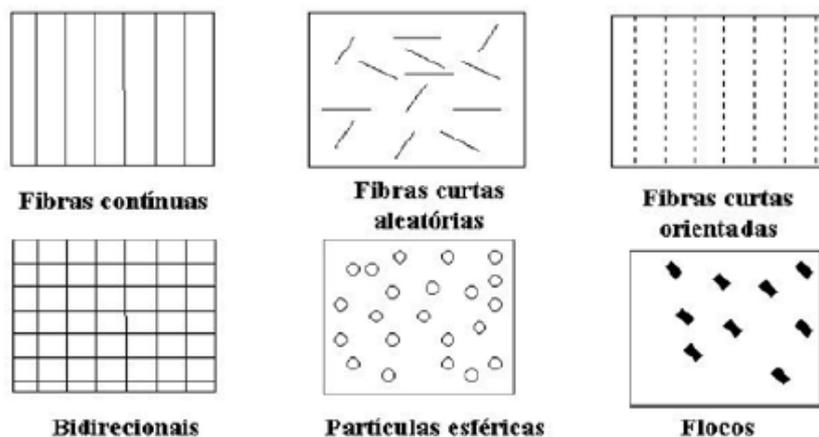


Figura 2-4 – Classificação de reforço segundo a direção (Fonte: Ventura 2009).

A orientação e comprimento da fibra para um determinado compósito dependem do nível e natureza da tensão aplicada, bem como dos custos de fabrico.

Ventura (2009) constata que as taxas de produção dos compósitos com fibras curtas, alinhadas ou com orientação aleatória, são elevadas e formas complexas podem ser moldadas o que nem sempre é possível quando se utiliza um reforço com fibras contínuas. Além disso, os custos de fabrico são consideravelmente menores do que para as fibras contínuas e alinhadas.

Em geral, a melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras é obtida quando a sua distribuição é uniforme. Os compósitos com fibras contínuas e alinhadas têm respostas mecânicas que dependem de vários fatores como o comportamento tensão-deformação das fases fibra e matriz, as fracções volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada.

Existem quatro fatores inerentes às fibras que influenciam o desempenho de compósitos poliméricos, que são o comprimento, a orientação, a forma e o material.

Constata-se que a aplicação mais comum dos compósitos reforçados com fibras na indústria da construção civil atualmente é na reabilitação e manutenção de estruturas já existentes. Estes materiais são indicados portanto para recuperar a resistência inicial de estruturas degradadas, aumentar a capacidade de carga de modo a satisfazer novos usos, ou mesmo modificar a funcionalidade obsoleta das mesmas sem implicar grande aumento do peso da estrutura. Existem também potenciais economias em termos de custos e redução de problemas ambientais no uso destes materiais para tal finalidade.



2.3.1.3.1 *PROPRIEDADES DAS FIBRAS*

A. Resistência à tração

A reduzida seção transversal das fibras reduz a possibilidade de que haja muitos defeitos de composição, o que contribui para sua alta resistência à tração.

B. Módulo de elasticidade

Fibras com baixo módulo de elasticidade apresentam uma tensão muito baixa no momento em que a matriz rompe e transfere o esforço; já as fibras com elevado módulo de elasticidade apresentam um elevado nível de tensão no momento da ruptura da matriz, o que lhe permite atuar como reforço imediatamente, caso sua resistência não seja superada.

C. Fator de forma ou relação de aspecto

É um dos principais parâmetros de caracterização de uma fibra. É definido como a relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro de uma circunferência virtual cuja área seria equivalente à seção transversal da fibra. Um aumento no fator de forma pode representar um aumento no comprimento da fibra ou um decréscimo no seu diâmetro equivalente.

D. Comprimento crítico

Os mecanismos de transferência de tensões em um compósito são influenciados pelo comprimento crítico das fibras, que é o menor comprimento necessário para o desenvolvimento de tensões nas fibras, iguais à sua resistência. Quando o comprimento da fibra é menor do que o crítico: a ancoragem não é suficiente para gerar tensões de escoamento ou de ruptura nas fibras, ou seja, as fibras não estarão atuando de forma eficiente. Quando o comprimento da fibra é maior que o crítico, pode ocorrer o travamento da fibra, o que impede seu arrancamento, ocasionando a elevação da tensão atuante, até que seja alcançada a tensão de ruptura da fibra.

E. Teor de fibra

As propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras são diretamente dependentes do teor de fibras presente no material. O aumento do teor de fibras resulta, na maioria dos casos, no aumento do módulo e da tensão máxima, devido ao aumento da



contribuição de resistência mecânica da fibra nas propriedades mecânicas do material compósito.

F. Volume crítico

O volume crítico de fibras, é o volume mínimo de fibras que, após a fissuração da matriz, suportará o carregamento que o compósito suportava antes da fissuração. Para que a incorporação das fibras proporcione uma majoração na resistência última do compósito, é necessário que o teor de fibras empregado resulte em um volume de fibras superior ao crítico. Neste caso, o carregamento antes suportado pela matriz é transferido para as fibras após o aparecimento da primeira fissura. Como o volume é suficientemente grande para suportar esta carga, o compósito se mantém íntegro. Carregamentos adicionais geram um padrão de fissuração múltipla, sem, contudo, levar à ruptura do compósito.

G. Orientação

A orientação das fibras e a percentagem de fibra existente em determinada seção transversal do compósito são determinantes nas resistências à flexão, à compressão, à tração e ao corte dos materiais compósitos. Os compósitos formados por fibras longas apresentam máximo efeito de orientação, porque todas as fibras se encontram alinhadas na mesma direção, enquanto os compósitos de fibras curtas apresentam orientação em diversas direções, podendo ter ou não uma orientação predominante, em função dos processos de mistura e adensamento.

A seguir estão apresentadas algumas especificações das fibras empregadas, tanto na camada externa quanto na fase de reforço, para a produção dos provetes que são investigados neste documento.

2.3.1.3.2 *FIBRA DE POLIÉSTER*

Segundo a *Federal Trade Commission de USA*, as fibras de poliéster são fibras químicas, cuja substância formadora é um polímero sintético de cadeia larga que contém o mínimo de 85% em peso de um éster, de um diol e do ácido tereftálico.

Araújo e Castro (1986) afirmam que o poliéster é decorrente da policondensação do ácido tereftálico (derivado do petróleo) e do etilenoglicol (obtido a partir do carvão)



resultando em um composto de alto peso molecular, capaz de ser fiado, formando filamentos com características adequadas para diversos campos de utilização.

De acordo com os autores, a sua fabricação consiste nas seguintes etapas: síntese das macromoléculas e fiação do polímero. Tratamento pelo calor em presença de catalisadores do ácido tereftálico (DMT) e do etileno glicol. Precondensação do éster diglicólico a partir da destilação do álcool metílico formado.

É elucidado que para a policondensação é exigido um período de tempo que vai de 5 a 8 horas e é efetuada sob pressão reduzida, a uma temperatura próxima dos 300°C para que o polímero fique suficientemente fluido, e o etileno glicol que se forma possa ser arrastado pela destilação.

Atualmente, a pureza do ácido tereftálico e o uso de catalisadores específicos permitem fazer atuar diretamente este ácido sobre etileno glicol.

Recolhimento e seccionamento do polímero solidificado em forma cúbica ao fim da policondensação. Encaminhamento dos cubos para os pontos de fiação onde os mesmos serão fundidos em atmosfera inerte e impelidos para as feiras por meio de bombas volumétricas.

Após os tratamentos finais, os referidos filamentos sofrem um alongamento, o qual é 4 a 5 vezes o comprimento inicial.

✓ Características

De acordo com Araújo e Castro (1986), as fibras de poliéster apresentam as seguintes propriedades:

Propriedades físicas

- massa volúmica: 1,38 g/cm³;
- recuperação de humidade: extremamente fraca: 0,4% a 25°C e 65% de humidade relativa. Esta fraca recuperação de humidade explica a grande estabilidade do poliéster, e, quando molhado, a rápida secagem dos artigos com ele confeccionados;



- comportamento à chama: começa a fundir à aproximação da chama; ao contato desta, queima lentamente, com fusão, deixando como resíduo um produto negro e duro;
- comportamento ao calor: o poliéster funde a 260°C.

Propriedades químicas

- comportamento relativamente a:
 - ácidos: os ácidos orgânicos não atacam, praticamente, o poliéster. O ácido clorídrico e o ácido nítrico, em concentrações elevadas (superiores a 20 – 40%) e a uma temperatura próxima da ebulição, deterioram-no;
 - bases: resiste muito bem às bases nas condições clássicas de tratamento em meio alcalino. É, em parte, hidrolisado pelas bases concentradas;
 - oxidantes e redutores: o poliéster é muito pouco sensível tanto a uns como a outros;
 - diluentes: os diluentes orgânicos não exercem ação sobre o poliéster. No entanto, a quente, ele é dissolvido na dimetilformamida, no monoclórobzeno, no ortodíclorobezeno, no fenol a 90%, no metacresol, nitrobenzeno e, a frio, no ácido sulfúrico a 98%.

2.3.1.3.3 FIBRA ACRÍLICA

De acordo com Araújo e Castro (1986), a fibra acrílica é um polímero constituído com no mínimo 85% em peso, de poliacrilonitrila que teve origem em 1942, a partir da fundição do poliacrilonitrilo (com soluções de elevado ponto de ebulição).

Os autores afirmam que, as fibras acrílicas apresentam forças eletrostáticas que ocorrem entre os dipolos dos grupos nitrilas adjacentes, na mesma molécula polimérica. Isto restringe a rotação da ligação, levando a uma estrutura rígida da cadeia polimérica. Como resultado, as fibras acrílicas apresentam altíssima cristalinidade e alto ponto de fusão e são solúveis somente em poucos solventes.



Fabricação: A polimerização do acrilonitrilo efetua-se em emulsão na água e os catalisadores utilizados são peróxidos minerais.

De acordo com os autores, o nitrilo acrílico é acrescentado a uma solução aquosa de catalizador peroxidado. Temperatura moderada (40 – 50%). A transformação química opera-se em 2 horas. O polímero formado é insolúvel na água e precipita a partir da emulsão aquosa. Separa-se por filtração. Os excessos de adjuvantes, que foram utilizados para a polimerização em emulsão, assim como os depósitos de catalizador, são eliminados por meio de uma série de lavagens com água. Depois de seco, o polímero apresenta-se sob a forma de um pó branco que se armazena até ser enviado para a fiação. Existe um diluente que o dissolve: a dimetilformamida. O colódio obtido contém 10 a 20 % de polímero, é-lhe extraído o ar e filtrado.

Araújo e Castro (1986) definem que podem ser utilizados dois processos de fiação:

- Fiação a seco: o colódio é levado a uma temperatura de 80 – 150°C e, depois, por extursão é passado pela fieira. A fieira desemboca em câmara de evaporação onde os filamentos reencontram uma corrente de ar quente, de azoto ou vapor de água. Uma vez que a dimetilformamida é um diluente pouco volátil, o agente de evaporação pode circular a temperatura elevada: 150°C e mais;
- Fiação húmida: a coagulação faz-se em um banho rico em água, o qual contém um coagulante que é, a maior parte das vezes, uma mistura água-diluente. Segundo a composição dos banhos, as temperaturas de coagulação podem ser escalonadas entre 30 a 50°C.

Tanto em um processo como no outro, os filamentos sofrem um alongamento elevado (4 a 10 vezes o seu comprimento quando saem da fieira), o que melhora a sua cristinabilidade e lhes confere propriedades dinamométricas ótimas. Este tratamento efetua-se a uma temperatura oscilando entre os 120 e os 150°C.

✓ Características

Araújo e Castro (1986) explicitam as principais propriedades físicas, químicas deste tipo de fibra.



Propriedades físicas

- massa volúmica: 1,16 a 1,20 g/cm³, segundo os tipos;
- recuperação de humidade: em atmosfera normal (20°C, 65% HR) a taxa de absorção da água é de 2 – 2,5%. Os acrílicos são, portanto, hidrófobos o que confere uma grande estabilidade às propriedades dinamométricas relativamente ao molhado, assim como uma secagem rápida;
- dilatação na água: praticamente nula;
- comportamento à chama: à aproximação da chama, as fibras acrílicas começam a fundir; ao contato com a chama, ardem com fusão deixando um resíduo de cinzas irregulares, negras e duras;
- comportamento ao calor: as fibras acrílicas amarelecem a 200°C e amolecem por volta dos 270 – 300°C; Assinala-se que as fibras acrílicas acumulam facilmente as cargas de eletricidade estática. Como todas as fibras hidrófobas, são excelentes isoladores.

Propriedades químicas

- comportamento relativamente a:
 - ácidos: os acrílicos apresentam uma boa resistência aos ácidos;
 - bases: os acrílicos são sensíveis à ação das bases. Nas soluções alcalinas, os fios tendem a amarelecer;
 - oxidantes: água de Javel, água oxigenada, perborato, não têm praticamente qualquer ação sobre os acrílicos, desde que não se ultrapassem os 20 – 30°C;
 - redutores: a resistência dos acrílicos é excelente relativamente a todos os redutores;
 - diluentes: entre os compostos minerais, o cloreto de zinco e os sulfocianuretos de sódio e potássio dissolvem os acrílicos em concentrações da ordem dos 50%; entre os compostos orgânicos, os dois diluentes mais conhecidos são o dimetilformamida e o dimetilsulfóxido. As aminas provocam amarelecimento.



2.3.1.3.4 FIBRAS DE VIDRO

De acordo com Carneiro e Teixeira (2008), as fibras de vidro são derivadas da mistura de diferentes composições baseadas em sílica, com adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. Possuem boa capacidade de deformação, boa resistência e baixo custo, mas baixas resistências à fadiga, à abrasão e à fluência, menor rigidez e fraca capacidade de aderência a polímeros, e se degradam na presença de água, ácidos e solução alcalina, fato que pode ser contornado com o uso de uma adequada matriz.

Ventura (2009), afirma que as fibras de vidro são o reforço mais usado e o mais barato. São usadas para reforçar matrizes poliméricas de modo a se obter compósitos estruturais e componentes moldados. Os compósitos de matriz plástica reforçada com fibras de vidro apresentam características favoráveis, como elevado quociente entre resistência e peso, boa estabilidade dimensional, boa resistência ao calor, à humidade e à corrosão, boas propriedades de isolamento eléctrico, facilidade de fabrico e custo relativamente baixo.

Mais especificamente, no âmbito da reabilitação estrutural, o tipo de material de vidro mais utilizado é a fibra de vidro-E.

Tabela 2-2 - Vantagens e desvantagens das fibras de vidro (Fonte: Moreira 2009).

Fibra de Vidro	
<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência à tracção e compressão - Baixo custo relativamente às outras fibras - Elevada resistência química - Elevada resistência ao fogo - Boas propriedades de isolamento acústico, térmico e eléctrico 	<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de elasticidade reduzido; - Elevada massa específica - Sensibilidade à abrasão - Sensibilidade a temperaturas elevadas - Baixa resistência à fadiga



2.3.1.3.5 FIBRAS DE ARAMIDA

Segundo Carneiro e Teixeira (2008), as fibras de aramida são compostas por materiais orgânicos aromáticos sintéticos, formados de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio e resultantes de extrusão de um tipo de nylon, cuja estrutura molecular consiste em cadeias de benzeno e amida. Os autores ainda afirmam que estes materiais têm como vantagens possuírem baixa densidade, condutibilidade elétrica e retração, altas resistências à tração e ao impacto e moderada resistência a ataques químicos. São em geral mais rígidas e resistentes que as fibras de vidro e possuem boa capacidade de deformação, mas degradam-se sob luz solar.

Tabela 2-3 - Vantagens e desvantagens das fibras de aramida (Fonte: Moreira 2009).

Fibra de Aramida	
<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Baixa massa específica. - Elevada resistência à tração. - Elevada resistência ao impacto. - Baixa condutividade elétrica. - Elevada resistência química excepto a ácidos e bases concentrados. - Elevada resistência à abrasão. - Boa resistência ao fogo com capacidade de auto-extinção. - Excelente comportamento sob temperaturas elevadas de serviço. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixas resistência à compressão. - Degradação lenta sob luz ultravioleta; por exemplo. - Elevada absorção de humidade. - Má adesão às resinas. - Custo relativamente elevado. - Elevada durabilidade.

2.3.1.3.6 FIBRAS DE CARBONO

Conforme Carneiro e Teixeira (2008), as fibras de carbono ou de grafite têm elevadas rigidez e resistência a todos os tipos de ataques químicos (por ser o carbono um material inerte), bom comportamento à fadiga, à variação térmica e reológico, e pequeno peso, o que as tornam ideais para uso na indústria aérea. Em contrapartida, têm alto custo e apresentam menor resistência ao impacto e elevada condutibilidade elétrica, que pode possibilitar corrosão do tipo galvânica quando em contato com metais.



Tabela 2-4 - Vantagens e desvantagens das fibras de carbono (Fonte: Moreira 2009).

Fibra de Carbono	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência à tracção - Elevado módulo de elasticidade longitudinal - Baixa massa específica - Elevada condutibilidade eléctrica - Elevada estabilidade dimensional; - Baixo coeficiente de dilatação térmica - Bom comportamento a elevadas temperaturas de serviço - Inércia química excepto em ambientes fortemente oxidantes - Boas características de amortecimento estrutural 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzida resistência ao impacto - Elevada condutibilidade térmica - Fractura frágil - Baixa deformação antes da fractura - Baixa resistência à compressão - Custo elevado

Os valores das principais propriedades mecânicas das fibras referidas encontram-se na Tabela 2-5 no item 2.2.3 deste capítulo.

2.1.4 *COMPORTAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS*

O comportamento e as propriedades dos materiais compósitos, de modo geral, dependem de propriedades físicas, de fatores inerentes às fases constituintes, das suas quantidades relativas, da geometria da fase dispersa, da natureza, da forma, arranjo estrutural e interação entre os componentes.

Naturalmente, as propriedades e características intrínsecas de cada componente determinam significativamente as propriedades gerais do compósito. Entretanto, a interação entre os componentes resultará em um novo grupo de propriedades, derivadas da combinação das propriedades individuais de cada componente, isto é, escolhendo-se adequadamente a matriz e o elemento de reforço pode-se obter um compósito com propriedades adequadas para aplicação em situações específicas.

Propriedades como módulo de elasticidade e densidade do compósito podem ser determinadas pela regra das misturas, que, entretanto, não é adequada para determinação da resistência à tracção, devido às interações entre os componentes de reforço.

Embora o comportamento global de um compósito esteja condicionado pelo critério de composição, pelo processo de fabrico e pelos objetivos estruturais na fase de



utilização, ele apresenta propriedades interessantes para a engenharia como as elevadas resistência e rigidez, o baixo peso específico, a excelente resistência à agressividade ambiental, bem como a possibilidade em admitir propriedades direcionais a nível estrutural, eléctrico e magnético, variáveis de acordo com a conveniência (Hull 1981; EUROCOM, 1996).

2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)

Os materiais compósitos poliméricos, ou plásticos reforçados com fibras, denominados *fiber reinforced plastics* ou *fiber reinforced polymers* (FRP) na literatura internacional, são compostos basicamente formados por matriz polimérica no invólucro, fibras de elevada resistência no interior como reforço e cargas de enchimento designadas por “fillers”. Esses materiais podem ter comportamento anisotrópico ou ortotrópico, dependendo do tipo e das direções preferenciais das fibras, que são o componente mais resistente e rígido do compósito.

O despertar do interesse destes materiais na construção e reabilitação de construções ocorreu devido ao seu êxito em diversas outras indústrias. Neste âmbito, são de assinalar propriedades como a elevada resistência à tração, o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a elevada resistência à fadiga, o bom amortecimento ao choque e ao isolamento eletromagnético.

De acordo com Juvandes (2002), as principais fibras comercializadas para reforço são o vidro, o carbono e a aramida, sendo os respectivos compósitos reforçados, denominados internacionalmente por GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) e AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer).

2.2.1 ESPECIFICAÇÕES DOS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

O comportamento final de um compósito de FRP é acentuadamente dependente dos materiais que o constituem, da disposição das fibras principais de reforço e da interação entre os referidos materiais.



A resistência à tração de polímeros reforçados com apenas um tipo de fibra é caracterizada por uma relação tensão versus deformação elástico-linear até a ruptura, podendo ser alterada quando os FRP são fabricados com diferentes tipos de fibras com características distintas. A ação da maioria dos FRP é mais efetiva quando estes são solicitados na direção das fibras, uma vez que a resistência à tração na direção perpendicular às fibras é muito inferior à resistência à tração na direção longitudinal.

A resposta de um FRP submetido à tração quanto à ruptura é largamente dependente das deformações últimas da fibra e da matriz.

A resistência à compressão última de um FRP é, geralmente, controlada pela microflambagem, que ocorre em escala microscópica, devido a falhas transversais na matriz ou falhas de cisalhamento. O modo de falha depende do tipo de fibra, percentagem em volume de fibras, tipo de resina, impregnação das fibras pela matriz e aderência entre fibra e matriz. Fibras com boa resistência à compressão resultam em FRP com boa resistência à compressão. As resistências à compressão axial de polímeros à base de fibra carbono, vidro e aramida equivalem a 78%, 55% e 20% da resistência à tração desses materiais, respectivamente (ISIS, 2001).

O módulo de elasticidade, de um FRP unidirecional na direção de suas fibras, pode ser expresso em termos dos módulos de elasticidade dos seus componentes e de suas respectivas porcentagens em volume (lei das misturas). Analogamente, o módulo de elasticidade na direção perpendicular às fibras é, geralmente, muito baixo. A determinação do módulo de elasticidade de laminados de FRP é realizada de forma simples, por meio de ensaios de tração direta, com determinação da curva carga versus deformação (método utilizado neste trabalho), e da queima do compósito, para determinação das porcentagens de fibra e resina existentes no laminado.

Entre as fibras de alto desempenho mais empregadas nos sistemas FRP, as de carbono são as que possuem módulo de elasticidade mais elevado, com valores comparáveis ou até superiores aos do aço. FRP com baixos módulos de elasticidade, muitas vezes, não apresentam a rigidez necessária para aplicações estruturais, como o reforço estrutural de pontes, em que se torna necessário um elevado incremento de carregamento com restrição de deformação. Elevados módulos de elasticidade também são necessários em estruturas reforçadas, nas quais o FRP é utilizado em substituição à



armadura interna. Entretanto, para aplicações que exigem materiais com altos níveis de deformabilidade, é preferível a aplicação de FRP com baixos módulos de elasticidade.

Em termos de ductilidade, o comportamento tensão versus deformação de um compósito tipo FRP é diferente do comportamento do aço. Quando submetidos a esforços de tração os FRP de carbono, aramida e vidro, apresentam um comportamento tensão versus deformação elástico-linear até próximo da tensão última, resultando em uma ruptura brusca, sem patamar de escoamento. Segundo Lees e Burgoyne (1999), a diferença no comportamento tensão versus deformação do aço e do FRP impede a aplicação do tradicional conceito de ductilidade em estruturas de betão armado que recebem esse tipo de reforço.

Visando melhorar a ductilidade dos FRP, sistemas híbridos, ou FRPH, começaram a ser investigados. Estes sistemas são construídos com combinações de fibras de carbono, aramida e vidro, posicionadas em uma, duas ou três direções. Segundo Grace et al. (2005), FRPH fabricados com fibras de carbono e vidro possuem um comportamento similar ao do aço, quando submetidos a esforços de tração. Estes sistemas já estão sendo bastante utilizados no reforço de elementos estruturais submetidos a ações sísmicas, já que, combinando o baixo módulo de elasticidade das fibras de vidro com o elevado módulo de elasticidade das fibras de carbono, pode-se obter boa ductilidade e aumento na capacidade de carga aos elementos reforçados. Outra alternativa possível para transcorrer este problema é a inserção de arames no interior da fase de reforço como forma de herdar a propriedade do aço desejada.

Neste contexto, os compósitos de FRP são considerados materiais não homogêneos e anisotrópicos. Em rigor, as suas propriedades devem ser determinadas por via experimental, através de ensaios com provetes representativos do produto final de FRP. Contudo, a diversidade de formas disponíveis no mercado dificulta este procedimento.

Em relação à fluência dos FRP, Garcez *et al.* (2008) afirmam que os tipos de fibra e matriz empregados em sua fabricação, assim como suas porcentagens em volume, aliados a fatores como temperatura e presença de humidade influenciam de forma significativa neste comportamento, podendo ocasionar um fenômeno chamado ruptura por fluência ou deformação lenta, fadiga estática ou, ainda, corrosão sob tensão. Estudos indicam que as fibras de carbono não são susceptíveis à fadiga estática, enquanto as fibras



de aramida apresentam um comportamento intermediário entre as fibras de vidro e carbono (FIB, 2001).

É sabido que para evitar problemas de ruptura por fadiga estática, o nível de tensão permanente considerada no dimensionamento seja de, no máximo, 20% para GFRP, 30% para AFRP e 50% para CFRP, em relação às suas resistências últimas. Mesmo que as fibras que formam os FRP apresentem baixa fluência, as matrizes dos FRP, por serem materiais viscoelásticos, fazem com que o FRP sofra deformação lenta quando submetido a carregamentos constantes. Entretanto, se as tensões constantes aplicadas aos FRP forem limitadas, a fluência não será significativa na maioria dos FRP utilizados na Engenharia Civil.

O alto custo relativo a alguns FRP, em relação a outros materiais convencionais de mesma finalidade, pode ser considerado a principal limitação para a disseminação mais intensa de sua utilização. Entretanto, vale ressaltar que, estes altos custos iniciais podem ser amortecidos na medida em que são considerados durante toda a vida útil das estruturas, pois a durabilidade oferecida por esses materiais pode torná-los competitivos em um maior número de situações.

2.2.2 *PROCESSOS PRODUTIVOS*

As propriedades finais dos materiais não se determinam apenas em função das suas características individuais, mas também do modo como os materiais são produzidos e da forma como são inseridos nesse compósito.

A técnica usada para o processamento de um polímero depende basicamente:

- Do material ser termoplástico ou termoendurecível,
- Da temperatura na qual ele amolece (no caso de material termoplástico),
- Da estabilidade química (resistência à degradação oxidativa e à diminuição da massa molar das moléculas) do material a ser processado,
- Da geometria e do tamanho do produto final.



Os polímeros termoplásticos possuem grande variedade de possíveis técnicas de produção de tal forma que eles são aquecidos próximo ou acima da temperatura de fusão, de modo que se comportem como borracha ou líquido, sendo então introduzido em um molde ou em uma matriz, para se produzir a forma desejada.

Por outro lado, é correto afirmar que existe um menor número de processos utilizados para a produção dos compósitos termoendurecíveis, uma vez que a reticulação tenha ocorrido eles não podem mais ser moldados.

Os FRP (Polímeros Reforçados com Fibra) termoendurecíveis podem ser fabricados por meio de diversas técnicas. As mais empregadas na fabricação de materiais com fins estruturais são a pultrusão, a moldagem por contato e enrolamento de filamento. Outras técnicas, moldagem por transferência de resina, bolsa de vácuo de moldagem e moldagem por injeção também podem ser utilizadas na produção de FRP. Alguns dos processos mais utilizados estão melhores descritos abaixo:

- **Moldação por Termoformação:** A termoformação consiste no aquecimento de elementos particulados de compósitos com matriz termoplástica acima de T_g (temperatura de transição vítrea) ou perto da temperatura de fusão (para os polímeros semi-cristalinos), provocando, em seguida, o encontro do material às paredes de um molde. Em decorrência do contato com o molde, geralmente resfriado pela circulação de um fluido, o material arrefece ficando com a forma do molde selecionado. Finalmente, é possível a abertura do molde procedendo-se à extração da peça. A moldagem pode ser feita utilizando moldes duplos, a vácuo ou sob pressão de ar.
- **Moldação por contato (wet lay-up ou hand lay-up)** - É uma técnica de produção de FRP na qual uma manta ou tecido de fibras é impregnado, manualmente, com resinas termoendurecíveis. Neste processo as fibras são colocadas no interior do molde e a resina é introduzida e impregnada à mão com o auxílio de rolos. As escovas são utilizadas para distribuir a resina uniformemente ao longo das fibras e os rolos são empregues para extrair as bolhas de ar do reforço e, ainda, para assegurar a completa impregnação das fibras na resina.
- **A premissa básica da Infusão de Resina** consiste em que quando um elemento é colocado sob vácuo, o fluido (resina) possa ser escoado para preencher eventuais lacunas e/ou vazios de forma a saturar o componente. No caso dos compósitos, as lacunas são aberturas nas fibras secas, e a resina irá preenchê-las sendo ‘puxada’ pela



fonte de vácuo. Quando a resina começa a ser ‘puxada’, em direção ao molde, ela terá que impregnar todas as fibras em um período de tempo menor que o tempo para que se dê a catalisação dessa resina. Se a resina demorar muito tempo a percorrer todas as fibras poderá acontecer que a resina se vá solidificando, impedindo assim que a infusão opere em perfeitas condições.

Para se elaborar uma boa infusão é necessário ter em conta vários aspectos de montagem e uma sequência lógica do processo. Assim, em seguida, faz-se uma descrição dos pormenores do processo e como se deve proceder para que todos os elementos necessários à infusão estejam em perfeita sintonia.

Basicamente este processo é uma extensão do processo manual onde é aplicada pressão no laminado para melhorar a consolidação. O ar dentro do saco é extraído através de uma bomba de vácuo. No seu interior cria-se uma atmosfera de pressão que provoca a consolidação da estrutura. O saco de vácuo reduz a quantidade de produtos voláteis durante a cura.

- O processo de pultrusão é um método contínuo utilizado na fabricação de materiais compósitos na forma de perfis com seções constantes. Basicamente, a pultrusão começa com o puxamento de fibras e mantas de fibras através de uma seção de impregnação. Esta seção é composta por um banho de resina termoendurecível, previamente formulada com endurecedores, iniciadores entre outros aditivos. Nesta etapa ocorre também a passagem das fibras impregnadas de resina em pré-formas que irão direcionar as fibras e fornecer uma pré-conformação antes que as mesmas entrem na matriz aquecida. O excesso de resina também é retirado nesta etapa. A passagem das fibras impregnadas pela matriz aquecida é a próxima etapa do processo. A matriz aquecida fornecerá a geometria e o estado final do perfil. Na Figura 2-5 é esquematizado o processo por pultrusão.

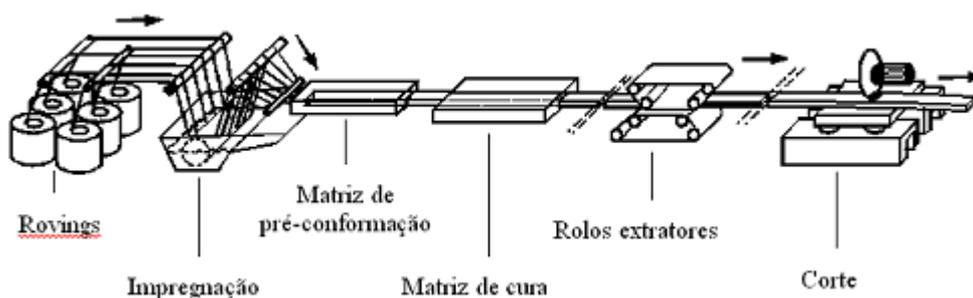


Figura 2-5 - Desenho esquemático de um processo de pultrusão (Fonte: Meier, 1997)



- De acordo com Pereira *et al.* (2008), o entrançamento é uma das técnicas mais antigas para a produção de estruturas têxteis. Normalmente utilizada pela indústria da cordoaria, na fabricação de cabos e cordas, as estruturas entrançadas são muito úteis para o reforço de materiais compósitos uma vez que permitem uma orientação multiaxial de fibras e apresentam conformidade, estabilidade torsional e resistência ao desgaste, associadas ao baixo custo de operação. O princípio básico do processo de entrançamento é o entrelaçamento de dois sistemas de fios obtendo-se uma estrutura entrançada, tubular ou plana. Quando se pretende efetuar o reforço longitudinal, de uma estrutura entrançada tubular, pode inserir-se um terceiro sistema de fios entre o entrançado de modo a produzir uma estrutura triaxial com orientação dos fios a zero graus, denominada, estrutura entrançada com reforço axial.

A técnica de entrançamento tem um baixo custo de produção e com uma panóplia de vantagens, tais como: permite a orientação multiaxial das fibras no plano, o reforço do seu núcleo confere a resistência em tração, a estrutura nervurada possibilita a aderência ao betão e uma variedade de propriedades mecânicas podem ser melhoradas quando os núcleos das estruturas entrançadas são reforçados com diferentes tipos de fibra.

2.2.3 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP) COMO REFORÇO ESTRUTURAL

Ainda que o aço seja o material de reforço mais divulgado nas aplicações correntes de reabilitação e reforço, este material apresenta alguns expressivos inconvenientes que se podem resumir em três pontos.

- a) A dificuldade de montagem e colagem das chapas metálicas do sistema in situ devido ao excesso de peso, agravado com a acessibilidade limitada, em alguns casos (ex: pontes);
- b) O risco de corrosão na superfície da junta de ligação do aço ao adesivo;
- c) A necessidade de criação de juntas de ligação entre chapas, devido às limitações das dimensões para o seu transporte.



Assim sendo, no início dos anos 80, os FRP colados exteriormente às estruturas começaram a ser introduzidos como forma de substituição das chapas metálicas.

Em relação ao aço, os materiais compósitos reforçados com fibras são mais leves, mais fáceis de aplicar e não corrosivos.

Quando incorporada em uma matriz qualquer, a fibra contribui para aumentar a capacidade de suportar esforços, pois parte da carga é transferida pela matriz para a fibra por deformação de cisalhamento na interface matriz/fibra. A transferência de carga se origina, em geral, de diferenças nas propriedades físicas da fibra e da matriz e se intensifica após a fissuração dessa.

As fibras de alto desempenho mais utilizadas para reforçar polímeros com fins de reforço estrutural são as de carbono, aramida e vidro, embora fibras de boro, polietileno, poliéster, poliamida e basálticas sejam também empregadas. De modo que a maior parte dos FRP que estão sendo aplicados, atualmente, na construção civil, é fabricada com fibras de carbono. As vantagens das fibras de carbono em relação às outras fibras resultam de suas propriedades mecânicas: elevada resistência e rigidez e baixo peso próprio. Entretanto, fibras de vidro e aramida possuem um grande potencial de utilização quando se requer um reforço de menor custo ou com algumas características específicas, como resistência ao impacto e isolamento elétrico. A Tabela 2-5 demonstra algumas propriedades mecânicas dos diferentes tipos de fibras na composição dos FRP.

Tabela 2-5 - Propriedades de fibras de carbono, aramida e vidro (Fonte: Fangueiro & Pereira, 2011).

Fibra	Tensão de rotura (N/mm ²)	Módulo de elasticidade (kN/mm ²)	Alongamento (%)	Densidade
Carbono (alta rotura)	3430–4900	230–240	1.5–2.1	1.8
Carbono (alto Modulo)	2940–4600	390–640	0.45–1.2	1.8–2.1
Vidro (E)	3300–3400	60–70	2.5	2.57
Vidro (ECR)	3300–3400	60–70	2.5	2.71
Vidro (S2)	4500–4700	75–90	3.0	2.47
Vidro (R)	4200–4600	75–90	3.0	2.55
Vidro (C)	2300–2400	75–90	2.5	2.46
Vidro (A)	2700–2800	70–90	2.5	2.46



Nos FRP, o uso de fibras de alto desempenho vai fazer com que o reforço absorva uma parcela significativa da carga acidental, embora não aumente muito a rigidez, devido à reduzida espessura.

Atualmente, várias técnicas de reforço estrutural com materiais compósitos reforçados com fibras vêm sendo introduzidas e cada vez mais estudadas como forma de alternativa na utilização do aço, visto suas compatíveis propriedades para este fim. A seguir serão demonstrados os dois principais métodos de reforço estrutural com a utilização dos FRP: a colagem externa de mantas ou faixas de laminado (Externally Bonded Reinforcement – EBR) e a inserção de laminados ou varões no betão de recobrimento do elemento estrutural a reforçar (Near-Surface Mounted – NSM).

2.2.4 ***EBR (EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT)***

Esta foi a primeira técnica a ser utilizada e tem-se mostrado como sendo de execução relativamente simples e rápida, conseguindo-se aumentar a capacidade de carga e a rigidez dos elementos estruturais reforçados (Fig. 2-7). No entanto, apresenta algumas desvantagens a se considerar, as quais estão relacionados com o fato do material de reforço (FRP) ficar localizado à superfície, ficando assim vulnerável à sua degradação e consequentemente diminuindo sua durabilidade, principalmente devido às condições ambientais, como incêndios, temperaturas elevadas, radiação UV, humidade ou até mesmo a atos de vandalismo. Ainda deve-se considerar que a opção por este método envolvendo técnica de colagem exige, à partida, a presença de um betão de boa qualidade, bem como a seleção de uma armadura e de um adesivo adequado para os objetivos em questão.



Figura 2-6 - Exemplo de aplicação do método EBR (Fonte: Sena Cruz, 2002).

2.2.5 NSM (NEAR-SURFACE MOUNTED)

Em razão dos inconvenientes da técnica anterior foi estudado e desenvolvido o método de reforço denominado NSM que trata da aplicação dos materiais de reforço no interior do betão de cobrimento (Fig. 2-8) e em comparação com a anterior, apresenta diversas vantagens como: menor quantidade de trabalho local na preparação da superfície e na instalação dos elementos de reforço, ausência de preocupações com as irregularidades da superfície do betão, a remoção e/ou tratamento da camada superficial do betão deixa de ser necessária, o reforço de FRP está protegido pelo betão de recobrimento (menos exposto aos agentes agressivos) e, finalmente, a estética da estrutura reforçada mantém-se praticamente inalterada.



Figura 2-7 - Técnica de colagem NSM de sistema FRP (Fonte: Juvandes et al., 2007)

Não obstante, vários estudos têm demonstrado a ocorrência frequente de modos de rotura frágeis, como o destacamento do FRP no caso da técnica EBR, e desintegração do



betão de recobrimento no caso da técnica NSM. Além de apresentarem modos de rotura frágeis, o material de reforço aplicado segundo estas técnicas não é eficientemente explorado, uma vez que a tensão máxima instalada no FRP aquando da rotura do elemento reforçado é muito menor que a sua resistência à tração. Para resolver o problema do destacamento prematuro do reforço de FRP têm sido aplicados sistemas de ancoragem nas extremidades do mesmo, com recurso a chapas metálicas aparafusadas e/ou mantas de FRP coladas.

2.3 OUTROS TIPOS DE COMPÓSITOS

Compósitos naturais - ossos, bambu e outras estruturas vegetais, em que partículas minerais ou fibras vegetais se encontram inseridas em uma matriz orgânica. A madeira é um exemplo de compósito natural que trata-se da combinação de fibra celulósica e lignina. Alguns compósitos sintéticos podem ser fabricados a partir de materiais naturais

Compósitos estruturais, laminados ou sanduíche - são fabricados por painéis com diferentes camadas, empilhadas e firmemente aderidas, para propiciar um comportamento monolítico (madeiras aglomeradas e materiais estruturados usados em equipamentos esportivos como esquis utilizados na neve).

Os de tipo sanduíche possuem camadas externas resistentes e delgadas ligadas a núcleos de material leve, geometricamente disposto de forma a gerar altas resistências à deformação e ao corte (favos de mel).

2.4 CONCEITO DE VIDA ÚTIL E DURABILIDADE

Assim como qualquer outro sistema formado por um elemento, ou conjunto de elementos, os edifícios têm um tempo de existência.

De acordo com Gaspar (2002), três fases devem ser consideradas no ciclo de vida dos edifícios: o nascimento, o envelhecimento e a morte. O nascimento de um edifício engloba todas as operações que antecedem a entrada do edifício a uso, como o planeamento do empreendimento, os projetos, arquitetónico, de estruturas, de



infraestrutura e de instalações prediais, bem como a execução da obra. Após esta fase, dar-se início ao período de serviço, uso ou envelhecimento, que inclui as diversas mudanças de uso e alterações na construção, de acordo com os ciclos económicos, mudanças de contexto ou a evolução nas exigências dos utilizadores. A terceira e última fase da vida de uma construção corresponde à sua morte, quando o conceito de vida útil já não é representativo do edifício em questão.

Como escrevem Gaspar e Brito (2005), “os edifícios são bens de grande longevidade”, entretanto, durante sua fase de serviço, iniciam “um processo contínuo de degradação”. Inicialmente este é um processo um tanto quanto lento e praticamente imperceptível. No entanto, ao longo dos anos, a evolução da degradação torna-se mais acentuada.

Deste modo, a vida útil de uma construção ou de um elemento construtivo pode ser definida como o período depois de entrar em utilização, durante o qual todas as suas propriedades relevantes estão acima de níveis mínimos aceitáveis, considerando uma manutenção corrente (ASTM E632-81 1981).

De maneira geral, vida útil consiste em mensurar a expectativa de duração de uma estrutura ou suas partes, dentro de limites de projeto admissíveis, durante seu ciclo de vida.

Segundo a ISO 13823 (2008), a vida útil corresponde ao período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo.

No Brasil, a NBR 15575 (2013), define vida útil como “uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes”. A NBR 6118 (2014) item 6.2 traz o conceito de vida útil de projeto como sendo “o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de betão, sem intervenção significativa, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, (...), bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais”.

A vida útil das edificações varia de acordo com diversos fatores que interferem isolada ou conjuntamente. Esta avaliação vai desde a concepção do projeto até os cuidados de limpeza, uso e conservação.



Não obstante, é possível concluir que no âmbito da Engenharia Civil existem dois conceitos principais de vida útil, um funcional e outro estrutural. A vida útil funcional está associada à rentabilidade econômica do empreendimento em questão e representa a base de análise de todos os investimentos. Para definir, em projeto, a vida útil funcional, é necessário realizar estudos econômicos da rentabilidade da construção. Enquanto a vida útil estrutural está relacionada às condições de segurança e de utilização da estrutura, garantindo que não ocorram situações de colapso e/ou deformações excessivas pelo menos durante o período da vida útil funcional da construção.

A vida útil estrutural depende essencialmente da evolução das ações e dos materiais ao longo da vida da construção.

Por estarem diretamente associados, os conceitos de durabilidade e vida útil são facilmente confundidos. A durabilidade é um dos fatores mais importantes para o conhecimento dos novos materiais em desenvolvimento. Para que haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e indicação deste como uma possibilidade técnica, a ser disponibilizada no mercado, é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e de sua vida útil.

De acordo com a ISO 13823 (2008), durabilidade é a capacidade de uma estrutura ou de seus componentes de satisfazer, com dada manutenção planejada, os requisitos de desempenho do projeto, por um período específico de tempo sob influência das ações ambientais, ou como resultado do processo de envelhecimento natural. Podendo-se relacionar com as características dos materiais e/ou componentes, às condições de exposição e às condições de utilização impostas durante a vida útil da edificação.

Segundo a ABNT NBR 6118:2007, item 5.1.2.3, durabilidade “consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

No âmbito das edificações, Pinto (2011) define durabilidade como a capacidade de um edifício ou de suas partes, de desempenhar a sua função durante um determinado intervalo de tempo, sob determinadas condições de serviço.



Para Mehta e Monteiro (2008) “uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade”. Dessa forma, é possível concluir que a durabilidade é essencialmente uma visão retrospectiva do desempenho de uma edificação.

É importante ressaltar que a durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim uma função relacionada com o desempenho dos mesmos sob determinadas condições ambientais. O envelhecimento destes resulta das alterações das propriedades mecânicas, físicas e químicas, tanto na superfície como no seu interior, em grande parte devida à agressividade do meio ambiente.

A expectativa de que uma estrutura pode ser durável ou não só pode ser avaliada por meio da utilização de modelos que representem os processos de deterioração a que está suscetível, de forma que, para garantias do projeto, requer-se a utilização de metodologias de previsão de vida útil.

2.4.1 *DURABILIDADE DOS FRP*

As propriedades de um sistema de FRP variam de um produto para outro em função de aspectos como o tipo de fibra e de resina selecionados, a percentagem em peso na combinação do sistema e a orientação geral estabelecida para as fibras. Uma vez caracterizado o sistema a curto prazo, torna-se fundamental conhecer qual a evolução destas propriedades, ao longo do período de vida útil esperado para uma dada aplicação (longo prazo).

Há uma ampla variedade de estudos a respeito da durabilidade de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro e carbono, com diversas formas, diferentes métodos de produção e com distintas matrizes. A seguir, serão tratados os diferentes tipos de condições ambientais em que os materiais em análise de durabilidade podem ser expostos de modo a promover um envelhecimento acelerado de suas propriedades físico-mecânicas.

Condições de exposição ambiental

Imersão em água pura: Esta condição é realizada com a intenção de simular circunstâncias majoradas de obras de infraestruturas, por exemplo. Elevadas temperaturas



pode resultar em um aumento na absorção de água e na taxa de reações químicas, este fator aliado a alta humidade facilita a ocorrência de reações que, normalmente não sucederiam em condições normais.

Segundo Silva *et al.* (2008), a ação de humidade em fibras de vidro pode induzir a degradações e o efeito de humidade e temperatura pode causar uma redução na durabilidade destes materiais. Em presença de ambiente aquoso ou com alto índice de humidade, as fibras de vidro formam uma película de água fazendo com que os íons alcalinos sejam lixiviados e substituídos por prótons (H^+), decorrendo deste processo a formação de microfissuras. A pele aquosa na envolvente das fibras de vidro, tornam-se soluções alcalinas à medida que os íons alcalinos dissolvem o vidro, fazendo com que a fibra de vidro se decomponha gradativamente.

Imersão em água salina: Os FRP podem ser expostos a água salina aquando de sua aplicação em ambientes costeiros. À medida em que a humidade é absorvida pelo elemento, os sais são introduzidos na matriz, podendo causar diferentes tipos de degradação quando comparado com a deterioração relacionada à humidade.

Ambientes alcalinos: O estudo deste tipo de exposição é importante, principalmente nos varões de FRP, devido ao fato de que o concreto é considerado um material alcalino, isto é, sua composição química torna o ambiente o qual os varões serão eventualmente inseridos, em um meio básico, e portanto, com pH superior a 7,0. Segundo Hollaway e Head (2001), a alta alcalinidade pode afetar os sistemas de GFRP, em particular pela combinação de ataque químico na fibra de vidro e pela concentração e aumento da hidratação de produtos entre os filamentos. Hidróxido de cálcio pode se propagar no interior das fibras, causando corrosão superficial que afeta, não somente a integridade das fibras, mas também as expõe a outros danos decorrentes da humidade e outras condições.

Alta temperatura combinado com baixa humidade: Temperaturas elevadas podem afetar as propriedades físicas e mecânicas de sistemas de FRP de diversas maneiras. Tais condições de temperatura podem resultar em um aumento do tempo de cura das resinas em detrimento de um acréscimo das tensões residuais associadas com as diferentes propriedades de expansão térmica das fibras e a matriz. Além disso, estas tensões ainda podem levar a microfissuras do material. Danos irreversíveis nas matrizes (incluindo as



microfissuras) podem ocorrer se a temperatura a qual o GFRP está submetido for superior a temperatura de transição vítrea.

Radiação ultravioleta: A radiação solar ultravioleta é conhecida por causar prejuízos significantes aos polímeros orgânicos. Estes danos ocorrem porque os polímeros possuem energia de dissociação de ligação dentro dos mesmos limites que radiações ultravioletas típicas com comprimento de onda entre 290nm - 400nm. Esta dissociação de vínculo é iniciada pela absorção dos raios UV e é continuada devido às reações subsequentes com o oxigênio formando grupos funcionais como a carbonila, carboxil e peróxidos, os quais podem causar fotodegradação na superfície do FRP. Malgrado a profundidade da degradação ser de alguns microns, a área afetada representa uma região de possível concentração de tensão bem como, um local de futuros ataques de agentes agressivos.

Gelo-degelo: Esta condição de variação de temperatura pode levar a degradação do FRP e da ligação da interface entre a matriz e o reforço em exposição. Temperaturas muito baixas podem levar a fissuração dos FRP, comprometendo seu comportamento inicial. A humidade absorvida, uma vez congelada, se expande e causa microfissuras.

Sena-Cruz *et al.* (2014) em sua avaliação sobre o efeito de ciclos térmicos e de ciclos gelo/degelo no comportamento estrutural de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP pela técnica NSM (Near-Surface Mounted), obtiveram resultados da variação de resistência de laminados de CFRP e de resina epóxi aplicados a tais ensaios, em relação à modelos de referência, nos qual, o primeiro elemento, apresentou variações de resistência a tração insignificativa, na ordem de 5,75% e -0,21% ao fim de 120 e 240 ciclos térmicos, respectivamente, enquanto adesivo exibiu aumento de percentuais de resistência à tração de 18% e 32% para os provetes submetidos a 120 e 240 ciclos térmicos. Segundo os autores, esse acréscimo ocorreu pelo fato de existir uma fase de pós-cura do epóxi, que melhora as suas propriedades mecânicas.

De acordo com Dolan *et al.* (2009), a humidade e a temperatura são os fatores de maior influência no que diz respeito a durabilidade das fibras de carbono reforçadas com polímeros. Neste sentido, Grace e Singh (2005), concluíram que há uma redução de 33% na capacidade de carga do reforço de CFRP em vigas de concreto após 10.000 horas com 100% de exposição à humidade.



Em termos de agressão química por ambientes alcalinos, ácidos ou solventes orgânicos, a matriz e o adesivo devem ser os principais agentes de oposição à instalação da corrosão em um sistema de FRP. Como tal, devem possuir correta composição, adequada às condições de serviço ambientais, previstas para uma dada aplicação. Porém, nos sistemas laminares, deve atender-se à hipótese de ocorrência de situações designadas por “tensão de corrosão”, isto é, a ruína catastrófica de um compósito a baixas tensões devido ao acesso direto da agressividade ambiental às fibras, por difusão ou por formação de mecanismos de fendilhação (delaminação) na matriz (EUROCOMP, 1996).

Fonseca *et al.* (2011), realizaram um estudo acerca da durabilidade de laminados de fibras de carbono reforçados com polímeros utilizados para reforço em estruturas de concreto, no qual foram avaliados fatores como, a variação de massa e de propriedades de flexão, em três tipos de CFRP disponíveis no mercado sob as condições demonstradas na Tabela 2-6.

Tabela 2-6 - Especificações dos ensaios (Fonte: Fonseca et al. 2011)

Tipo de exposição	Duração	Condições
Imersão em água desmineralizada	18 meses	Temperaturas: 23°C, 40°C, e 60°C
Imersão em água com cloretos		Composição: 35g/l NaCl
		Temperaturas: 23°C, 40°C, e 60°C
Imersão em água alcalina		Composição: 118g/l Ca(OH) ₂ ; 4 g/l KOH; 0,9 g/l NaOH
	Temperaturas: 23°C, 40°C, e 60°C	

Ao final, foi possível concluir que a imersão em água pura e em solução salina provocou um notável efeito em relação a resistência a compressão dos CFRP. Além disso, percebeu-se que a solução alcalina foi a que causou efeitos de degradação mais severos em todos os tipos de laminados.

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).



Os mesmos autores realizaram uma investigação da durabilidade dos sistemas de FRP mais comumente disponíveis em condições ambientais padronizadas. O programa experimental, tratou da análise do comportamento de três sistemas de FRP submetidos a nove condições ambientais, mais especificações estão detalhadas na Tabela 2-7.

Tabela 2-7 - Número de amostras por teste (Fonte: Cromwell, 2011).

Exposição / Norma	Duração	Descrição Laboratorial	Testes conduzidos											
			D3039 (tração)			D2344 (SBS)	Aderência ao concreto			Flexão - viga				
			CP (4)	CF (4)	GF (4)	CP (4)	CP (4)	CF (4)	GF (4)	NO (2)	CP (2)	CF (2)	GF (2)	
Água / ASTM D2247	1.000, 3.000 e 10.000 h	100% UR~-38°C	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-
Água Salina / ASTM D1141	1.000, 3.000 e 10.000 h	Imersão em solução salina~-22°C	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-
Ambiente Alcalino	1.000, 3.000 e 10.000 h	Imersão em solução de CaCo3 com pH 9,5~-22°C	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-
Calor Seco / ASTM D3045	1.000 e 3.000 h	60°C	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-
Diesel / ASTM C581	4 horas	Imersão em óleo diesel~-22°C	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-
Intemperismo / ASTM G23	1.000 ciclos (4.000 h)	2h de UV~-63°C / 2h com 100% UR	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-
Ciclo Térmico	20 ciclos (480 h)	9h~(-18°C) / 15h com 100% UR~-38°C	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-
Gelo-degelo / ASTM C666	360 ciclos (1.583 h)	70 min~-18°C / 70 min de UV~-4,5°C	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2

CP (ref.) = Placa CFRP; CF (ref.) = Malha de CFRP; GF (ref.) = Malha de GFRP; SBS = Teste de cisalhamento de viga

Como conclusão em relação aos FRP estudados, foi possível afirmar:

- 1) As placas pré-moldadas manufaturadas de CFRP tiveram desempenhos muito superiores em todas as condições de ensaio. Tal desempenho pôde ser atribuído ao maior controle de produção destes materiais.
- 2) As malhas de CFRP produzidas manualmente tiveram desempenhos, em geral, satisfatórios, ainda que as condições de temperatura elevada resultaram no aparecimento de tensões residuais e consequentemente em danos na fase externa do FRP e induzindo a um aumento na absorção.
- 3) As malhas de GFRP produzidas manualmente tiveram desempenho semelhante às malhas de CFRP, entretanto a partir do momento em que os danos nas matrizes tiveram início, as fibras de vidro começaram a se degradar. As degradações mais pronunciadas foram devido aos ambientes de água salina e alcalino.

Micelli e Nanni (2004), afirmam que alguns mecanismos de degradação devem ser destacados de modo a classificar o desempenho dos varões de FRP empregados na engenharia civil, em termos de comportamento a longo prazo:



- Absorção de fluidos e influencia em suas propriedades físicas e mecânicas;
- Relaxamento da tensão e extensão gradual;
- Danos por fadiga ambiental;
- Intemperismo.

Mecanismos estes que podem ser considerados consequência do ataque de agentes externos:

- Humidade e solução aquosa;
- Ambiente alcalino;
- Efeitos termais (ciclo de gelo-degelo, altas temperaturas);
- Esforços de fadiga;
- Radiação ultravioleta (UV);
- Fogo.

Estes autores elaboraram um estudo a respeito da durabilidade de varões de FRP para estruturas de concreto. Foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas de dois tipos de varões de GFRP (um comercial e um protótipo experimental) e três tipos de varões disponíveis no mercado de CFRP através de ensaios de tração, de acordo com a norma ACI 440 e de SBT - *Short Beam Test* conforme a norma ASTM D4475. Além disso, ainda foi utilizado o SEM (Microscopia Electrónica de Varrimento) com o objetivo de verificar os danos nos sistemas de FRP causados por agentes agressivos.

Foram duas as condições dos ensaios de envelhecimento acelerado. A primeira se tratou da combinação de ciclos de condições ambientais, tais quais de, gelo-degelo, temperatura elevada, alta humidade e radiação UV, em uma câmara controlada. A segunda está relacionada com a exposição das amostras a ambientes alcalinos da forma que segue na Tabela 2-8.



Tabela 2-8 - Número de amostra por ensaio (Fonte: Micelli e Nanni 2004)

Provetes	Controle	Exposição alcalina			Ciclos ambientais
		21 dias~ 60°C	42 dias~ 60°C	42 dias~ 22°C	
G1 tração	5	3	3	-	4
G2 tração	5	3	3	-	4
C1 tração	4	3	3	-	4
C2 tração	4	-	-	-	4
C3 tração	4	3	3	-	4
G1 SBT	6	6	6	6	6
G2 SBT	6	6	6	6	6
C1 SBT	6	6	6	6	6
C2 SBT	6	6	6	6	6
C3 SBT	6	6	6	6	6

Entre os resultados relatados, pode-se destacar:

- Os testes de tração mostraram que os varões G1 e C3 obtiveram uma preservação de 100% das propriedades de tração após a imersão em solução intersticial dos poros do betão e depois dos ciclos ambientais. Os varões C1 e C2 apresentaram boa durabilidade, a redução das propriedades de C1 estavam dentro do erro experimental. A tensão de tração do varão G2 decresceu para 70% e 59% após 21 e 42 dias, respectivamente, da imersão em solução alcalina, quando comparado com a amostra de referência.
- Ciclo das condições ambientais combinados não produziram degradação significativa nos compósitos analisados. Bem como, as propriedades físico-mecânicas não apresentaram diminuição em nenhum caso.
- A resina de poliéster não proporcionou proteção adequada às fibras de vidro que foram significativamente deterioradas pela penetração de íons alcalinos.
- As fibras de carbono não demonstraram pontos fracos contra soluções alcalinas, mesmo havendo a penetração de fluidos decorrente de fissuras entre fibra/matriz. Situação observada nos varões C1 e C2.
- A utilização de resina termoplástica se revelou como um apropriado material no que diz respeito ao comportamento mecânico e proteção à degradação das fibras de vidro-E.



Ainda no que concerne aos varões de FRP, Kim *et al.* (2008), estudaram a influência de fatores ambientais na degradação de dois diferentes sistemas de varões de GFRP disponíveis comercialmente, um deles com dois tipos de varões compostos por viniléster e fibras de vidro-E, com 12,7 mm de diâmetro e exposto a quatro diferentes condições ambientais e um segundo tipo formado pelo mesmo material, mas, com tamanho reduzido para a análise microscópica, com 0,7 mm de diâmetro e submetido a cinco condições ambientais agressivas. As especificações dos testes de envelhecimento estão resumidas nas Tabela 2-9 e Tabela 2-10:

Tabela 2-9 - Métodos de envelhecimento das amostras de tamanho normal (Fonte: Kim et al. 2008).

Condições	Solução	Temperatura	Duração (dias)
Umidade	Água da torneira	25, 40, 80 °C	30, 60, 90, 132
Cloreto	3% de solução NaCl	25, 40, 80 °C	30, 60, 90, 132
Alcali	Solução alcalina (pH13)	25, 40, 80 °C	30, 60, 75
Gelo-degelo	Solução alcalina (pH13)	-25 à 30 °C	110

Tabela 2-10 - Método de envelhecimento das amostras de tamanho reduzido (Fonte: Kim et al. 2008).

Condições	Solução	Temperatura (°C)	Duração (dias)
Umidade	Água destilada	20, 80	1, 2, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 150
Alcali	Alcalina	20, 80	1, 2, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 150
Cloreto	3% NaCl	20	2, 10, 30, 70
Agente descongelante	4% CaCl ₂	20	2, 10, 30, 70
Molhagem e secagem	Água destilada	20	2, 10, 30, 70

Com os resultados dos ensaios físico-mecânicos, os autores puderam avaliar que as propriedades dos varões formados por viniléster e fibras de vidro-E foram reduzidas significativamente sob todas as condições ambientais consideradas no estudo. No geral, o ambiente alcalino foi o que teve maior influência na degradação dos GFRP. Tais resultados confirmam a bibliografia que destaca que a humidade e ambientes alcalinos têm efeitos consideráveis, não somente na degradação das fibras de vidro, mas também na interface entre a matriz e reforço.

Em síntese, a durabilidade dos sistemas de FRP dependem, não só do comportamento individual dos componentes, como também da interação entre eles no compósito.

De modo geral, pode-se afirmar que existe deterioração na generalidade dos sistemas de FRP, particularmente, em meios alcalinos. Contudo, em termos globais os compósitos são mais duráveis no tempo do que os materiais tradicionais, salientando-se a melhor resistência global registada pela família dos compósitos de CFRP.



2.5 VARÕES COMPÓSITOS

De acordo com Fernandes (2015), os varões compósitos tiveram um grande desenvolvimento nos finais dos anos 80, por se mostrarem uma boa alternativa à armadura convencional, a fim de resolver os problemas relacionados com a corrosão, humidade, entre outros.

A produção dos primeiros varões compósitos ocorreu pela técnica de pultrusão, com utilização da fibra de vidro e de resinas, como poliéster e viniléster.

As propriedades mecânicas dos varões compósitos são influenciadas, para além de outros fatores, pelo tipo de fibra utilizada no reforço axial da estrutura entrançada, pelo tipo de matriz resinosa empregada e pelo revestimento superficial adotado. A aderência é uma das propriedades mais imperativas de armaduras que incorporam o betão. Tendo isto em vista, foram aplicadas várias técnicas para a obtenção de adequada ancoragem entre tais materiais como, o revestimento superficial dos varões por grãos de areia, com nervuras moldadas na resina final de recobrimento e enrolamento helicoidal das fibras exteriores.

Fernandes (2015) afirma que nos anos 90 foi desenvolvida uma alternativa como forma de aprimorar as propriedades e características do varão compósito, essa melhoria consistiu em uma estrutura entrançada composta por fios de fibras de aramida com um núcleo cilíndrico.

Sidnei (2004) relata que os varões entrançados têm um núcleo cilíndrico que tem como objetivo, ter um comportamento elástico, em uma primeira fase, e depois do pico ter um comportamento dúctil. Desta forma, pretendia-se que quando o varão fosse sujeito a cargas de tração, o núcleo estivesse tracionado e as fibras entrançadas exteriores fossem capazes de girar e dar uma maior deformação para uma determinada carga.

2.5.1 VARÕES COMPÓSITOS ENTRANÇADOS (BCR)

Os varões compósitos entrançados - *Braided Composite Rods* - (BCR) são resultados da impregnação de uma matriz polimérica e uma estrutura entrançada a um



reforço axial. Estes materiais podem ser utilizados para reforço de betão (vigas, pilares e, em forma de rede, lajes e pavimentos) e até para estabilização de solos.

Entre suas vantagens pode-se listar que eles não sofrem o processo de corrosão apresentando assim uma elevada durabilidade; são leves e portanto possuem custos reduzidos de manuseamento, transporte e aplicação em obra, possuem relação tensão de rotura/peso específico elevada; para além disso, trata-se de um material inteligente, capaz de monitorizar os estados de deformação das estruturas em tempo real. Desta forma, qualquer deformação anormal poderá ser percebida antecipadamente, possibilitando uma rápida intervenção.

Os BCR são produzidos com diferentes tipos de materiais de acordo com as aplicações e exigências em vista e desenvolvidas em uma única etapa de produção acordo com a Figura 2-8.

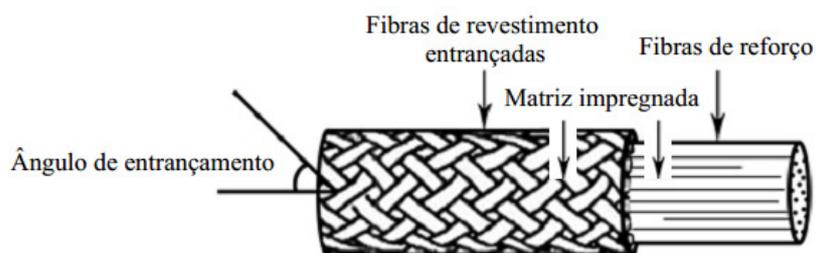


Figura 2-8 - Representação dos constituintes do BCR (Fonte: Ahmadi, 2009).

Entre as aplicações práticas dos BCR para além de seu emprego como reforço do betão para construção de túneis, pontes, hospitais e demais tipologias de estruturas (Figura 2-9) ressalta-se sua utilização para reforço de paredes de alvenaria em caso de sismos, no sentido de evitar o colapso das estruturas.



Figura 2-9 - Aplicações práticas dos BCR. (Fonte: Fangueiro, 2015).



3º. CAPÍTULO - MATERIAIS E METODOLOGIA

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 (fichas técnicas em Anexo) empregadas na matriz (Tabela 3-1) 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.

Tabela 3-1 - Amostras e esquema de nomenclatura.

Amostra / Ambiente	Alcalino	Cloreto	UV/Humidade
Acrílico + resina tipo 1	AA1° / AA2° / AA3°	AC1° / AC2° / AC3°	AU1° / AU2° / AU3°
Acrílico + resina tipo 2	A'A1° / A'A2° / A'A3°	A'C1° / A'C2° / A'C3°	A'U1° / A'U2° / A'U3°
Poliéster + resina tipo 1	PA1° / PA2° / PA3°	PC1° / PC2° / PC3°	PU1° / PU2° / PU3°
Poliéster + resina tipo 2	P'A1° / P'A2° / P'A3°	P'C1° / P'C2° / P'C3°	P'U1° / P'U2° / P'U3°

São descritos nesta seção, o processo produtivo dos varões compósitos bem como os materiais nelas empregados, o método e compostos utilizados no preparo dos ambientes e os procedimentos de ensaios mecânico, físicos e químicos.

3.1 PLANEAMENTO DAS AMOSTRAS

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 (Figura 3-1). 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.



Figura 3-1 - Provetes produzidos.

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 (de acordo com o item 3.3 deste capítulo).

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.

Devido ao elevado número de provetes adotou-se etiquetas de identificação em cada provete, com nomenclaturas que relacionam o tipo de fibra na utilizado na camada exterior, a matriz resinosa impregnada e o ciclo para o qual determinado elemento será retirado das condições de ensaio de durabilidade.

3.2.CONSTITUÍNTES 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, apresentadas em suas fichas técnicas no anexo e dois tipos de fibras na camada exterior dos provetes: poliéster e acrílico (Figura 3-2).

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 (fichas técnicas em Anexo).

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 conforme item 2.3.1.3.1 (Propriedades das fibras) do Capítulo 2.



Figura 3-2 - Fibras de poliéster e acrílica.

3.3 PRODUÇÃO 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, mais especificado no item 2.2.2 do Capítulo 2.

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 (Figura 3-3).



Figura 3-3 - Balseiro de resina.

Antes da preparação da resina foi necessário aplicar uma película plástica em todos os recipientes em contato com esta, de forma a garantir a sua eliminação sem qualquer tipo de dificuldade no final do processo de produção, pois a resina adere a qualquer tipo de superfície após a cura.

Em seguida, o núcleo envolvido com a resina passa pela máquina de entrançamento (Figura 3-4), onde o reforço é coberto com as fibras de poliéster ou de acrílico.



Figura 3-4 - Máquina de entrançamento.

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.



Figura 3-5 - Sistema de controle de velocidade da trançadeira e do sistema de tiragem.

Na sequência o varão entra na câmara de cura (Figura 3-6), 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 trançado não seja danificada. A estrutura da câmara é constituída por um painel tipo sanduiche, composto por duas chapas perfiladas contendo lã 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.



Figura 3-6 - Câmara de cura.

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 (Figura 3-7) 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.



Figura 3-7 - Sistema de tiragem e roldana dentada.

Finalmente, após a produção dos provetes, os varões foram acondicionados em estufa a 60°C (Figura 3-8), permitindo sua completa cura, e, antes que fossem colocados nas condições de envelhecimento, foram identificados com etiquetas, pesados e verificados microscopicamente.



Figura 3-8 - Câmara de cura à 60°C.



3.4 PREPARAÇÃO DE SOLUÇÕES E AMBIENTES

Os ambientes aos quais foram submetidos os varões foram:

- Alcalino – para representação do ambiente no interior do betão em termos de pH;
- Cloretos – para simular o ambiente litorâneo e avaliar o comportamento dos varões a corrosão;
- Raios UV/humidade

3.4.1 AMBIENTE ALCALINO

Atualmente, é comum os materiais FRP estarem em expostos a ambientes alcalinos através da interação com diversas fontes, como o betão (encamisamento de pilares, reforço de lajes e vigas), os solos alcalinos, ou mesmo soluções químicas alcalinas.

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.

O documento sugere uma composição química, de modo que a solução represente a água intersticial no interior do concreto de cimento Portland. Assim, 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 Ca(OH)_2 , 9 g de NaOH e 42 g de KOH.



Figura 3-9 - Compostos químicos utilizados no preparo dos ambientes.

O recipiente foi então vedado e acondicionado em estufa a $60 \pm 1^\circ\text{C}$, conforme recomendado por norma.

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. No caso de diminuição do pH, adicionou-se hidróxidos, e na hipótese de aumento do pH da solução, aumentou-se a quantidade de água destilada em proporções adequadas.

Os períodos dos ciclos foram 30, 60 e 80 dias.

3.4.2 AMBIENTES DE CLORETOS

A análise do comportamento dos materiais em estudo a este ambiente é fundamental, pois a quantidade de obras de engenharia em zonas costeiras e marítimas é bastante expressiva. Diante da exposição à maresia, todas as estruturas de concreto armado estão passíveis a ataques de cloretos. Esta condição é indesejável, pois os íons cloretos (Cl^-), são pequenos, têm elevada mobilidade no interior do concreto e ao atingirem a armadura, proporcionam a progressão da corrosão.

De forma a simular um ambiente deste tipo, utilizaram-se recipientes comportando uma solução aquosa de água salgada, onde foram submergidos os provetes teste. 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 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (111,12 g), $CaCl_2$ anidro (11,58 g) e $SrCl_2 \cdot 6H_2O$ (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 3-10) 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.



Figura 3-10 - Recipiente utilizado para acondicionamento dos provetes.

3.4.3 AMBIENTES DE CONDENSAÇÃO E DE EXPOSIÇÃO A RAIOS UV

É de conhecimento geral que ambientes muito úmidos e quentes têm, normalmente, efeitos negativos na durabilidade dos materiais, acelerando, muitas vezes, seu envelhecimento. As estruturas construídas com perfis de BCR podem, como quaisquer outras estruturas, estar sujeitas à ação da água ou de soluções aquosas, por estarem imersas (como é o caso de pilares de pontes) ou através da difusão em outros substratos.

Tendo em conta que a água é um dos elementos mais agressivos para a construção, é importante saber qual a sua influência nas propriedades e durabilidade deste material.



A radiação proveniente da luz solar atinge a terra com uma gama de comprimentos de onda de grandeza suficiente para romper as ligações nos materiais poliméricos. A incidência da radiação UV é responsável pelo desencadear do mecanismo de fotodegradação, mecanismo que afeta apenas a camada superficial (na ordem de 50 μm a 100 μm).

Caso um material compósito não seja preparado para resistir a este tipo de radiação, quer seja por uma tinta protetora, ou por um material de revestimento, o material compósito irá sofrer uma degradação superficial, a qual, a longo prazo, poderá descobrir as fibras de reforço.

Para tal avaliação, os provetes foram acondicionados na máquina QUV *Weathering Tester – Model QUV/spray* (Figura 3-11) 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.



Figura 3-11 - Câmara QUV.

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.



3.5 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

A seguir são descritos os métodos adotados, bem como os princípios e objetivos da avaliação das variações das características e do comportamento dos provetes após sua exposição aos ambientes agressivos.

3.5.1 *VARIAÇÃO DE MASSA*

Característica comum à maioria dos materiais, não sendo este material compósito uma exceção, consiste na capacidade de absorção de humidade. Desta forma, a variação de massa assume particular relevância ao longo da campanha experimental, para verificação da natureza dos diferentes tipos de materiais assumidos e do seu comportamento frente as condições de envelhecimento os quais foram submetidos.

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 em uma balança digital com precisão de 0,001 g (Figura 3-12). A massa total dos varões representa o somatório das massas dos seus constituintes, incluindo resina, fibra e o entrançado. Os valores identificados, foram registrados e estão apresentados no Capítulo 4 deste documento.



Figura 3-12 - Balança digital utilizada.



3.5.2 *ANÁLISE MICROSCÓPICA*

A importância desta análise reside na possibilidade de fundamentar as eventuais variações de comportamento dos materiais tendo em vista a modificação de sua estrutura a nível microscópico.

A verificação microscópica sucedeu a pesagem dos provetes e ocorreu no mesmo local da pesagem dos varões. Utilizou-se um microscópio digital com capacidade de ampliação de 500 vezes.

3.5.3 *PROPRIEDADES MECÂNICAS*

As propriedades mecânicas dos varões foram avaliadas com recurso a ensaios de tração mecânica uniaxial. Este teste revela-se de extrema importância uma vez que pode fornecer informações importantes como o nível da força e tensão máxima de rotura, deformação e ductilidade.

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. Este equipamento permite tracionar o material até à rotura, a uma velocidade constante, registando as forças envolvidas e correspondentes deslocamento.

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 foram encaminhados para o bloco CVR - Centro para a Valorização de Resíduos na Universidade do Minho onde tiveram 20 cm de suas extremidades lixadas e coladas com resina SikaDur 32-EF, a tubos metálicos de mesmo comprimento e diâmetros de 10mm. O roteiro deste processo começa por fincar os tubos metálicos em chapas de XPS com espessura de 8 cm, em seguida os tubos são preenchidos com a resina fluida até um determinado nível. Os varões então, são posicionados no interior dos tubos de modo que a cola fique em contato com toda a parede do tubo e do varão (Figura 3-13). Para que houvesse a centralização dos varões compostos no interior dos tubos, de modo a anular os esforços cortantes durante o ensaio de tração, foram amarradas ligas elásticas como forma de aumentar a seção dos varões com o intuito de reduzir sua movimentação ao longo do período de secagem.



Figura 3-13 - Preparação dos provetes.



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.



Figura 3-14 - Estrutura utilizada no ensaio de tração.

Ainda foram realizadas pequenas raspagens na parte central dos varões, espaçadas em 5 cm, mesmo comprimento de medida do extensômetro, para que fosse analisada a deformação das fibras de reforço.

3.5.4 *DETERMINAÇÃO DE COR E ESCALA DE CINZA*

Apesar de não influenciar nas propriedades mecânicas do material em si, o aspecto de um material ao longo do tempo assume cada vez mais relevância nas aplicações da engenharia civil. O controle do comportamento e suscetibilidade à exposição a raios ultra violetas, vento e humidade são, neste sentido, aspectos relevantes e nocivos à cor e brilho dos materiais.

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 Ultimeção Têxtil na Universidade do Minho, através dos equipamentos Espectrofotômetro de Reflexão DataColor e Câmara de Luz VeriVide (Figura 3-15). O espectrofotômetro



registra os valores tri-estímulo resultantes de cada medição e converte-os de forma automática nas coordenadas $L^*a^*b^*$.

A variação da cor é avaliada através do cálculo do parâmetro ΔE^* , da forma indicada na expressão abaixo. Esta traduz as variações dos parâmetros L^* (representa a diferença de luminosidade-escurecimento), a^* (representa a variação de vermelho-verde) e b^* (indica a variação de amarelo-azul) entre a situação inicial e a situação pós-envelhecimento.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$



Figura 3-15 - Espectrofotômetro e câmara de luz utilizados em ensaio.

A tonalidade é descrita em termos angulares podendo ser convertida em medida de distância (tonalidade métrica, H^*). O eixo de tonalidade métrica H^* , segue com ângulos retos até o eixo de cromaticidade passando pelo padrão selecionado, permitindo que as diferenças de cor sejam expressas em termos de três coordenadas retilíneas, as quais quando comparadas com a amostra se apresentam sob o diferencial cromático ΔL^* , ΔC^* e ΔH^* . Valores positivos de ΔC^* indicam amostras mais cromáticas, e valores



negativos indicam menos cromáticas. Valores positivos de ΔH^* significam que a cor desloca-se no sentido anti-horário das tonalidades

Para a realização do ensaio, foi necessário que os provetes fossem preparados de forma a apresentarem geometria adequada para ajustarem-se nas dimensões dos equipamentos. Para tanto, foram cortadas seções dos varões no sentido longitudinal de tal maneira que uma de suas faces ficasse plana, conforme a Figura 3-16. Os provetes analisados foram apenas os expostos a radiação UV e a condensação e dispuseram dimensões de 6 cm x 0,4 cm.

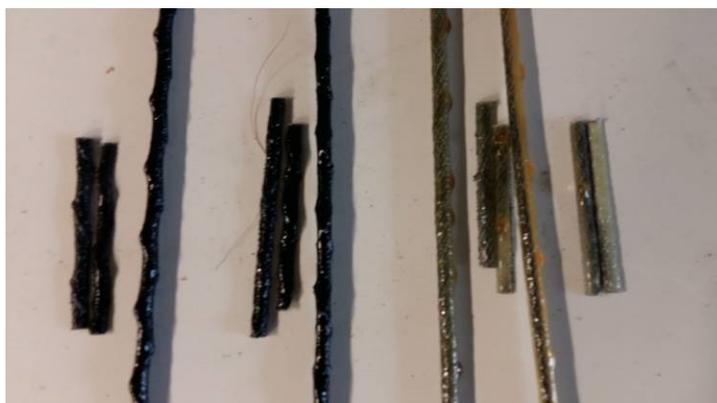


Figura 3-16 - Provetes preparados para ensaio.

3.5.5 *ESPECTROSCOPIA DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)*

O FTIR tem como objetivo a identificação química do material, e como relevância para o trabalho, a verificação da alteração dos compostos químicos presentes na camada externa dos materiais em estudo para cada ambiente ensaiado. Em particular, através deste ensaio é possível determinar a natureza da matriz orgânica, bem como a eventual presença de cargas ou aditivos. O ensaio procedeu-se em um analisador de infravermelho com transformada de Fourier – Avatar 360 Thermo Nicolet (Figura 3-18) 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.



Nesta etapa foram analisadas as fibras utilizadas para constituir a fase de revestimento das amostras (poliéster e acrílico) utilizando-se a técnica de refletância e os provetes propriamente dito através do método da transmitância.

As amostras dos varões necessárias para o ensaio foram obtidas através da raspagem de partículas da camada externa dos perfis em estudo. O ensaio requer a preparação prévia de uma pastilha de brometo de potássio (KBr), de modo a possibilitar a transposição da radiação emitida através do material.

Desta forma, os resíduos provenientes da raspagem dos provetes foram misturados com o brometo de potássio recorrendo a um almofariz. Para a preparação da pastilha, a mistura resultante foi prensada durante 10 minutos, com uma força de aproximadamente 10 tonf. O resultado final do processo é o disco transparente ilustrado na Figura 3-17.



Figura 3-17 - Pastilha de brometo de potássio (KBr).

O ensaio iniciou-se posteriormente ao posicionamento da pastilha no interior do equipamento.



Figura 3-18 - Analisador de infravermelho com transformada de Fourier.



4º. CAPÍTULO - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos por meio da realização dos ensaios descritos, efetuou-se a análise dos valores, de modo a compara-los e analisar os vários dados encontrados. Dessa forma, conseguiu-se afirmar as características de cada material.

O objetivo deste capítulo se insere em apontar os materiais que indicam maior degradação de acordo com cada tipo de ensaio, congregando ao final todos eles de modo a indicar uma escala em que se distingue quais amostras são mais ou menos duráveis. Isto decorre, portanto, de uma classificação em umérica para cada ensaio, em que são atribuídos valores de 1 a 4 para cada amostra, dentro de cada combinação ambiente de exposição – tipo de ensaio. Ao final então são somadas as pontuações de cada amostra para cada ambiente, tal que se obtém um resultado que possibilita indicar qual material é mais ou menos suscetível aos ataques estudados.

Através dos ensaios de FTIR e de resistência mecânica à tração, propõe-se aqui uma correlação entre a durabilidade dos materiais e suas condições de uso, isto é, uma análise que permita indicar o quão degradado são os materiais quando submetidos aos ambientes agressivos em questão.

Outro produto deste estudo é a projeção temporal relativa aos ensaios de laboratório, em que são desenvolvidos cálculos que permitem apontar um período médio real que proporciona o nível de degradação obtido com os ensaios.

A nomenclatura dos provetes utilizada nesta seção está de acordo com a apresentada no início do capítulo 3.

4.1 COMPORTAMENTO À TRAÇÃO

O estudo do comportamento mecânico dos varões BCR (varões compósitos entrançados) foi levado a cabo considerando as variáveis, resistência à tração, deformação última associada e módulo de elasticidade em tração.

Apresentam-se a seguir, os resultados médios das propriedades mecânicas em tração para os vários ambientes de exposição. No anexo deste documento, estão presentes



os resultados para a totalidade dos provetes ensaiados, bem como as respectivas curvas experimentais.

Vale a pena salientar que não se evidenciaram alterações no modo de ruptura dos provetes após o envelhecimento (ruptura frágil). As Figuras Figura 4-1 a Figura 4-4 demonstram os comportamentos típicos das curvas força x deslocamento dos provetes com e sem degradação (referência).

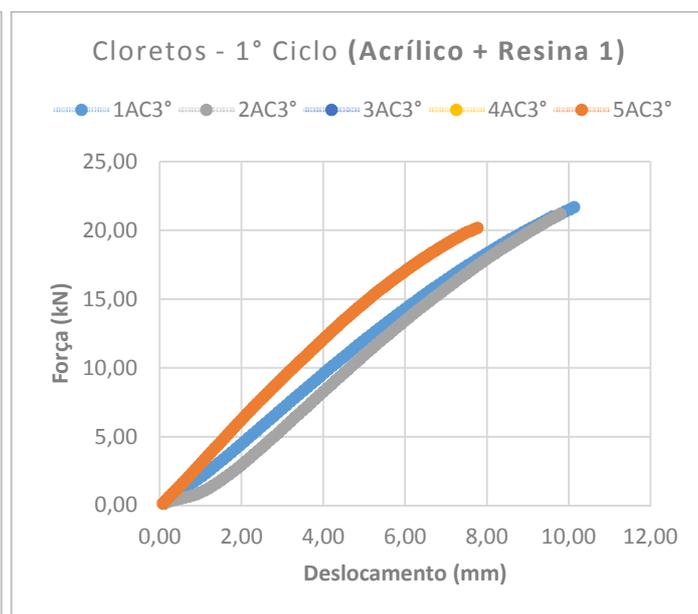
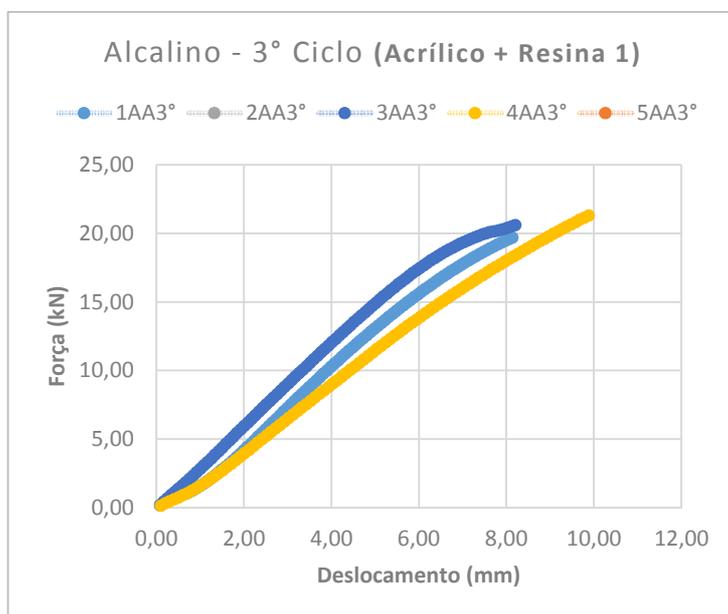
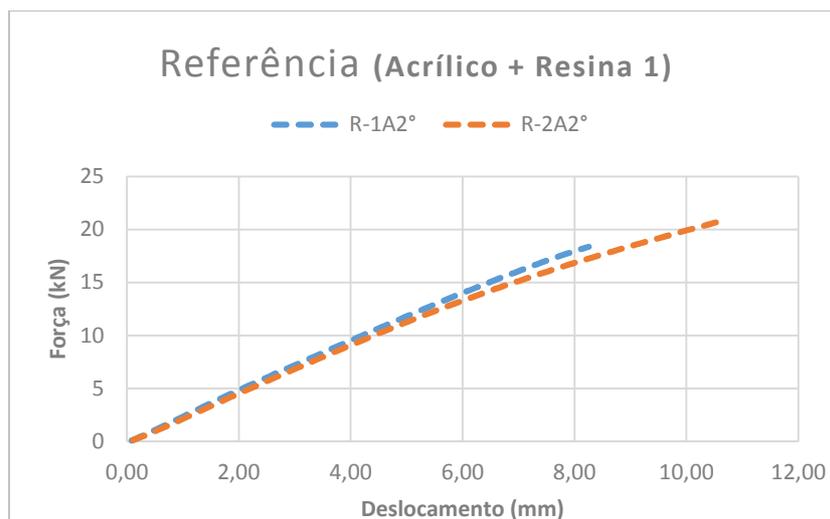


Figura 4-1 – Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (acrílico + resina tipo 1).

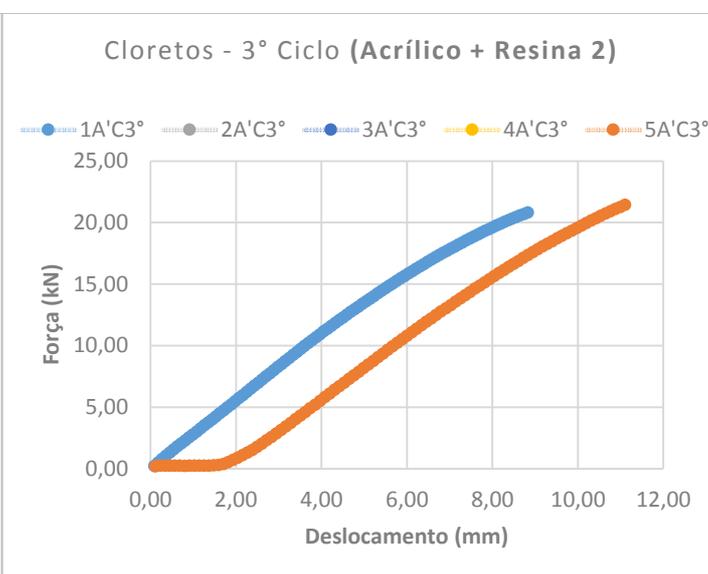
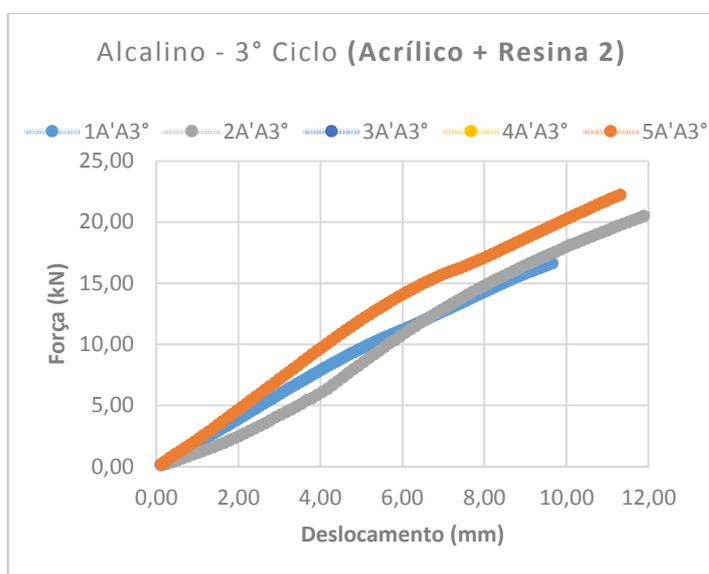
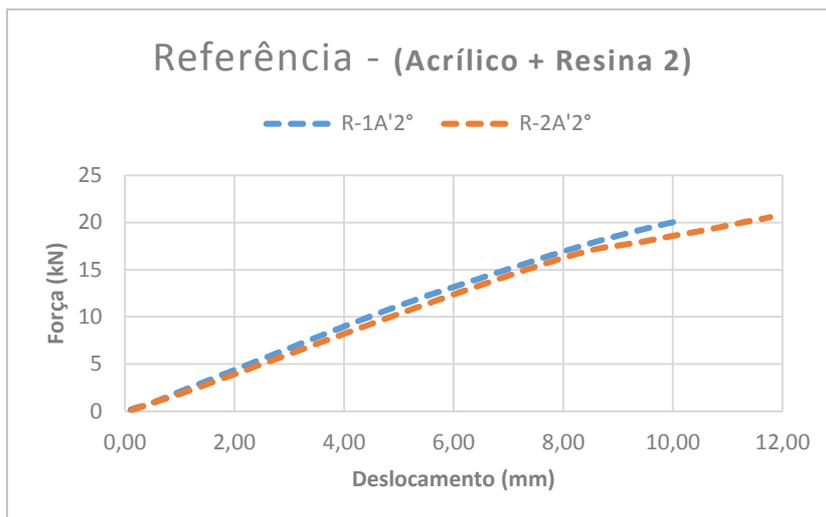


Figura 4-2 - Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (acrílico + resina tipo 2).

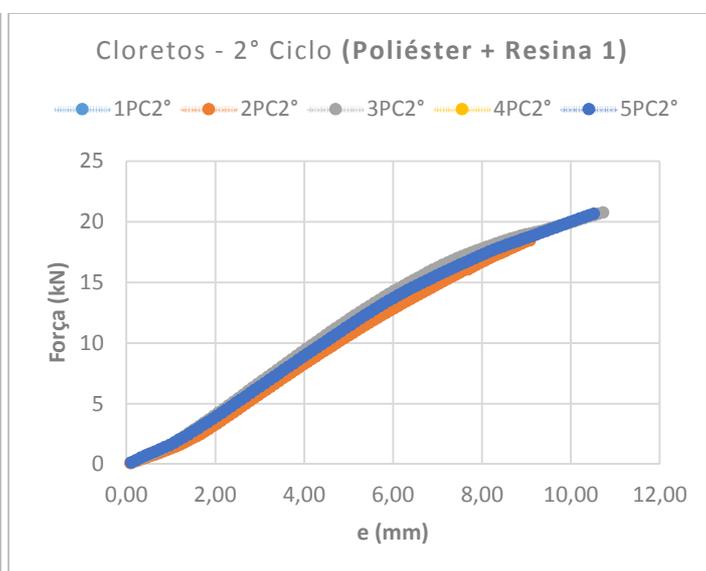
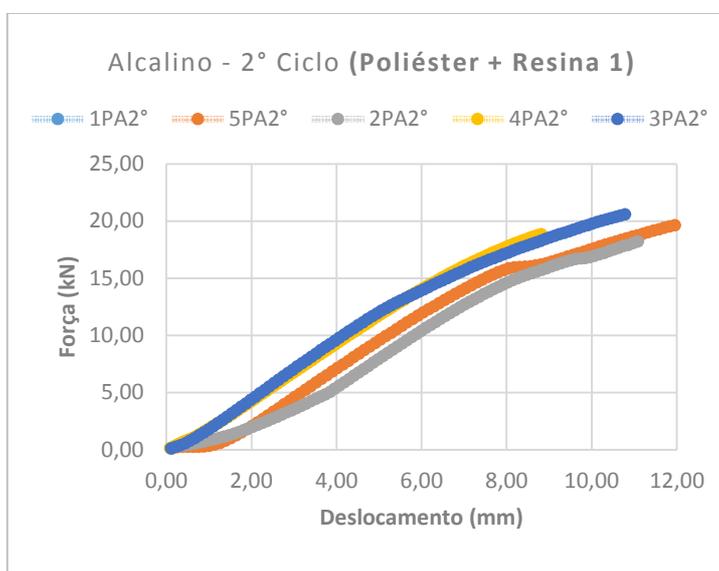
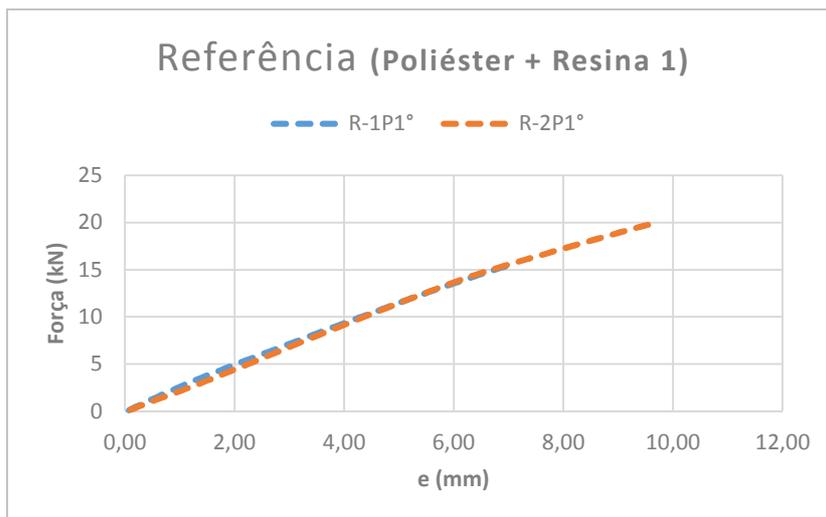


Figura 4-3 - Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (poliéster + resina tipo 1).

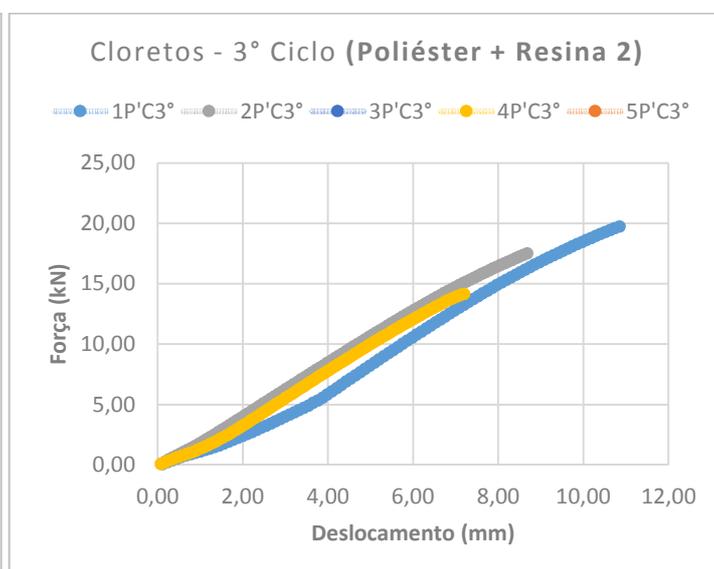
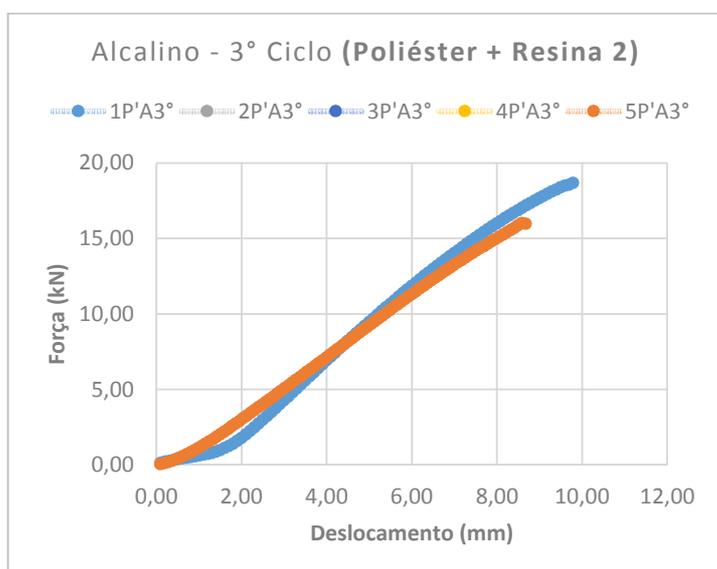
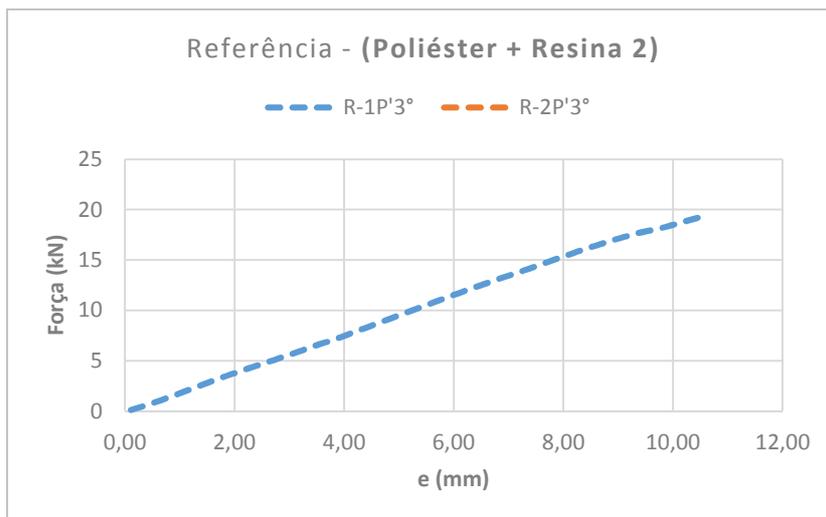


Figura 4-4 - Curvas força x deslocamento de amostras com e sem degradação (poliéster + resina tipo 2).

Na Tabela 4-1 listam-se os valores médios dos resultados de cada provete de cada uma das amostras em estudo da tensão de rotura em tração referentes aos compósitos imersos em soluções alcalinas e de cloretos em cada ciclo. Analogamente, na Tabela 4-2 são mostrados os valores médios encontrados para cada provete do módulo de elasticidade de cada amostra ensaiada. Como referido no Capítulo 3, os provetes em questão foram submetidos a envelhecimento durante 30, 60 e 80 dias.



Tabela 4-1 - 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 4-2 - 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

Em uma análise inicial, pode-se verificar a partir da Tabela 4-1 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.

Tais resultados confirmam a bibliografia citada no tópico 2.4.1, Kim et. al., (2008), que destaca que ambientes alcalinos têm efeitos consideráveis, não somente na degradação das fibras de reforço, mas também na interface entre a matriz e reforço.

Com exceção das amostras supracitadas, todas as demais apresentaram relativamente pouca variabilidade em seus valores de tensão máxima, com máximo percentual de decréscimo de 9,6% para os provetes constituídos por poliéster e resina tipo 2 submetido a solução de cloretos ao fim do último ciclo.

Ainda a respeito da Tabela 4-1, 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 4-2, 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).

Para melhor análise, foram elaborados gráficos com diferentes perspectivas a partir dos valores mecânicos encontrados no ensaio de tração.

O conjunto de gráficos seguintes tem como intuito demonstrar comparativamente o nível de degradação dos parâmetros mecânicos de cada ambiente agressivo, sobre cada tipo de amostra.

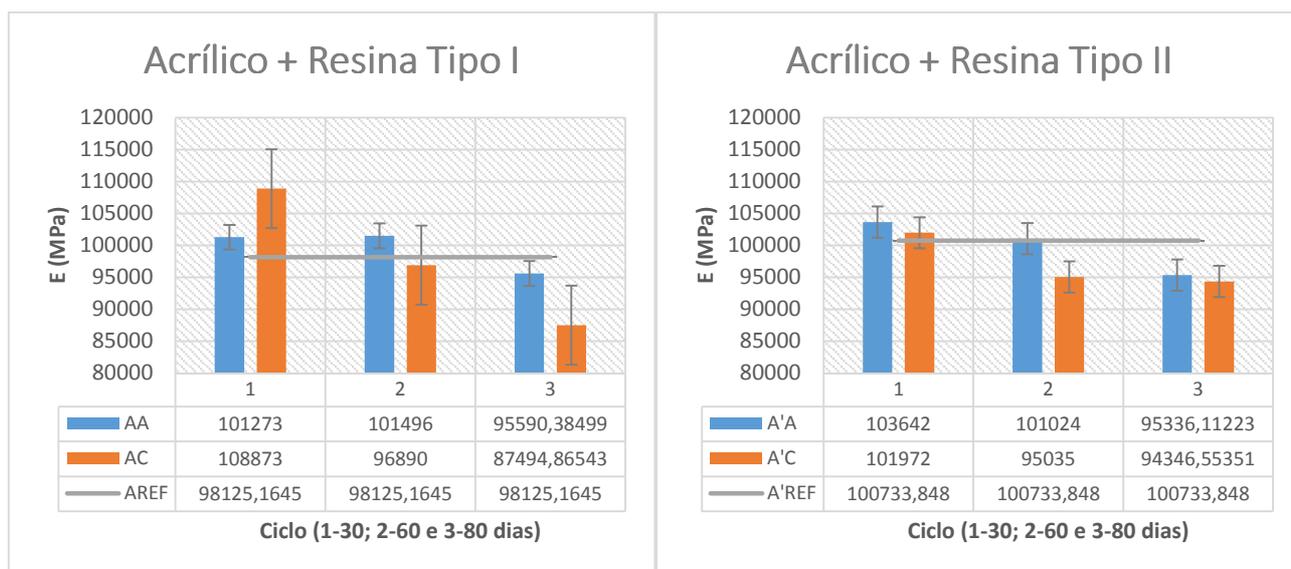


Figura 4-5 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras revestidas por acrílico.

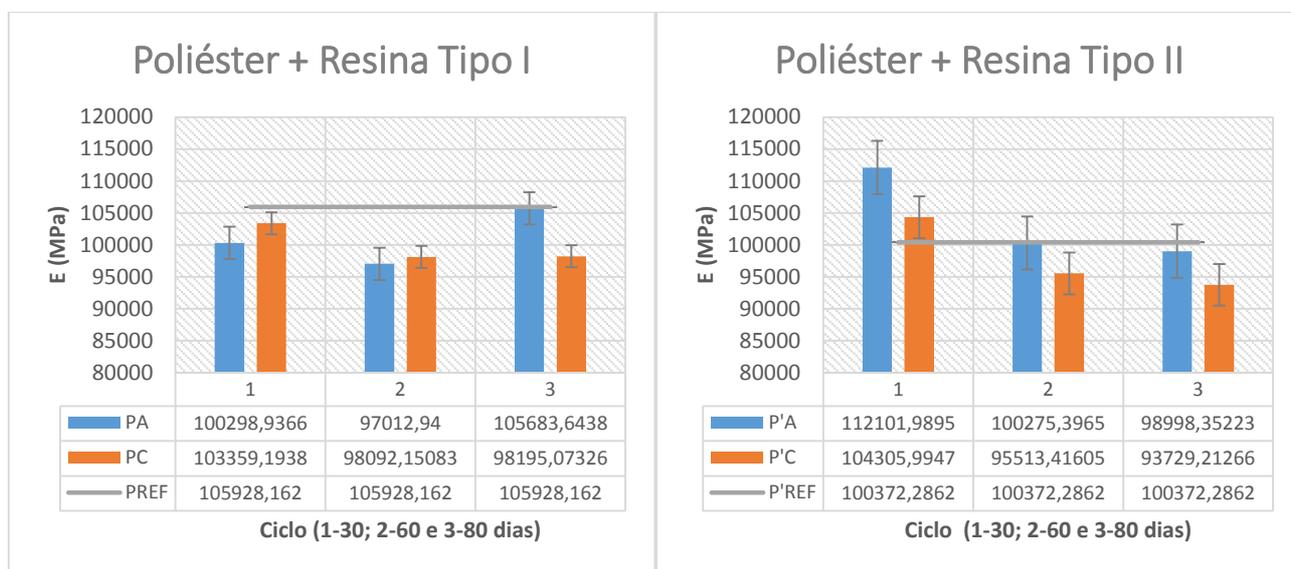


Figura 4-6 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras revestidas por poliéster.

Da análise das Figuras Figura 4-5 e Figura 4-6, verifica-se que, o ambiente de cloretos é o que possui maior influência na degradação dos provetes com camada externa de poliéster ou acrílico e resina tipo 2.

Por outro lado, constata-se que a resina tipo 2 tem boa resistência relativamente ao ataque em ambientes básicos visto que o módulo de elasticidade dos elementos que a continha mantiveram constantes os seus valores, próximos dos de referência.

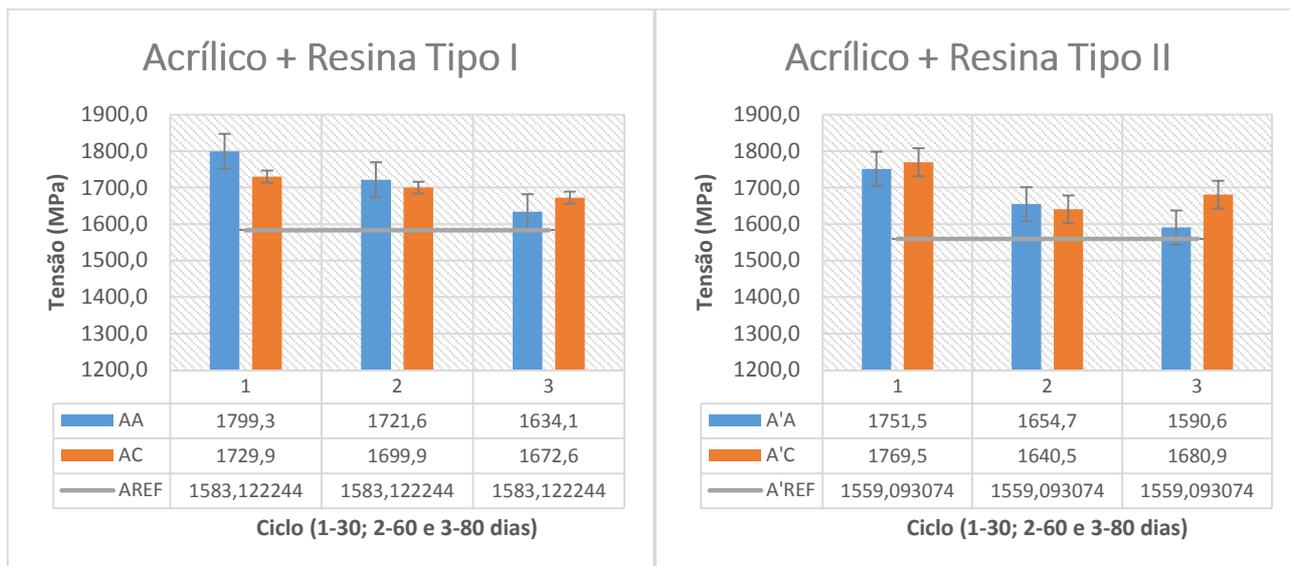


Figura 4-7 - Evolução da variação da tensão de ruptura das amostras compostas por acrílico.

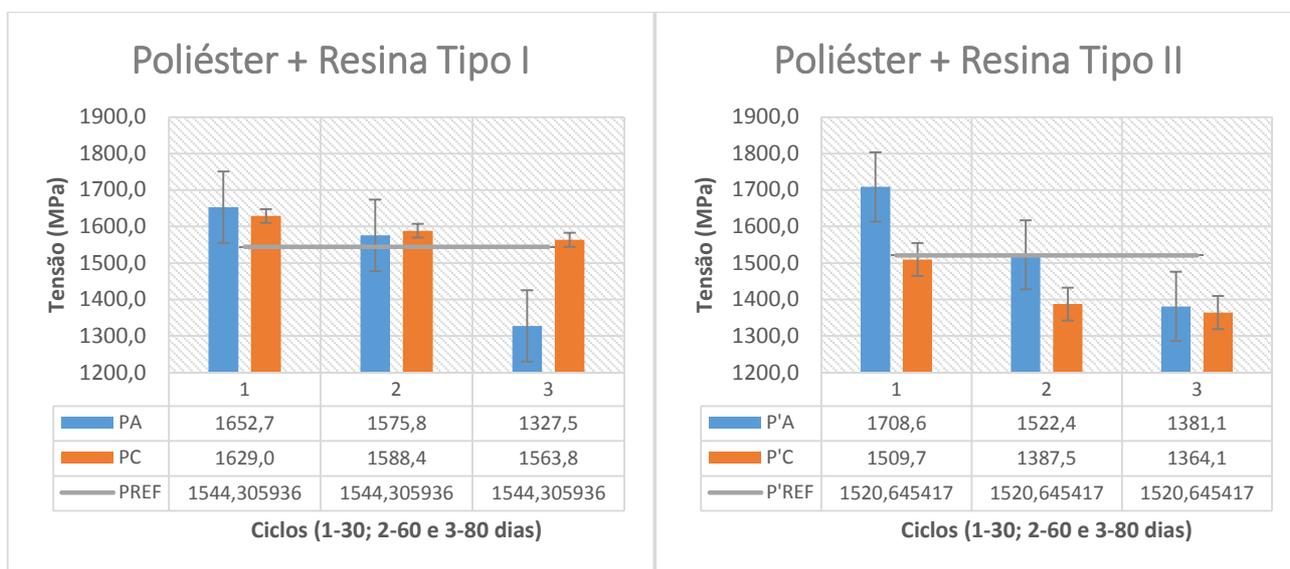


Figura 4-8 - Evolução da variação da tensão de ruptura das amostras compostas por poliéster.

Em termos gerais, analisando os conjuntos de gráficos das Figuras Figura 4-7 e Figura 4-8, é válida a afirmação que a composição da camada externa dos varões em fibra de acrílico e resina do tipo 1 apresenta os melhores resultados, tanto sob ataques de agentes em ambientes alcalinos como em soluções de cloretos, visto a baixa variabilidade tensão de tração máxima de ruptura ao longo do tempo e proximidade com os valores de amostras não degradadas.

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

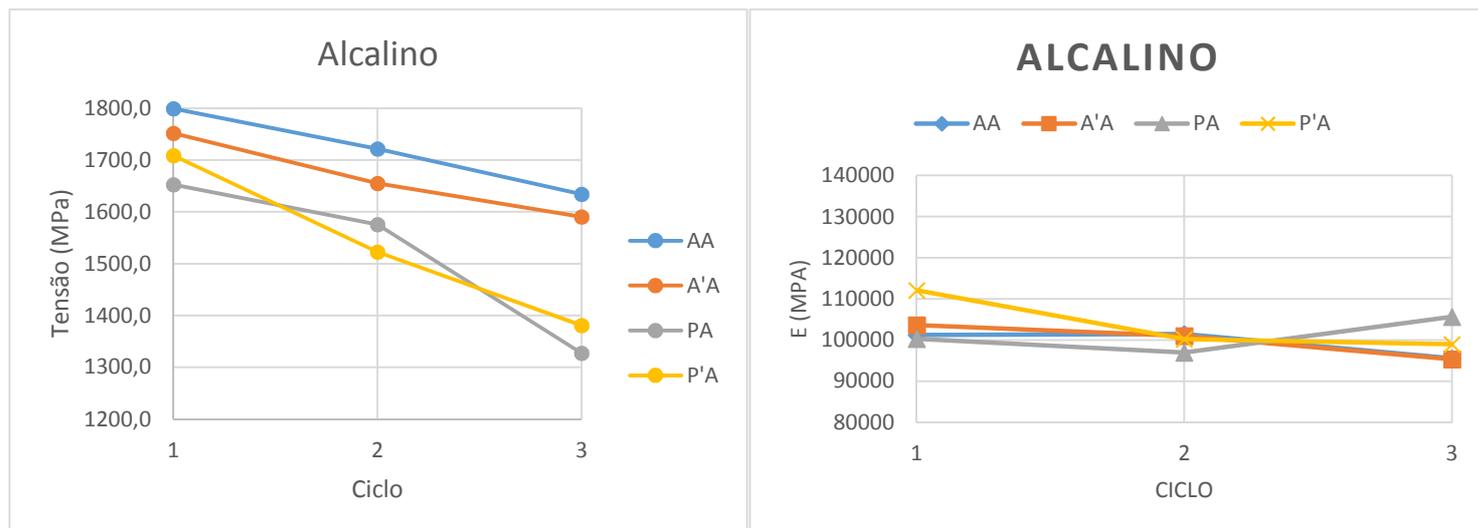


Figura 4-9 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras em meio alcalino.

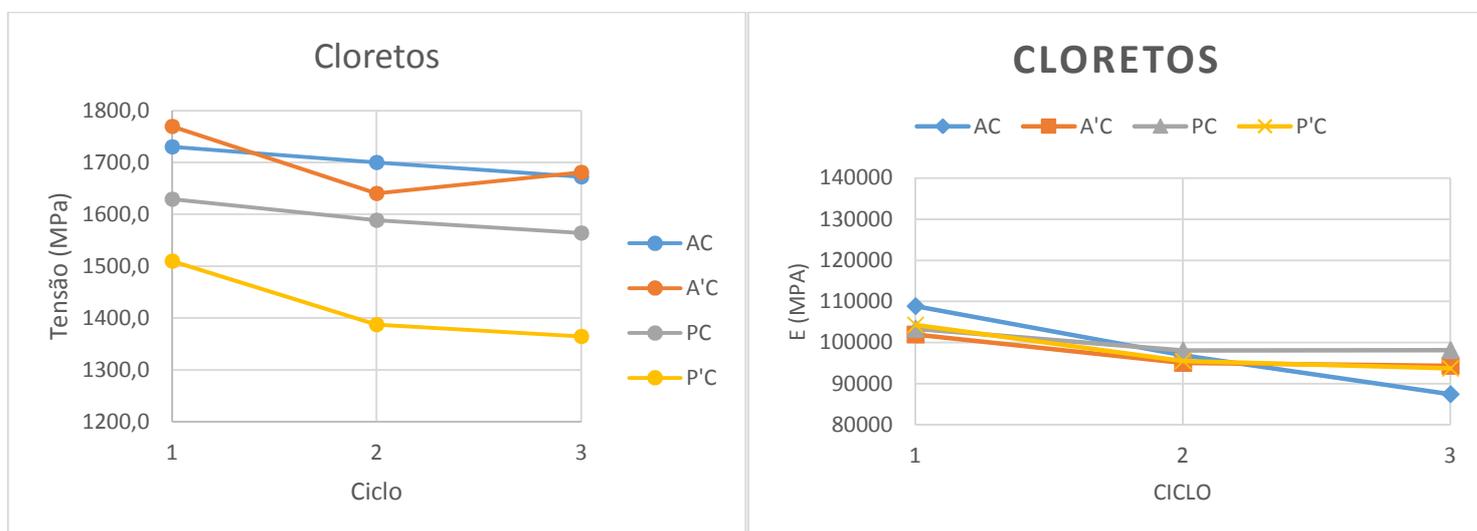


Figura 4-10 - Evolução da variação dos módulos de elasticidade das amostras em meio de cloretos.

Com base na observação das Figuras Figura 4-9 e Figura 4-10, nota-se claramente, 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 4-3 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 4-4 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 4-3 - 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 4-4 - 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 Tabela 4-5 e Tabela 4-6 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 4-5 - Classificação das amostras quanto ao valor da tensão máxima.

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



Tabela 4-6 - Classificação das amostras quanto ao valor do módulo de elasticidade máximo.

Classificação das amostras		
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

4.2 VARIACÃO DE COR

Como forma de complemento do trabalho e caracterização das amostras submetidas a raios UV e humidade (visto que as mesmas não foram ensaiadas mecanicamente, devido a limitações geométricas dos provetes), procede-se então, com os ensaios de determinação da cor e escala de cinza.

A verificação destas propriedades foi determinada de maneira qualitativa e quantitativa, comparando os resultados dos ensaios sobre material não envelhecido e sobre material sujeito a envelhecimento acelerado durante os 3 (três) ciclos. Os resultados individuais dos ensaios de determinação da cor e da escala de cinza encontram-se em anexo.

Nas Tabelas Tabela 4-7 a Tabela 4-10 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 4-7 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 1 e acrílico com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR						
Partida:	A1		Padrão:	A0		
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	1-2	1-2	10,930	-10,887	0,036	-0,967
A/10	1-2	1-2	10,829	-10,786	0,481	-0,826
F11/10	1-2	1-2	10,889	-10,850	0,104	-0,915
D65/2	1-2	1-2	10,923	-10,877	0,017	-1,005
Partida:	A2		Padrão:	A0		
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	1	1	12,911	-12,587	-2,803	-0,631
A/10	1	1	12,903	-12,649	-2,447	-0,719
F11/10	1	1	13,094	-12,692	-3,145	-0,692
D65/2	1	1	12,988	-12,653	-2,845	-0,698
Partida:	A3		Padrão:	A0		
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	1-2	1-2	10,008	-9,970	-0,759	-0,440
A/10	1-2	1-2	9,992	-9,961	-0,565	-0,534
F11/10	1-2	1-2	10,068	-10,010	-0,905	-0,583
D65/2	1-2	1-2	10,042	-9,994	-0,833	-0,531

Tabela 4-8 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 2 e acrílico com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR						
Partida:	A_1		Padrão:	A_0		
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	2	2	6,699	3,197	5,650	-1,654
A/10	2	2	7,333	3,623	6,216	-1,417
F11/10	2	2	7,617	3,504	6,631	-1,332
D65/2	2	2	6,773	3,359	5,635	-1,682
Partida:	A_2		Padrão:	A_0		
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	2-3	2-3	5,346	1,456	4,863	-1,675
A/10	2	2	6,011	1,858	5,540	-1,408
F11/10	2	2	6,145	1,745	5,742	-1,323
D65/2	2-3	2-3	5,426	1,607	4,904	-1,679
Partida:	A_3		Padrão:	A_0		
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	2	2	7,322	0,079	6,914	-2,409
A/10	2	1-2	8,279	0,681	8,021	-1,937
F11/10	2	1-2	8,339	0,510	8,106	-1,890
D65/2	2	2	7,389	0,295	6,979	-2,409



Tabela 4-9 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 1 e poliéster com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR						
Partida: P1			Padrão: P0			
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	3-4	3-4	2,710	2,363	1,235	-0,481
A/10	3-4	3-4	2,774	2,433	1,317	-0,198
F11/10	3-4	3-4	2,719	2,355	1,273	-0,478
D65/2	3-4	3-4	2,746	2,397	1,276	-0,414
Partida: P2			Padrão: P0			
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	2	2	7,838	7,252	2,881	-0,744
A/10	2	2	7,891	7,369	2,817	-0,189
F11/10	2	2	7,904	7,280	2,966	-0,826
D65/2	2	2	7,913	7,320	2,945	-0,606
Partida: P3			Padrão: P0			
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	1-2	1-2	9,395	9,146	1,994	-0,806
A/10	1-2	1-2	9,544	9,280	2,212	-0,275
F11/10	1-2	1-2	9,534	9,232	2,215	-0,869
D65/2	1-2	1-2	9,455	9,206	2,047	-0,678

Tabela 4-10 - Diferença CIE Lab entre as amostras com matriz resinosa tipo 2 e poliéster com e sem degradação.

ALTERAÇÃO DA COR						
Partida: P_1			Padrão: P_0			
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	3-4	3-4	2,265	-1,293	1,830	-0,326
A/10	3-4	3-4	2,251	-1,185	1,913	-0,026
F11/10	3-4	3-4	2,326	-1,288	1,916	-0,279
D65/2	3-4	3-4	2,252	-1,245	1,861	-0,240
Partida: P_2			Padrão: P_0			
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	3-4	3-4	2,483	1,081	2,150	-0,612
A/10	3-4	3-4	2,930	1,282	2,627	-0,194
F11/10	3-4	3-4	2,639	1,142	2,320	-0,527
D65/2	3-4	3-4	2,534	1,148	2,201	-0,509
Partida: P_3			Padrão: P_0			
	ISO A05	AATCC	ΔE^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
D65/10	1-2	1-2	9,595	8,787	3,841	-0,303
A/10	1-2	1-2	9,562	8,908	3,473	0,119
F11/10	1-2	1-2	9,588	8,766	3,869	-0,357
D65/2	1-2	1-2	9,645	8,857	3,813	-0,179



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 4-7). A mesma amostra apresentou uma redução relevante no valor de ΔL^* e Δb^* , indicando um escurecimento na cor do provete e uma perda na intensidade da cor amarela respectivamente. Desta análise, elabora-se a Tabela 4-11.

Tabela 4-11 - 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

Deste modo, elucida-se que a amostras contendo matrizes do tipo 1 são as mais suscetíveis a variação de cor.

Esta variação é perceptível à vista desarmada, como se pode observar na Figura 4-11, que apresenta a comparação entre provetes de acrílico e resina tipo 1 no estado não envelhecido e após o período de exposição. Deste modo, é possível verificar que, ao longo do tempo, o material fica mais translúcido e portanto mais amorfo, o que fundamenta uma eventual perda de resistência mecânica por parte dos materiais expostos aos ambientes deletérios.

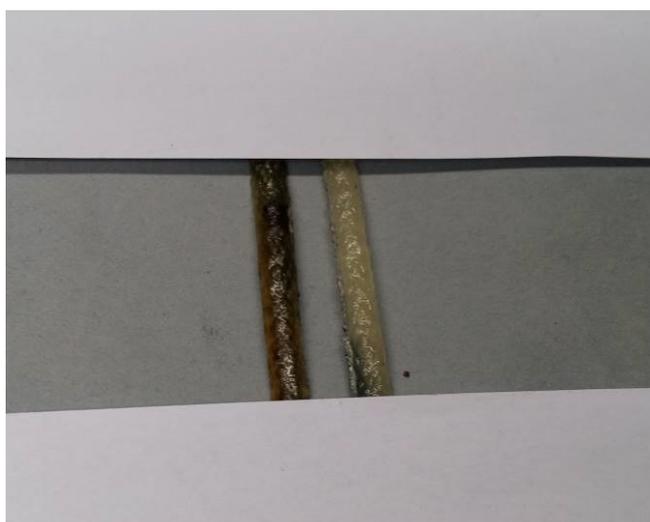


Figura 4-11 - Diferença física entre provetes com e sem degradação.



4.3 ESPECTROSCOPIA DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Apresentam-se neste tópico os espectros de FTIR obtidos para as amostras de cada um dos materiais em estudo. Como referido no capítulo 3, as amostragens foram obtidas por raspagem dos constituintes (fibra e resina) da camada superficial dos provetes, sendo portanto os resultados referentes à fase exterior destes materiais.

Nas Figuras Figura 4-12 a Figura 4-18 são ilustrados os espectros de FTIR obtidos para a fibra acrílica utilizada na fabricação dos varões e para os compósitos constituídos por esta fibra e as resinas tipos 1 e 2 com e sem degradação.

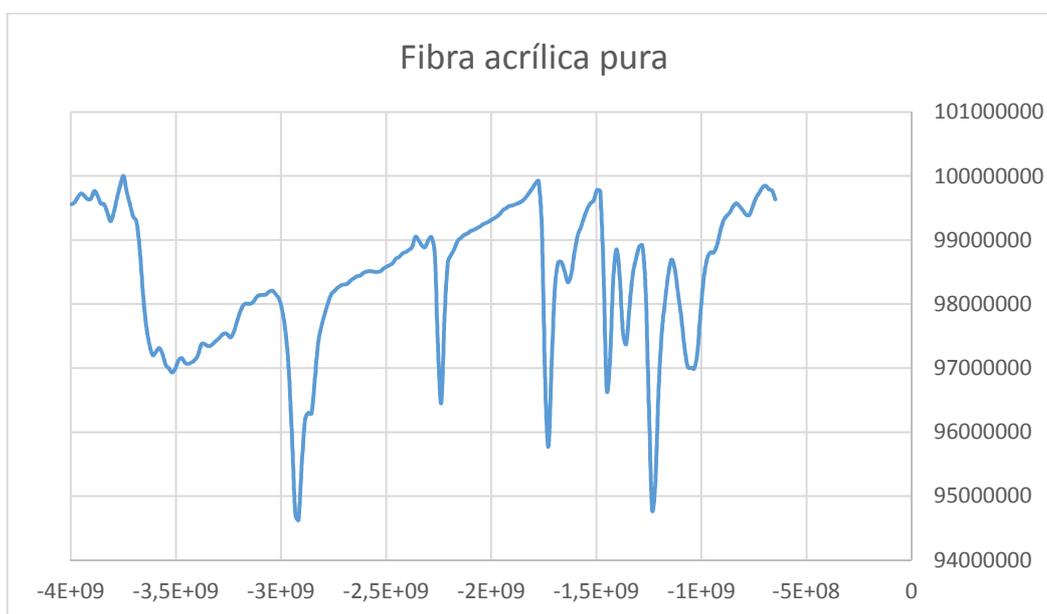


Figura 4-12 - Fibra acrílico isolada.

No espectro da fibra de acrílico isolada, pode-se identificar as bandas de absorção correspondentes ao acrilonitrilo puro. O grupo característico deste nitrilo ($C\equiv N$) aparece bastante evidente na frequência de 2.240 cm^{-1} . Igualmente acentuados são os picos de 2.920 cm^{-1} e 1.450 cm^{-1} correspondentes ao CH_2 e a banda que aparece na frequência 1.730 cm^{-1} que corresponde ao grupo $=C=O$ copolímeros de ésteres. A Tabela 4-12 abaixo exhibe as interpretações para grupos encontrados no espectro da fibra pura.



Tabela 4-12 - Interpretações para grupos encontrados no espectro da fibra acrílica.

Frequência (cm ⁻¹)	Grupo	Composto
3.500	O–H	-
2.920	CH ₂	Acrilonitrilo
2.240	–C≡N	Acrilonitrilo
1.730	=C=O	Acetato de vinila
1.450	CH ₂	Acrilonitrilo
1.360	CH ₃	Acetato de vinila acrilonitrilo
1.230	CH	Acetato de vinila acrilonitrilo
1.040	≡C–C≡N	Acrilonitrilo

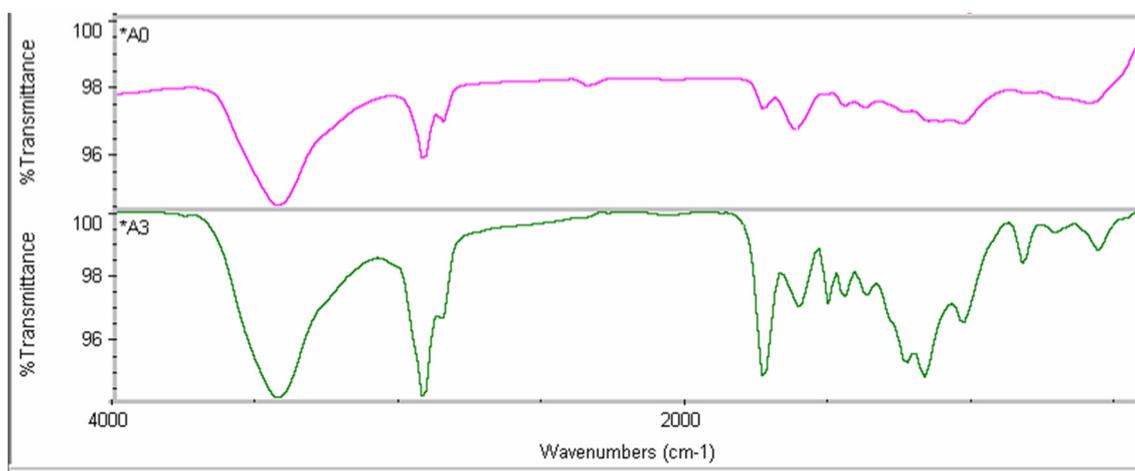


Figura 4-13 - Amostras: acrílico + resina tipo 1 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.

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 –C≡N na frequência de 2.240 cm⁻¹.

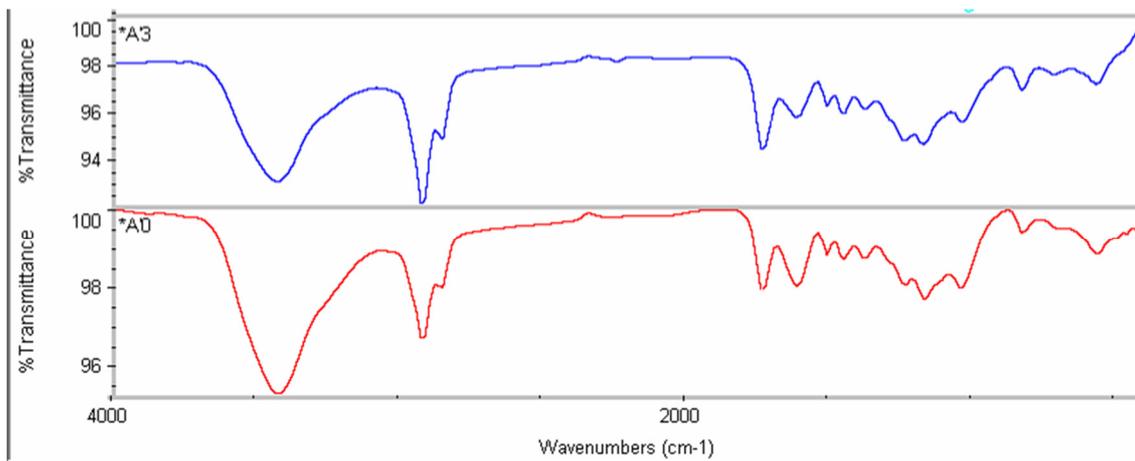


Figura 4-14 - Amostras: acrílico + resina tipo 2 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.

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 $=\text{C}=\text{O}$ (acetato de vinila), respectivamente. Mantendo-se inalterável os valores dos picos encontrados para os demais compostos.

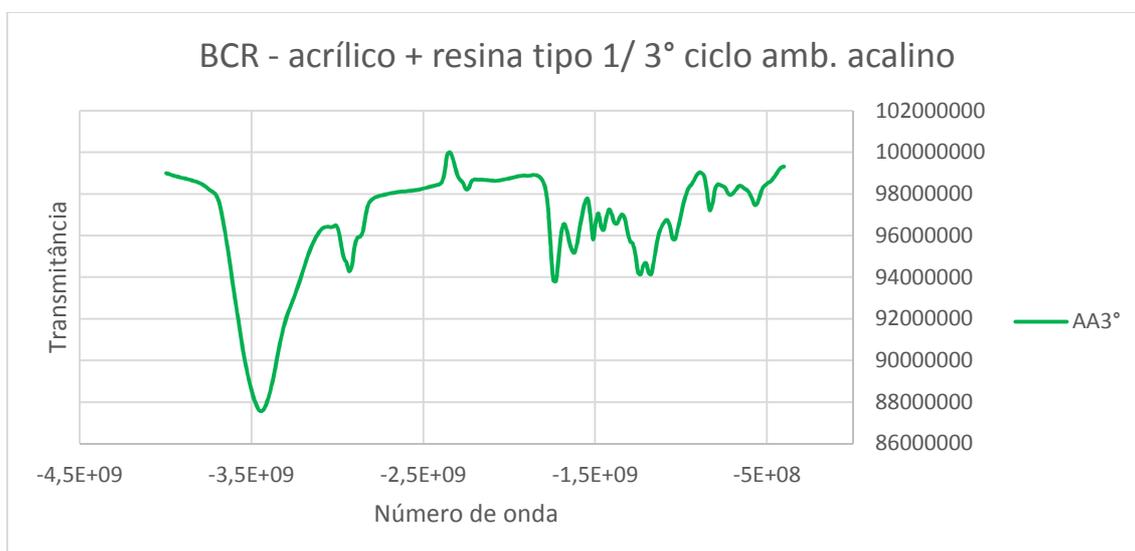


Figura 4-15 - Amostra: acrílico + resina tipo 1 exposto ao ambiente alcalino.

Relativamente as amostras compostas por fibra de acrílico e resina tipo 1 (Figura 4-15), 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.

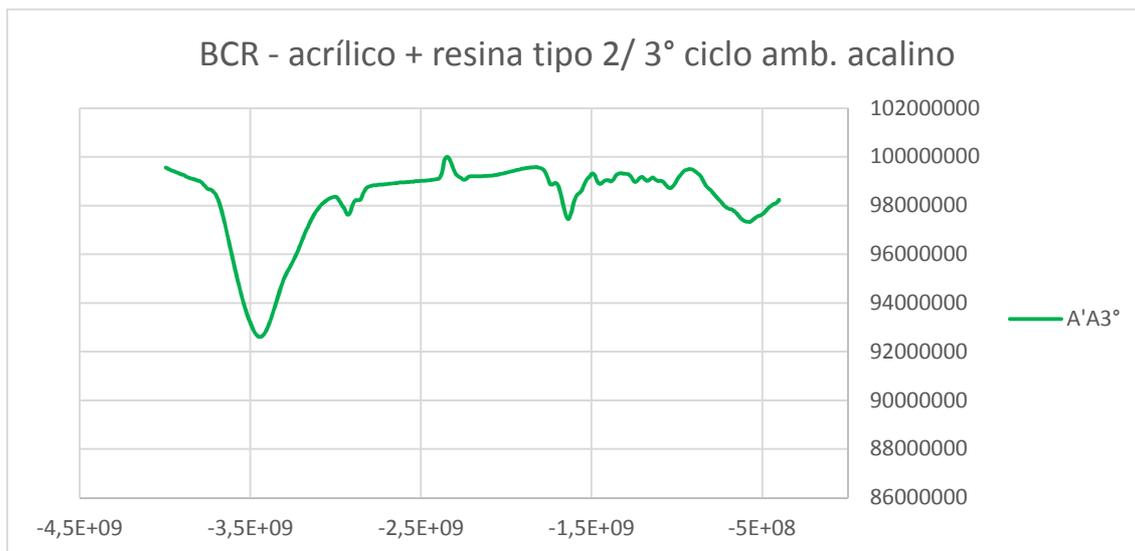


Figura 4-16 - Amostra: acrílico + resina tipo 2 exposto ao ambiente alcalino.

As amostras compostas por fibra de acrílico embebida em resina tipo 2 (Figura 4-16) 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.



Figura 4-17 - Amostra: acrílico + resina tipo 1 exposto ao ambiente de cloretos.

Na análise comparativa entre as amostras constituídas por acrílico e resina tipo 1 (Figura 4-17) 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 reaparição do grupo $\text{-C}\equiv\text{N}$ correspondente a frequência de absorção de 2.240 cm^{-1} .



Figura 4-18 - Amostra: acrílico + resina tipo 2 exposta ao ambiente de cloretos.

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 (Figura 4-18) obtiveram picos mais evidenciados para todas 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.

No que se refere a composição química da fibra de poliéster (Figura 4-19), pode ser observada a banda de absorção referente à vibração de estiramento simétrico de ligações C-H ($2.850\text{--}3.000\text{ cm}^{-1}$) e bandas típicas oriundas de uma variedade de ligações do grupo hidroxila, grupo OH ($3.200\text{--}3.650\text{ cm}^{-1}$) a partir de seus picos característicos, demonstrados na Figura 4-19.

De acordo com Edge *et al.* (1996), as terminações das cadeias das fibras consistem principalmente de grupos ácidos carboxílicos (grupo OH ligado à carbonila) e ésteres hidroxílicos (grupo OH ligado à cadeia alifática, o grupo etileno), sendo que esses grupos contribuem para a vibração correspondente aos grupos OH em torno de 3430 cm^{-1} .



Em aproximadamente $1.090\text{--}1.150\text{ cm}^{-1}$, a banda associada ao modo de vibração de estiramento de ligações C–O. A absorção em torno de 1.730 cm^{-1} foi atribuída a vibrações do grupo carbonila de éster. Esta banda, por vezes, pode apresentar-se alargada, e três bandas podem ser vistas, como relatado por Edge *et al.* (1996).

Bandas em 1.090 e 1.240 cm^{-1} , têm associação ao grupo tereftalato ($\text{OOC-C}_6\text{H}_4\text{-COO}$). A absorção em torno de 710 cm^{-1} foi atribuída à interação de grupos éster polar e anéis de benzeno, característica do espectro do PET.

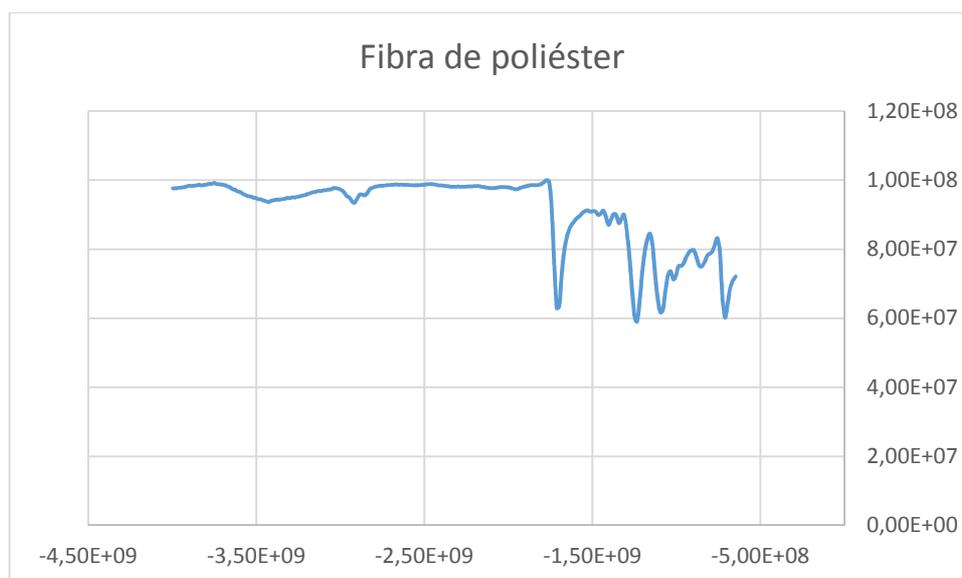


Figura 4-19 - FTIR - Fibra de poliéster isolada

Na Tabela 4-13 estão referenciadas as absorções na região do infravermelho mais comumente identificadas para o poli(tereftalato de etileno).

Tabela 4-13 - Interpretações para grupos encontrados no espectro da fibra poliéster.

Frequência (cm^{-1})	Atribuição
3.200-3.600	Estiramento dos grupos hidroperóxidos e –OH
2.850-3.000	Estiramento simétrico de CH
1.700 >	Grupos carboxílicos insaturados
1.465-1.340, 1.320-1.238	Estiramento do grupo C-O deformação do grupo O-H
1.340	Deformação Angular tipo flexão de CH_2
795-845, 1.800-2.000	Vibrações de dois hidrogênios aromáticos adjacentes em compostos p-substituídos

Abaixo (Figuras Figura 4-20 à Figura 4-25) estão mostrados os espectros obtidos a partir dos ensaios dos provetes constituídos pelo poliéster e pelas resinas tipos 1 e 2 em suas matrizes.

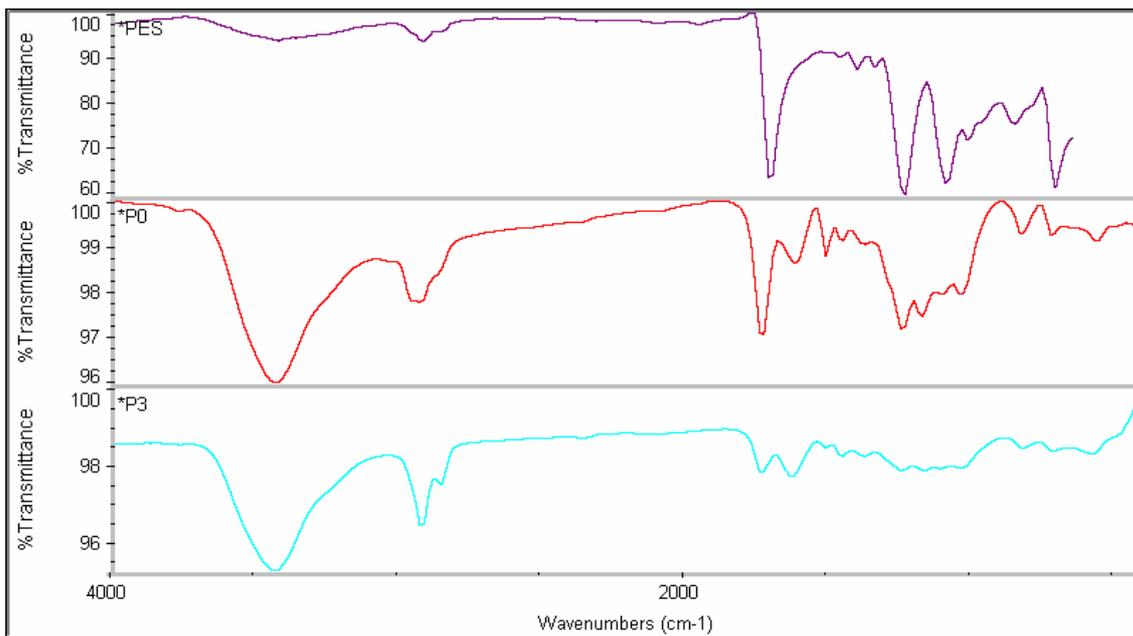


Figura 4-20 - Amostras: poliéster + resina tipo 1 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.

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 $-\text{OH}$, 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.

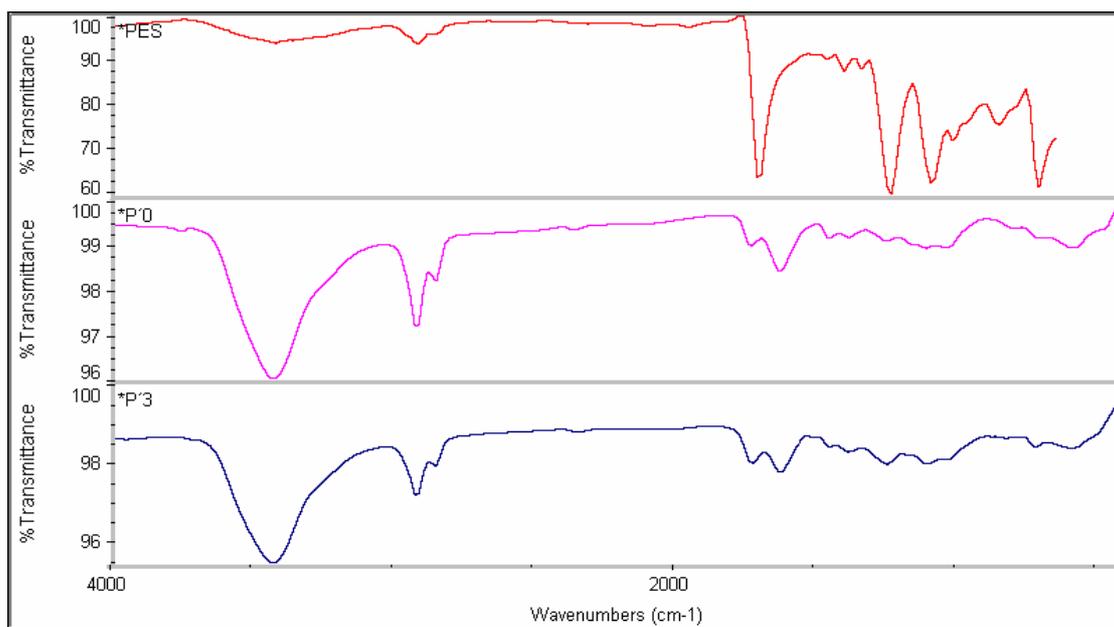


Figura 4-21 - Amostras: poliéster + resina tipo 2 sem degradação e com 80 dias de acondicionado em QUV.



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.

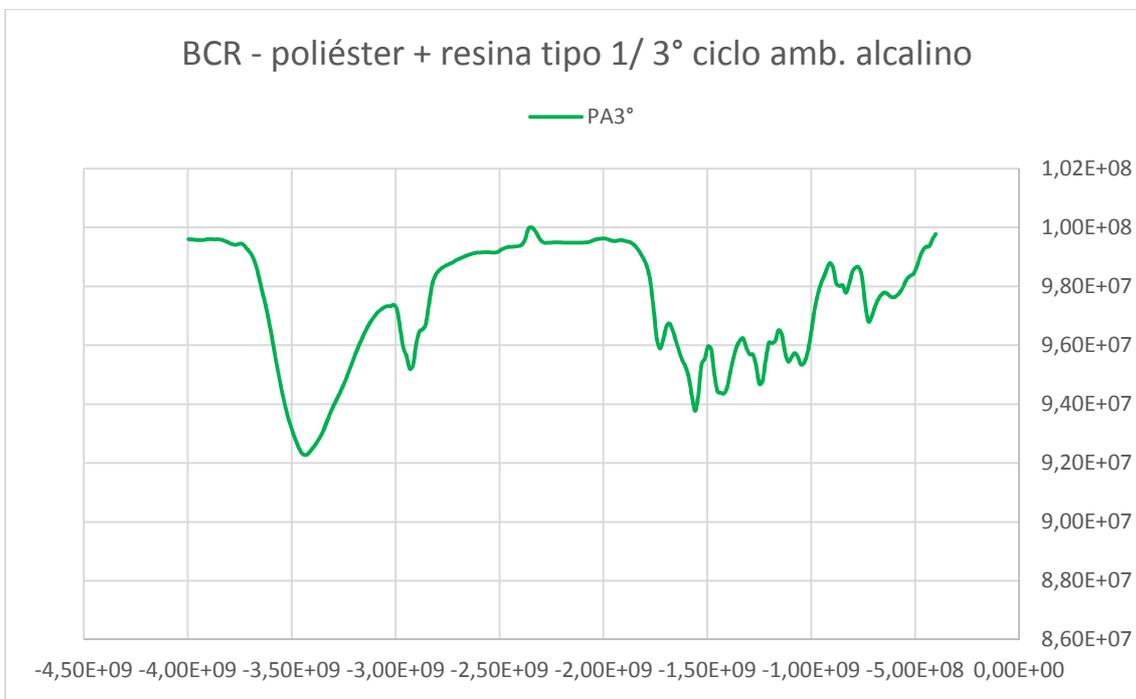


Figura 4-22 - Amostra: poliéster + resina tipo 1 exposto ao ambiente alcalino.

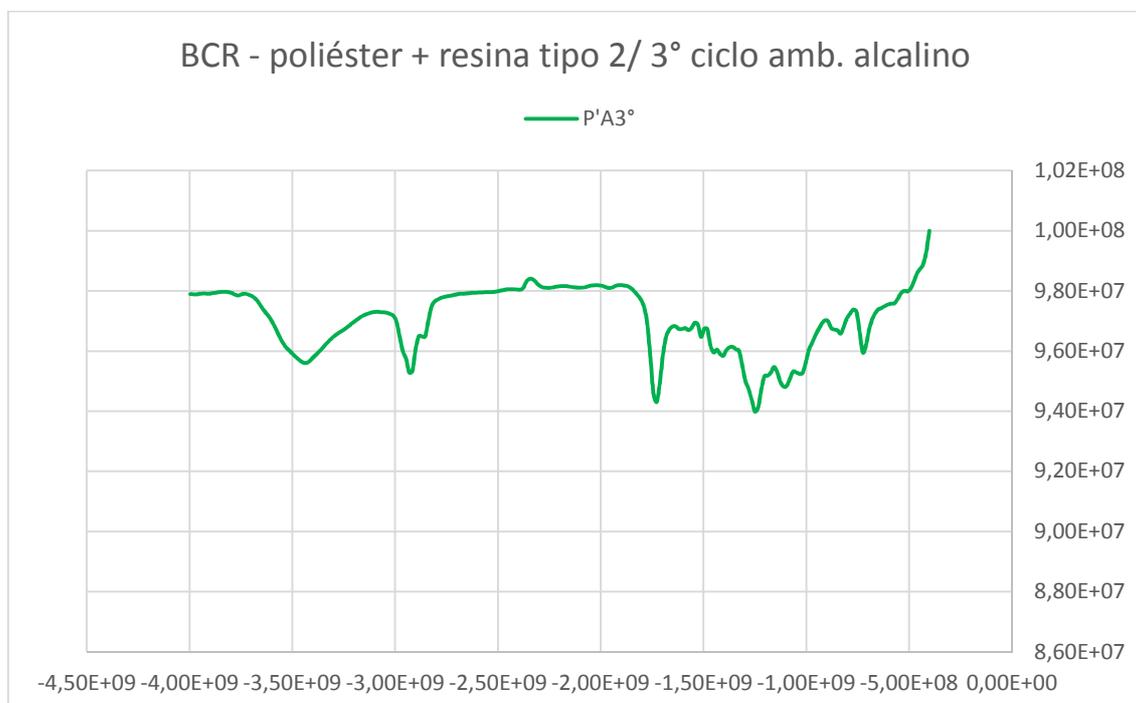


Figura 4-23 - Amostra: poliéster + resina tipo 2 exposto ao ambiente alcalino.



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 $-\text{OH}$ e um aumento dos grupos carboxílicos insaturados nos provetes constituídos pela resina 1.

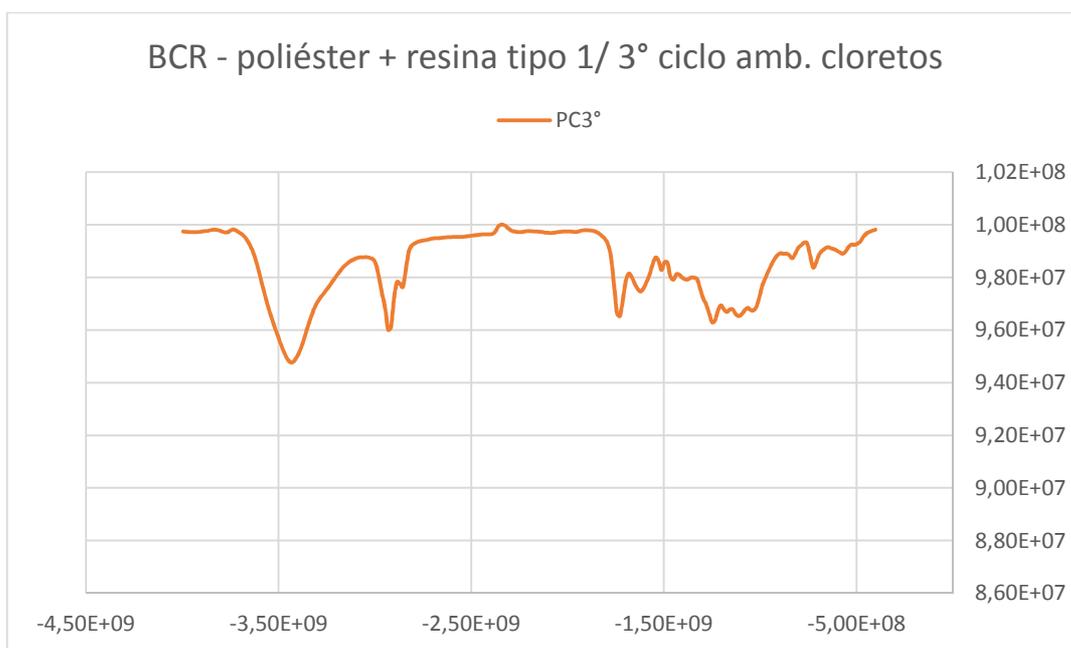


Figura 4-24 - Amostra: poliéster + resina tipo 1 exposta (80 dias) ao ambiente de cloretos.

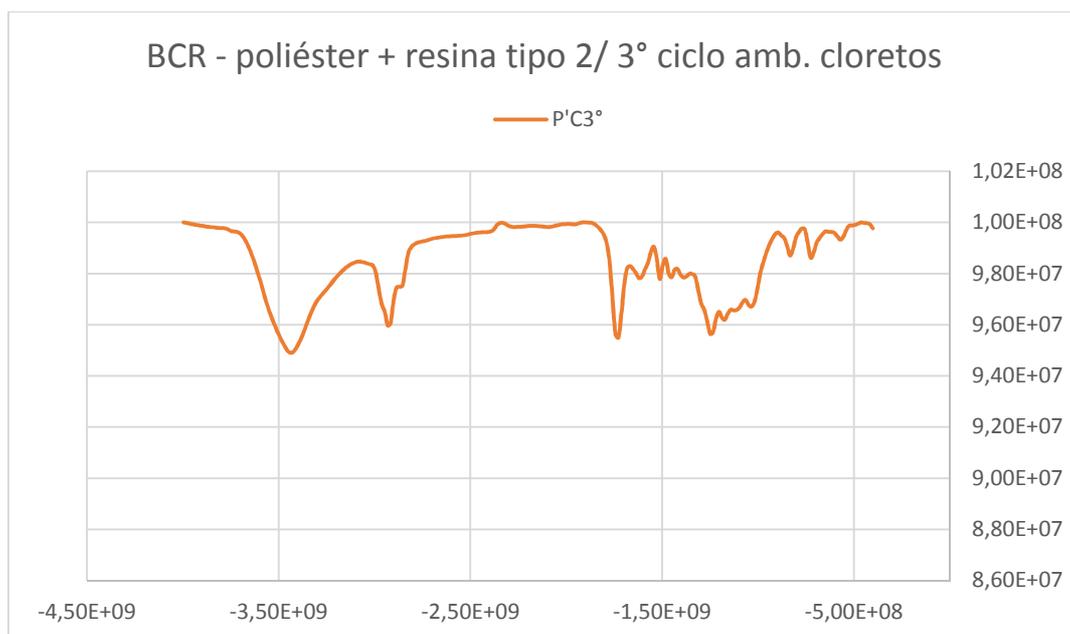


Figura 4-25 - Amostra: poliéster + resina tipo 2 exposta (80 dias) ao ambiente de cloretos.



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 4-14 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 4-14 - 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

Neste contexto, observa-se uma concordância desta avaliação em relação a variação e valor dos módulos de elasticidade das amostras, visto que os provetes constituídos por poliéster como fibra de revestimento possuem elevado módulo de elasticidade e reduzida variação destes valores. Por outro lado, verifica-se que a amostra “Acrílico + Resina tipo 1” apresenta maior variação em seus compostos químicos e apesar disso, possuir maior valor de tensão de ruptura (ver Tabela 4-3).

4.4 VARIAÇÃO DE MASSA

Foi registrada a variação da massa da totalidade dos provetes entre o momento da sua introdução nos ambientes de exposição e o instante da sua saída, de modo a comparar estes resultados com os obtidos para os provetes de controle não expostos a condições agressivas.

Nesta seção, apresenta-se dois tipos de análise, primeiramente buscou-se identificar o comportamento dos varões para cada conjunto de material empregado em



relação a variação de massa, conforme mostrado nas Figuras Figura 4-26 e Figura 4-27. Seguidamente, foi avaliado o percentual da variação de cada amostra para cada um dos ambientes agressivos. Ressalta-se o fato da escala vertical dos gráficos da primeira análise ser diferente.

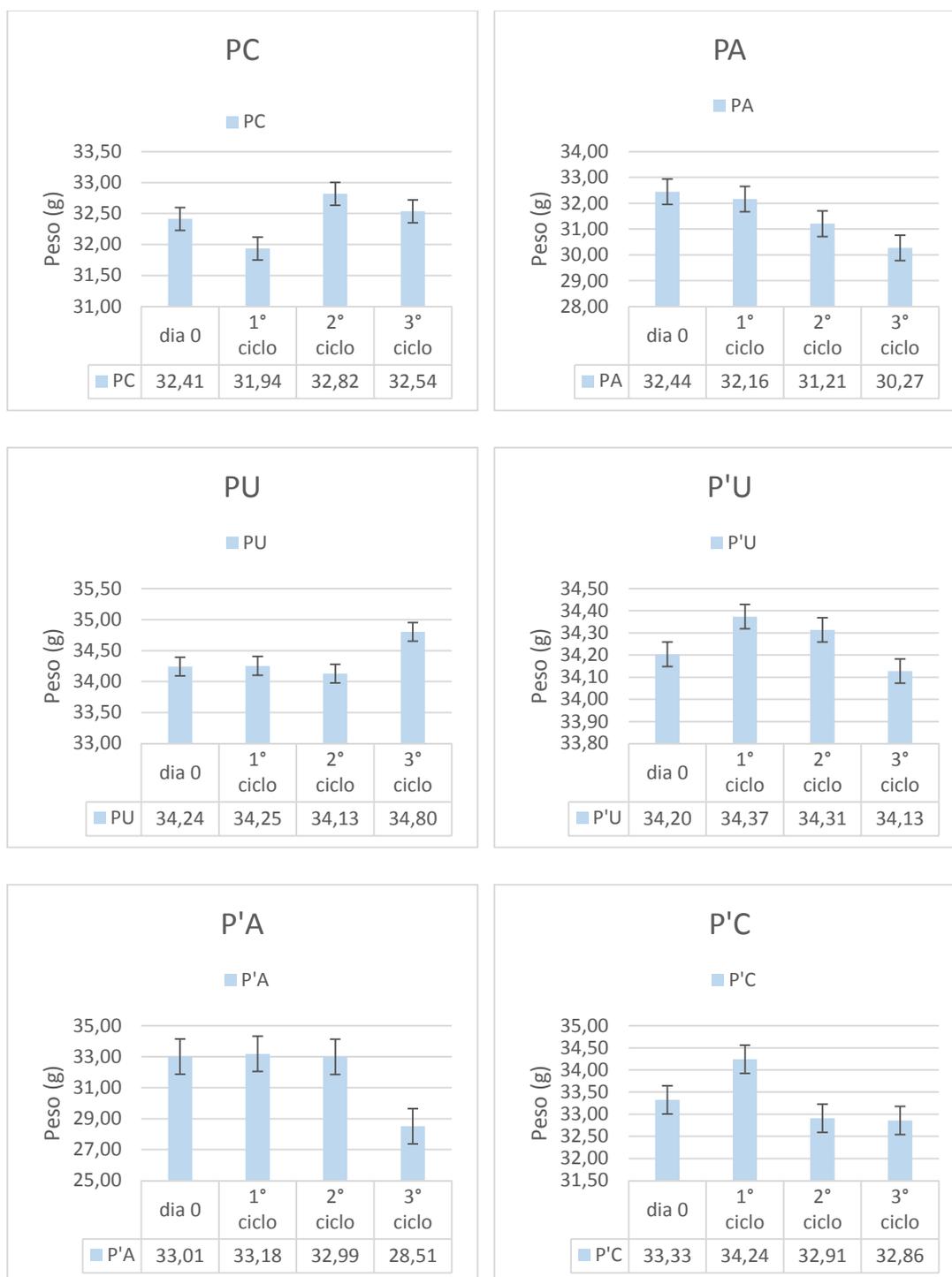


Figura 4-26 - Variação de massa das amostras de poliéster expostos aos ambientes agressivos.

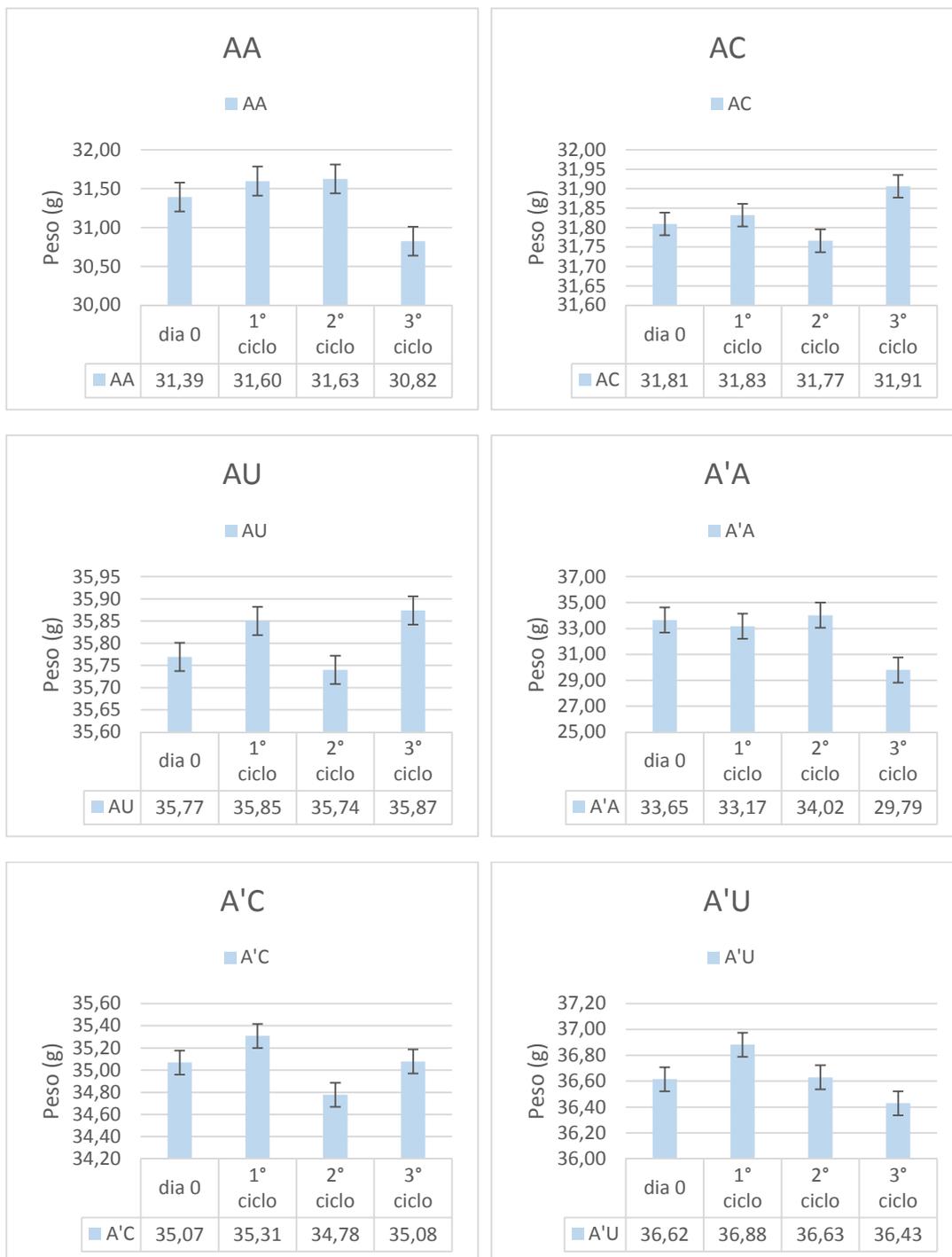


Figura 4-27 - Variação de massa das amostras de acrílico expostas aos ambientes agressivos.



A partir da verificação dos gráficos, é possível fazer algumas considerações a respeito do comportamento das amostras em relação a variabilidade de massa:

- 1) 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;

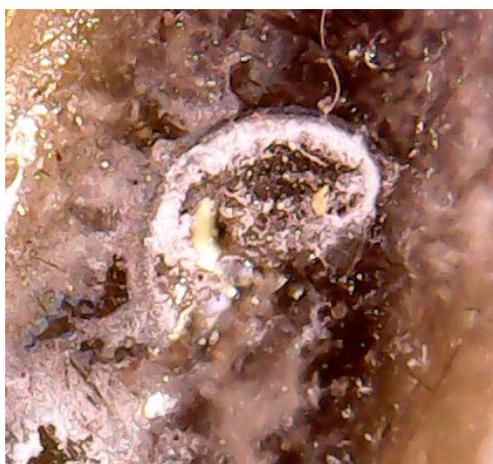


Figura 4-28 - Perda de material da camada externa.

- 2) Pode-se perceber que todas as amostras que possuíam a resina tipo 2 como componente da matriz, tiveram a diminuir de peso ao longo do tempo. Ao passo que os varões impregnados com a resina do tipo 1 obtiveram propensão a, mesmo que em percentuais reduzidos, ganharem massa ao longo dos ciclos, a exceção ficou por parte com exceção dos provetes que foram submetidos a ambiente alcalino, em que houve dissociação de material da matriz. Isto decorre pela maior vulnerabilidade da resina do tipo 2 em relação ao ataque de cloretos quando comparado com as amostras do tipo 1 submetidas as mesmas condições.

Nos gráficos seguintes (Figura 4-29 à Figura 4-31), 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).

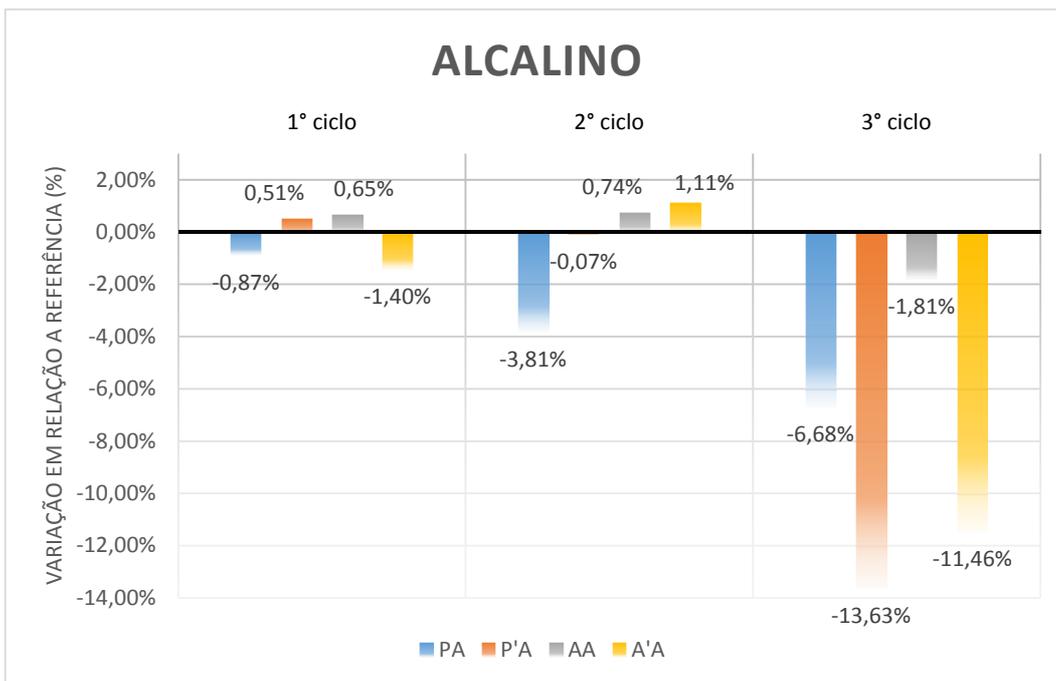


Figura 4-29 - Perda de massa por degradação em ambiente alcalino.

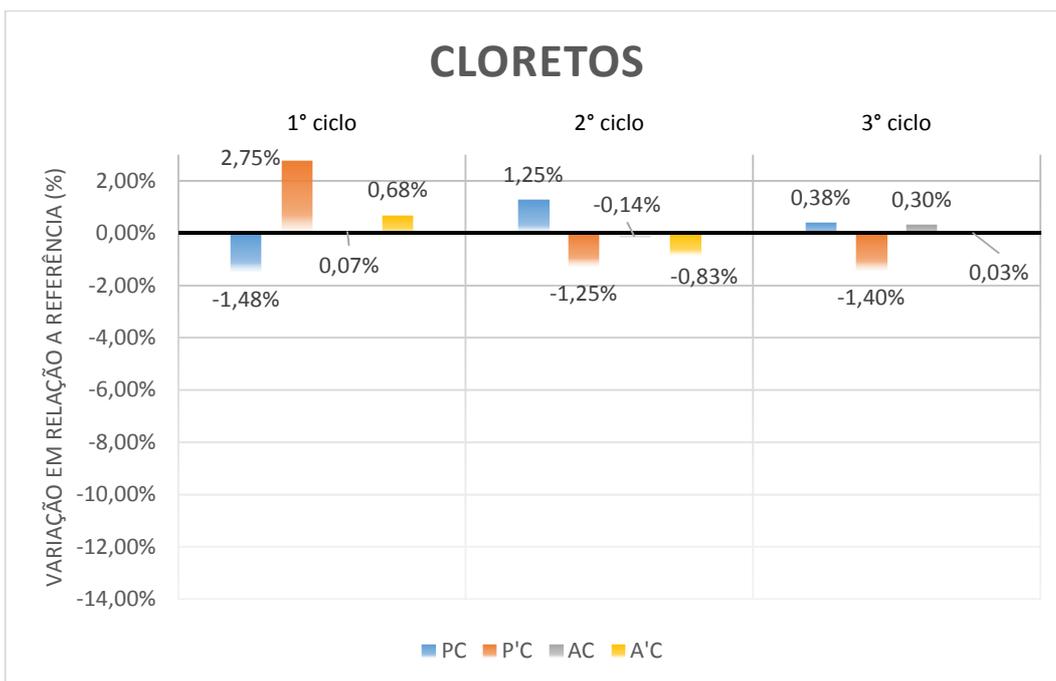


Figura 4-30 - Perda de massa por degradação em ambiente de cloretos.

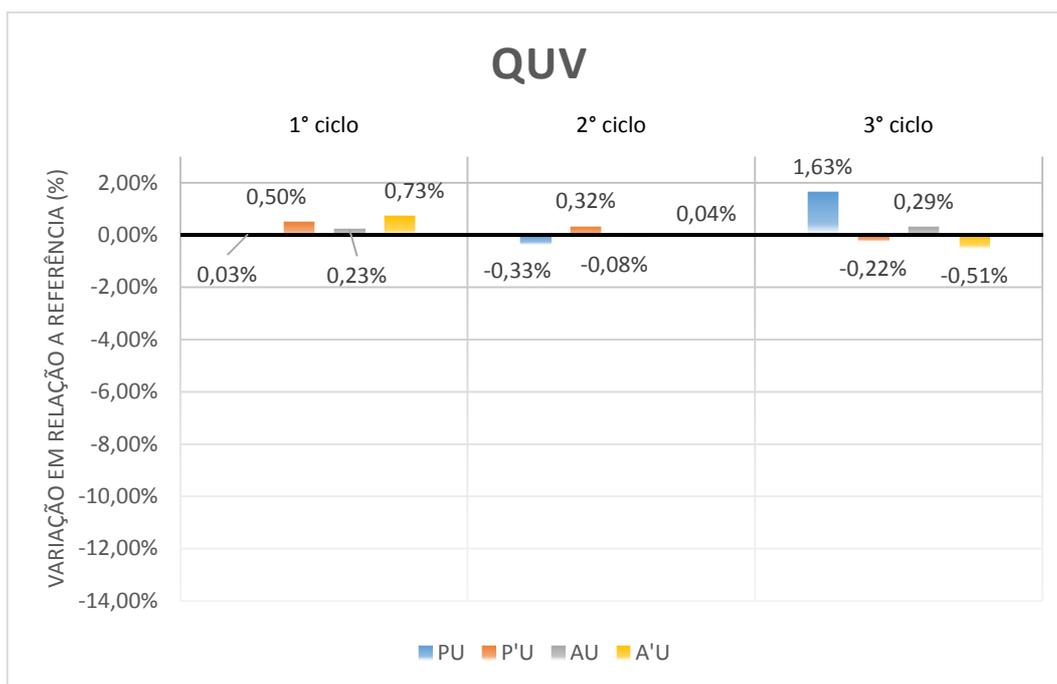


Figura 4-31 - Perda de massa por degradação ao ambiente de condensação e raios UV.

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, conforme mostrado no item 3.3.3 do capítulo relativo a metodologia do trabalho. Pois, de acordo com Cromwell et al. (2011), citados no item 2.4.1, 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).

Em contrapartida, a elevada variação (redução, principalmente) dos valores de massa dos provetes expostos a alta alcalinidade se deu pela degradação e perda significativa de materiais da camada externa, especialmente no terceiro ciclo (Figura 4-28). Deste fato decorre a conclusão que a partir deste ponto as fibras ficarão expostas e passivas ao ataque dos agentes agressivos do ambiente em questão.



A partir destes gráficos, destaca-se a Tabela 4-15 na qual é possível observar a classificação das amostras pela variação de massa e concluir, por meio desta, que a amostra composta por fibra de acrílico e resina tipo 1 é a que apresenta menor variação de massa ao longo dos ciclos, podendo ser um fator importante para fundamentar sua elevada resistência a tração e baixa variabilidade deste valor.

Tabela 4-15 - Classificação das amostras quanto à variação de massa.

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



4.5 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 Figura 4-32 à Figura 4-35).

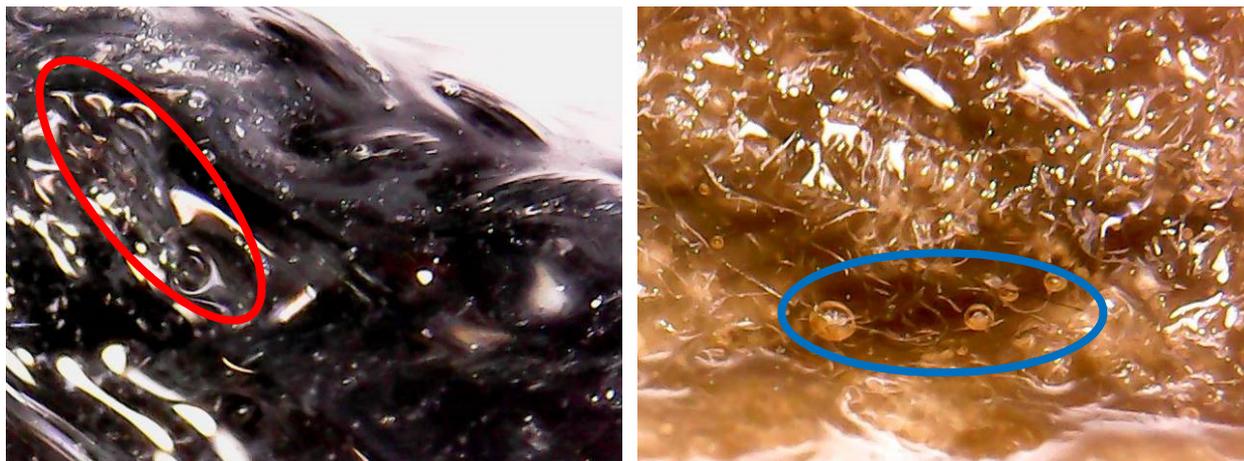


Figura 4-32 – Verificação microscópica de provetes de referência não degradados (poliéster / acrílico) – Ampliação: 300 vezes.

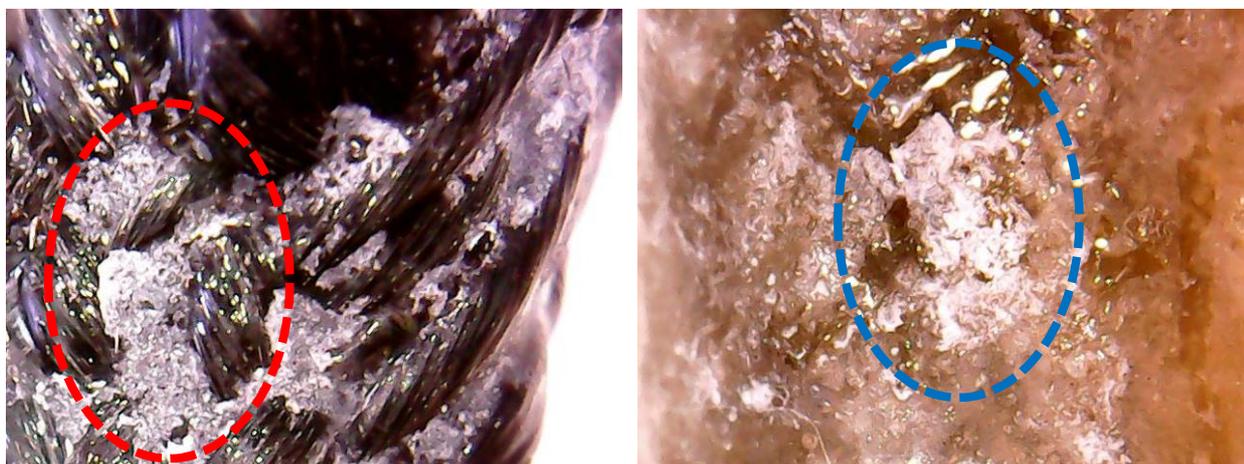


Figura 4-33 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 60 dias de degradação (ambientes alcalino/cloretos) – Ampliação: 300 vezes.

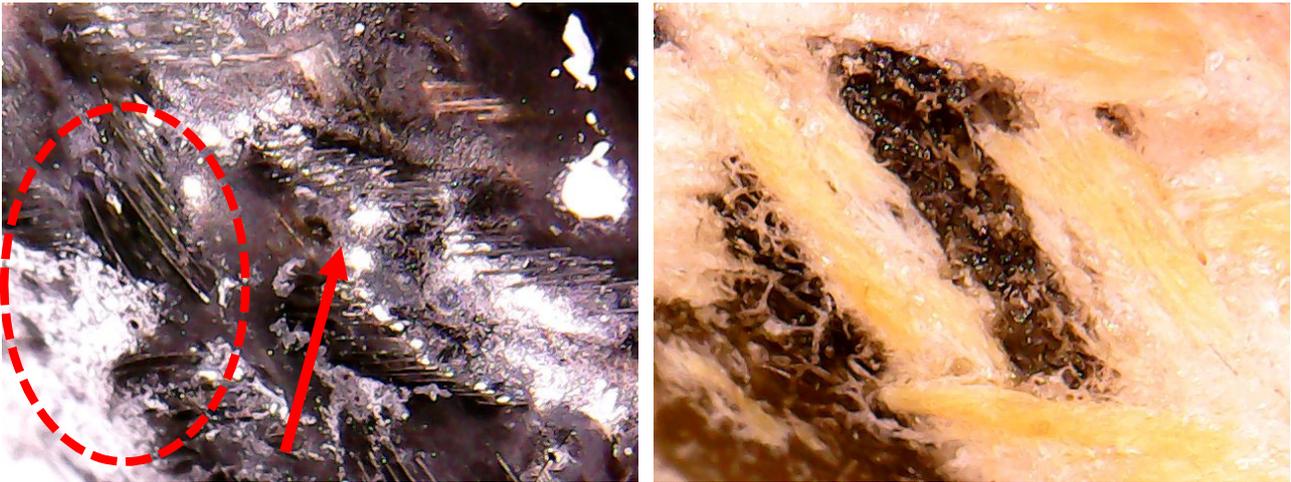


Figura 4-34 - Verificação microscópica de provetes (poliéster / acrílico) expostos a 80 dias de degradação (ambientes alcalino/cloretos) – Ampliação: 300 vezes.



Figura 4-35 - 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 4-32, 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. Entre as manifestações patológicas encontradas, pode-se citar as microfissuras, desfiamento e abertura de orifícios em decorrência dos poros encontrados nos provetes de controle (Figura 4-33).

No terceiro ciclo, as degradações identificadas foram mais significativas, entre as quais pode-se citar o destacamento da camada superficial e exposição do reforço (Figura 4-34).

De maneira qualitativa, é desenvolvida a Tabela 4-16 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 4-16 - Classificação das amostras quanto ao desgaste observado.

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

Estes resultados apresentam-se em consonância com os valores da resistência a tração e com a variação de peso. Visto que as amostras contendo fibras de acrílico na camada externa possui menor variabilidade de massa e maior valor de tensão de ruptura máxima.



4.6 ANÁLISE COMPARATIVA

Ao fim das análises individuais é apresentada a Tabela 4-17 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 4-17 - Somatório das classificações das amostras para os ensaios investigados.

Classificação das amostras				
Amostra Ambiente	ALCALINO	CLORETOS	QUV	Σ
Acrílico + Resina tipo 1	22	18	9	49
Acrílico + Resina tipo 2	17	20	11	48
Poliéster + Resina tipo 1	16	21	7	44
Poliéster + Resina tipo 2	15	11	13	39

Portanto, ao analisar a Tabela 4-17 conclui-se que, entre 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.



4.7 EQUIVALÊNCIA DO PERÍODO DE ENSAIO

A base para a previsão proposta será o modelo de Arrhenius simplificado e adaptado por Chen *et al.* (2006).

O método de Arrhenius é baseado em uma relação entre a velocidade da reação e a temperatura, por isso é geralmente utilizado para materiais que degradam e quebram como resultado de um processo químico (Nelson, 1971).

A equação para a velocidade de reação é:

$$k = Ae^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)}$$

Onde k = é a taxa de degradação (1/tempo); A = constante do material e processo de degradação; E_a = Energia de ativação; R = constante universal do gás e T = temperatura (Kelvin). O cálculo da previsão do tempo de vida do material pode ser feito a partir da equação de Arrhenius. A vida útil de um material com relação a uma determinada propriedade de interesse é assumida ser inversamente proporcional à velocidade da reação química. Desta consideração é possível obter uma equação que é baseada diretamente da equação acima, através da aplicação de $\log 10$ em ambos os termos da equação (Machado, et al., 1996).

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A} e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)}$$

$$\ln\left(\frac{1}{k}\right) = \frac{E_a}{RT} - \ln(A)$$

Afirma-se, portanto, que a taxa de degradação k pode ser expressa pelo inverso do tempo necessário para as propriedades de um material chegar a determinado valor. Ainda pode-se observar que o logaritmo natural do tempo necessário para a propriedade de material alcançar um determinado valor é linearmente proporcional a $1/T$ e a inclinação de E_a/R .

Primeiramente, deve-se relacionar a força de tração de retenção (relação entre a força residual e a força original de tração) dos varões estudadas e o tempo de exposição dos testes acelerados:



$$Y = 100 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Em que Y = força de tração de retenção (%); t = tempo de exposição e $\tau = 1/k$. A forma desta equação foi modificada de um estudo de Phani e Bose (1987) assumindo que os varões são completamente degradados em um período infinito de tempo.

Em seguida, procede-se com o cálculo do fator de aceleração (AF).

$$AF = \frac{t_0}{t_1} = \frac{c/k_0}{c/k_1} = \frac{k_1}{k_0} = \frac{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_1}\right)}{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_0}\right)} = \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right]$$

Onde AF = fator de aceleração; t_1 e t_0 = tempo requerido para alguma propriedade alcançar um determinado valor nas temperaturas T_1 e T_2 respectivamente; c = constante e k_1 e k_0 = taxas de degradação.

Uma vez achado o AF, deve-se multiplica-lo pelos tempos de exposição

Para ambos os ambientes, foram utilizados como valores para encontrar a força de tração de retenção, o valor médio máximo dos provetes de referência e um valor representativamente abaixo desde número, visto que alguns valores máximos dos provetes expostos no período de 30 dias ocorreram de ser maiores que os não degradados. Em relação ao terceiro ciclo, o valor utilizado para o cálculo do fator de aceleração foi o valor que representa a menor força de tração para cada ambiente.

Deste modo, obteve-se $1/k_0 = 29884,29/\text{dia}$; $1/k_1 = 284,66/\text{dia}$ para o ambiente alcalino e $1/k_1 = 626,37/\text{dia}$.

$$AF_{\text{alcalino}} = \frac{t_0}{t_1} = \frac{c/k_0}{c/k_1} = \frac{k_1}{k_0} = \frac{29884,29}{284,66} = 105,0$$

$$AF_{\text{cloretos}} = \frac{t_0}{t_1} = \frac{c/k_0}{c/k_1} = \frac{k_1}{k_0} = \frac{29884,29}{626,37} = 47,7$$

E finalmente, $AF_{\text{alcalino}} \approx 105,0$ e $AF_{\text{cloretos}} = 47,7$.

Multiplicando esses valores pelos tempos máximos que os provetes ficaram submetidos as condições agressivas temos as seguintes correspondências:



$$\textit{Periodo eq. (alcalino)} = 105 \times 80 = 8400 \textit{ dias} = 10,6 \textit{ anos}$$

$$\textit{Periodo eq. (cloretos)} = 47,7 \times 80 = 3817 \textit{ dias} = 10,6 \textit{ anos}$$

10,6 anos para o ensaio de cloretos e 23,3 anos para o ensaio alcalino. Esta diferença deve-se ao fato dos provetes acondicionados em ambiente alcalino estarem submetidos a maior temperatura.



5.º. CAPÍTULO – CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

Após a realização dos ensaios, pôde-se concluir com êxito os objetivos estabelecidos no início do trabalho.

Entre 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 e que ainda foi possível prever a realidade por meio de equivalência às condições obtidas em laboratório.

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. Também observou-se que a resina tipo 1 se sobrepôs no que se refere a sua baixa suscetibilidade na variação de suas propriedades quando comparada com a resina do tipo 2.

A análise efetuada por amostras indicou que a configuração da camada superficial formada por fibra acrílica impregnada com resina tipo 1 é a que apresenta melhores resultados (ver Tabela 4-17), 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.

Este estudo almejou o entendimento da influência da camada externa de varões compósitos entrançados (BCR) na durabilidade face às condições de ambientes agressivos. No entanto, conforme já discutido, sabe-se que a investigação acerca da durabilidade destes materiais deve ser um processo contínuo e abrangente, dados os inúmeros agentes deletérios possíveis e a existência da progressão dos ataques conhecidos ao longo do tempo. Nesse contexto, outros ramos de pesquisa surgem na complementação desta investigação como a avaliação da durabilidade de varões compósitos entrançados de elevado desempenho face ao ataque químico de ácidos, à exposição a ciclos de gelo e degelo. Verificação da influência da fase dispersa, métodos de otimização no processo de fabrico dos BCR, bem como verificação da durabilidade a longo prazo também são vertentes que merecem atenção e contribuem para o conhecimento acerca do BCR.



BIBLIOGRAFIA

- ABNT NBR 6118:2007. Projeto de estruturas de concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", Maio, 2002.
- AHMADI, M. S., et al. An experimental study on mechanical properties of GFRP braid-pultruded composite rods. *Express Polymer Letters*, 3.9: 560-568, 2009.
- ARAÚJO, Mário; CASTRO, E.M. de Melo. "Manual de Engenharia Têxtil". Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986. Vol.I.
- ASHBY, M.F., "Technology of the 1900s: advanced materials and predictive design", *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London*, A322, pp. 393-407, 1987.
- ASTM E632-81, "Standard Practice for Developing Accelerated Test to Aid Prediction of Service Life of Building Components and Materials". Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1982.
- AZEVEDO, D. – "Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP: recomendações para dimensionamento". Porto: FEUP. Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, 2008.
- BAZIN, M. – "Mitos e verdades sobre os compósitos na construção civil". In: *Arquimacom'2002*. São Paulo, 2002.
- BEBER, A. J. – "Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono". Tese (Doutorado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2003.
- CARNEIRO, L. A. V., & TEIXEIRA, A. M. A. J. "Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção". 2008.
- CHEN, Y., DAVALOS, J., AND RAY, I. "Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars Using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests." *J. Compos. Constr.*, (279), 279-286. 2006.
- COELHO, M.; SILVA, L.; SENA-CRUZ, J.M.; BARROS, J. "Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP sob ações monotónicas e de fadiga." *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. 2011.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB-FIP TG 9.3 FRP - "Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer. Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures", Technical Report Bulletin n.14, Lausanne, Switzerland, 138 p., Jul. 2001.



DOLAN C. W. et al. - "Research report for evaluating the durability of bonded CFRP repair/strengthening of concrete beams" Technical data and discussion supporting the draft final report of NCHRP Project 12-73, University of Florida. 2009

EDGE, M.; WILES, R.; ALLE, N.S.; MCDONALD, W.A.; MOTTOCK, S.V. "Characterization of the species responsible for yellowing in melt degraded aromatic". *Polymer Degradation and Stability*, v.53, p.141-151, 1996.

EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M., THOMAS, J. - "Strengthening Concrete Structures, Part I", *Concrete International*, pp. 53-58, Mar. 1998a.

EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M., THOMAS, J. - "Strengthening Concrete Structures, Part II", *Concrete International*, pp. 56-60, Apr. 1998b.

EUROCOMP - "Structural Design of Polymer Composites – Design Code and Handbook, the European Structural Polymeric", Composites Group, Ed. J. L. CLARKE, London, UK, E & FN SPON. 1996.

F. MICELLI, A. NANNI – "Durability of FRP rods for concrete structures, *Construction and Building Materials*", Volume 18, Issue 7, Pages 491-503, September 2004.

FANGUEIRO, R. & PEREIRA, C., "Fibrous materials reinforced composite for internal reinforcement of concrete structures". In: R. Figueiro, ed. *Fibrous and composite materials for civil engineering applications*. Oxford, Cambridge, Philadelphia and New Delhi: Woodhead Publishing Limited, pp. 236-243, 2011.

FIB, *Fib Bulletin* 14. – "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures". *Fédération internationale du béton (fib)*: 138 pp. Lausanne, Switzerland. 2001.

SILVA FILHO, L. S. P.; GARCEZ, M. R. - "Compósitos de engenharia de matriz polimérica. In: Isaia, G. C. (ed.). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*". São Paulo: IBRACON, 1438p, 2007.

FONSECA, S. C., et al. – "Durabilidade de laminados de FRP utilizados para reforço em estruturas de concreto", Universidade do Minho, Guimarães. 2011.

GRACE, N. F., RAGHEB, W. F., ABDEL-SAYED, G. – "Ductile FRP strengthening systems". *Concrete International*, pp.31-36, Jan 2005.

GRACE N. F., SINGH, S. B. - "Durability Evaluation of carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design". *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 1, January-February 2005.

GARCEZ, M.R., MENEGHETTI, L.C., CAETANO, L.F., CAMPAGNOLO, J.L., SILVA FILHO, L.C.P. – "Utilização de fibras de alto desempenho como reforço a flexão em vigas de concreto armado". In: *Congresso Ibero-Americano De Patologia Das Construções*, 3, 2005, Assunção, Paraguai. *Anais...Assunção: Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción" e ALCONPAT*, Vol. II, p VI.65-VI.72, 2005.

GARCEZ, M.R. – "Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras". Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 241 pp, 2007.



GASPAR, P., “Metodologia para cálculo da durabilidade de rebocos exteriores correntes”, Dissertação de Mestrado em Construção, Lisboa, 203 p, Dezembro 2002.

GASPAR, P., BRITO, J. – “Assessment of the overall degradation level of an element based on field data”, 10th Int. Conference on Durability on Building Materials and Components, Lyon, Abril 2005 a), TT8-68.

H. KIM, Y. PARK, Y. YOU, C. MOON - “Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions, Composite Structures, Volume 83, Issue 1, Pages 37-47, Março 2008.

HULL, D. - "An introduction to composite materials", Cambridge University Press, Cambridge, England, 1981.

ISIS DM 4 - "Design Manual 4 - Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers", Winnipeg, Canada, 2001.

ISO 13823:2008. General principles on risk assessment for systems involving structures. International Organisation for Standardisation.

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.

LEES, J.M., BURGOYNE C.J. - "Transfer Bond Stresses Generated between FRP Tendons and Concrete", Magazine of Concrete Research, v. 51, no. 4, pp. 229-239. ISSN 0024-9831, Agosto 1999c.

LEES, J.M., BURGOYNE C.J. - "Experimental Study of the Influence of Bond on the Flexural Behaviour of Concrete Beams Pre-tensioned with AFRPs", ACI Structural Journal, v. 96, no. 3., pp. 377-385. ISSN 0889-3241, Maio/Junho 1999b.

LEES, J.M., BURGOYNE, C.J. - "Design Guidelines for Concrete Beams Prestressed with Partially-Bonded FRP Tendons", Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-4). SP-188, Editors: C.W. Dolan, S.H. Rizkalla and A. Nanni, American Concrete Institute International, SP-188-69, pp.807-816, 1999a.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. - “Caracterização de Polímeros – Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica”. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, p. 217-307, 2001.

MACHADO, L. D. B., CHIERICE, G. O., MATOS, J. R. – “Anais da Associação Brasileira de Química, Vol. 45:4, pp. 191-196, 1996.

MANUEL A.G. SILVA, B. SENA DA FONSECA, HUGO BISCAIA – “On estimates of durability of FRP based on accelerated tests, Composite Structures”, Volume 116, Pages 377-387, ISSN 0263-8223, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.022>, Setembro–Outubro 2014.



- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. – “Concreto: microestrutura, propriedades e materiais”. São Paulo: Ibracon, p. 674, 2008.
- MEIER, U.; KAISER, H.P. - "Strengthening of structures with CFRP laminates", Proc. ASCE Speciality Conf. on Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures, New York pp. 224-232, 1991.
- MEIER, U. - "Repair using advanced composites", International Conference of Composite Construction - Conventional and Innovative, IABSE, Innsbruck, Austria, pp. 113-124, Setembro 1997.
- MOREIRA, A. M. - “Materiais Compósitos”, Apostila, Materiais de Construção I, Escola Superior de Tecnologia de Tomar, 2009.
- NANNI, A. – “Composites: Coming on Strong. Concrete Construction”, Miami, v.44, n. 3, p.120, Jul-Ago. 1999.
- NANNI, A.; ALKHSDAJI, T.; CHEN, G.; BARKER, M.; XIBAO, Y.; MAYO, R. – “Overview of Testing to Failure Program Of a Highway Bridge Strengthened with FRP Composites”. In: International Symposium On Frp For Reinforcement Of Concrete Structures, 4., Baltimore. Proceedings...Selected Presentation. p. 69-80, 1999.
- NANNI, A. – “Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement”. Concrete International, Detroit, ACI, v.17, n.6, p. 22-26, Jun. 1995.
- NANNI, A. – “CFRP strengthening. New technology becomes mainstream”. Concrete International, Detroit, ACI, v.19, n.6, p. 19-23, Jun. 1997.
- NELSON, W. - “Analysis of Accelerated Life Test Data – Part I: The Arrhenius Model and Graphical Methods”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-6, pp. 165-181, 1971.
- NOGUEIRA, C. L. et al. – “Processo de obtenção de pré-impregnados poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente”. Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos/SP, v.9, p. 18-27, 1999.
- PEREIRA, C. G., FANGUEIRO R., JALALI S., ARAÚJO, M. e MARQUES, P. P. - “Varões Compósitos Entrançados para Reforço do Betão”. Acta de Conferencia, Encontro Nacional BE2008, UM, 2008.
- PHANI, Kalyan Kumar; BOSE, Nripati Ranjan. - “Temperature dependence of hydrothermal ageing of CSM-laminate during water immersion”. Composites science and technology, v. 29, n. 2, p. 79-87, 1987.
- PINTO A. F. S. – “Construção de uma base de dados de apoio à estimativa da vida útil das construções”. Dissertação de Mestrado. FEUP, Porto.
- RIPPER, T., SCHERER, J. - “Avaliação do Desempenho de Plásticos Armados com Folhas Unidirecionais de Fibras de Carbono como Elemento de Reforço de Vigas de Betão Armado”. 41º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, Brasil, 1999.
- SENA CRUZ JM, BARROS JAO. 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.

TALY, N. - "Design of modern highway bridges", editado por Narenda Taly, Department of Civil Engineering, California State University, McGraw-Hill, ISBN 0070629978, EUA, 1352pp, 1998.

VENTURA, Ana Mafalda F.M. – "Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas". C.Tecn. Mat., Lisboa, v. 21, n. 3-4, jul. 2009.

WEATHERHEAD, R. G. - FRP Technology – Fibre Reinforced Resin Systems, London, UK, Applied Science Publishers Ltd, 1980.





6º. CAPÍTULO - ANEXOS

Biresin® CR144**Composite resin system for heat curing****Product Description**

Biresin® CR144 is a three component, anhydride cured, low viscosity epoxy resin system suitable for the production of high performance fibre reinforced composites.

Application Areas

Biresin® CR144 system is particularly suited to the filament winding and pultrusion processes due to its low viscosity, good fibre wetting capabilities and very long potlife.

Features / Advantages

- The reactivity of the system can be adjusted by modifying the level of the accelerator (C) Biresin® CA144
- Fast infiltration of dry fibres due to good wetting characteristics, low mixed viscosity and an elevated processing temperature
- An excellent combination of high Tg (150°C) and elongation to break (>5%)
- Approved by Germanischer Lloyd f- Certificate No. WP 1520029 HH (attached)

Physical Data		Resin (A)	Hardener (B)	Accelerator (C)
Individual Components		Biresin® CR144	Biresin® CH141	Biresin® CA144
Mixing Ratio, parts by	Weight	100	90	1 - 4
Mixing Ratio, parts by	Volume	100	87	1.1 - 4.5
Colour		translucent	transparent	amber
Viscosity, 25°C	mPas	~10,500	~40	~2
Density, 25°C	g/ml	1.16	1.20	1.03
		Mixture		
Potlife, 100 g / RT, approx. values	h	> 24		
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPa.s	800		

Typical Mechanical Properties of Cured Neat Resin, after 3 hr / 80°C + 3 hr / 120°C + 3 hr / 140°C

Biresin® CR144 resin (A)		with Biresin® CH141 hardener (B) and Biresin® CA144 accelerator (C)	
Tensile strength	ISO 527	MPa	90
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	2.750
Elongation at break	ISO 527	%	5.4
Flexural strength	ISO 178	MPa	140
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,000
Compressive strength	ISO 604	MPa	120
Density	ISO 1183	g/cm³	1.21
Shore hardness	ISO 868	-	D 87
Impact resistance	ISO 179	kJ/m²	20

Typical Thermal Properties of Cured Neat Resin, after 3 hr / 80°C + 3 hr / 120°C + 3 hr / 140°C

Biresin® CR144 resin (A)		with Biresin® CH141 hardener (B) and Biresin® CA144 accelerator (C)	
Heat distortion temperature	ISO 75B	°C	147
Glass transition temperature	ISO 11357	°C	151

Biresin® CR144 2/2



BUILDING TRUST



Figura 6-1 - Ficha técnica da resina tipo 2.



Biresin® CR141

Composite resin system for heat curing

Product Description

Biresin® CR141 is a three component, anhydride cured, low viscosity epoxy resin system suitable for the production of high performance fibre reinforced composites.

Application Areas

Biresin® CR141 system is particularly suited to the filament winding and pultrusion processes due to its low viscosity, good fibre wetting capabilities and very long potlife.

Features / Advantages

- The reactivity of the system can be adjusted by modifying the level of the accelerator (C) CA141
- Fast infiltration of dry fibres due to good wetting characteristics, low mixed viscosity and an elevated processing temperature
- Good wet-out of fibres, fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics
- Approved by Germanischer Lloyd - Certificate No. WP 1420022 HH (attached)

Physical Data		Resin (A)	Hardener (B)	Accelerator (C)
Individual Components		Biresin® CR141	Biresin® CH141	Biresin® CA141
Mixing Ratio, parts by	Weight	100	90	2
Mixing Ratio, parts by	Volume	100	87	2.4
Colour		translucent	transparent	amber
Viscosity, 25°C	mPa.s	~8,250	~40	~200
Density, 25°C	g/ml	1.16	1.20	0.98
		Mixture		
Potlife, 100 g / RT, approx. values	h	> 24		
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPa.s	600		
Mechanical Data, neat resin specimen approx. values after 3 h / 80°C + 3 h / 120°C + 3 h / 140°C				
Biresin® CR141 resin (A)		with Biresin® CH141 hardener (B) and Biresin® CA141 accelerator (C)		
Tensile strength	ISO 527	MPa	78	
Tensile E-Modulus	ISO 527	MPa	3,200	
Elongation at break	ISO 527	%	3.3	
Flexural strength	ISO 178	MPa	145	
Flexural E-Modulus	ISO 178	MPa	3,100	
Compressive strength	ISO 604	MPa	122	
Density	ISO 1183	g/cm³	1.20	
Shore hardness	ISO 868	-	D 87	
Impact resistance	ISO 179	kJ/m²	18	
Typical Thermal Properties of Cured Neat Resin, after 3 h / 80°C + 3 h / 120°C + 3 h / 140°C				
Biresin® CR141 resin (A)		with Biresin® CH141 hardener (B) and Biresin® CA141 accelerator (C)		
Heat distortion temperature	ISO 75B	°C	137	
Glass transition temperature	ISO 11357	°C	139	

Biresin® CR141 1 / 2



BUILDING TRUST



Figura 6-2 - Ficha técnica da resina tipo 1.

**Alteração da cor**dataMASTER V2.3
01.04.2005 05:29

<i>Partida:</i>	<i>!HebertA1</i>		<i>Padrão: !HebertA0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	1-2	1-2	10.930	-10.887	0.036	-0.967
A/10	1-2	1-2	10.829	-10.786	0.481	-0.826
F11/10	1-2	1-2	10.889	-10.850	0.104	-0.915
D65/2	1-2	1-2	10.923	-10.877	0.017	-1.005

<i>Partida:</i>	<i>!HebertA2</i>		<i>Padrão: !HebertA0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	1	1	12.911	-12.587	-2.803	-0.631
A/10	1	1	12.903	-12.649	-2.447	-0.719
F11/10	1	1	13.094	-12.692	-3.145	-0.692
D65/2	1	1	12.988	-12.653	-2.845	-0.698

<i>Partida:</i>	<i>!HebertA3</i>		<i>Padrão: !HebertA0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	1-2	1-2	10.008	-9.970	-0.759	-0.440
A/10	1-2	1-2	9.992	-9.961	-0.565	-0.534
F11/10	1-2	1-2	10.068	-10.010	-0.905	-0.583
D65/2	1-2	1-2	10.042	-9.994	-0.833	-0.531

Figura 6-3 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra A.

**Alteração da cor**dataMASTER V2.3
01.04.2005 05:30

<i>Partida:</i>	<i>!HebertA_1</i>		<i>Padrão: !HebertA_0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	2	2	6.699	3.197	5.650	-1.654
A/10	2	2	7.333	3.623	6.216	-1.417
F11/10	2	2	7.617	3.504	6.631	-1.332
D65/2	2	2	6.773	3.359	5.635	-1.682

<i>Partida:</i>	<i>!HebertA_2</i>		<i>Padrão: !HebertA_0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	2-3	2-3	5.346	1.456	4.863	-1.675
A/10	2	2	6.011	1.858	5.540	-1.408
F11/10	2	2	6.145	1.745	5.742	-1.323
D65/2	2-3	2-3	5.426	1.607	4.904	-1.679

<i>Partida:</i>	<i>!HebertA_3</i>		<i>Padrão: !HebertA_0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	2	2	7.322	0.079	6.914	-2.409
A/10	2	1-2	8.279	0.681	8.021	-1.937
F11/10	2	1-2	8.339	0.510	8.106	-1.890
D65/2	2	2	7.389	0.295	6.979	-2.409

Figura 6-4 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra A'.

**Alteração da cor**dataMASTER V2.3
01.04.2005 05:14

<i>Partida:</i>	<i>!HebertP1</i>		<i>Padrão: !HebertP0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	3-4	3-4	2.710	2.363	1.235	-0.481
A/10	3-4	3-4	2.774	2.433	1.317	-0.198
F11/10	3-4	3-4	2.719	2.355	1.273	-0.478
D65/2	3-4	3-4	2.746	2.397	1.276	-0.414

<i>Partida:</i>	<i>!HebertP3</i>		<i>Padrão: !HebertP0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	2	2	7.838	7.252	2.881	-0.744
A/10	2	2	7.891	7.369	2.817	-0.189
F11/10	2	2	7.904	7.280	2.966	-0.826
D65/2	2	2	7.913	7.320	2.945	-0.606

<i>Partida:</i>	<i>!HebertP33</i>		<i>Padrão: !HebertP0</i>			
	<i>ISO A05</i>	<i>AATCC</i>	<i>DE*</i>	<i>DL*</i>	<i>DC*</i>	<i>DH*</i>
D65/10	1-2	1-2	9.395	9.146	1.994	-0.806
A/10	1-2	1-2	9.544	9.280	2.212	-0.275
F11/10	1-2	1-2	9.534	9.232	2.215	-0.869
D65/2	1-2	1-2	9.455	9.206	2.047	-0.678

Figura 6-5 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra P.



**Alteração da cor**dataMASTER V2.3
01.04.2005 05:31

<u>Partida:</u>	<u>!HebertP_1</u>		<u>Padrão: !HebertP_0</u>			
	<u>ISO A05</u>	<u>AATCC</u>	<u>DE*</u>	<u>DL*</u>	<u>DC*</u>	<u>DH*</u>
D65/10	3-4	3-4	2.265	-1.293	1.830	-0.326
A/10	3-4	3-4	2.251	-1.185	1.913	-0.026
F11/10	3-4	3-4	2.326	-1.288	1.916	-0.279
D65/2	3-4	3-4	2.252	-1.245	1.861	-0.240

<u>Partida:</u>	<u>!HebertP_2</u>		<u>Padrão: !HebertP_0</u>			
	<u>ISO A05</u>	<u>AATCC</u>	<u>DE*</u>	<u>DL*</u>	<u>DC*</u>	<u>DH*</u>
D65/10	3-4	3-4	2.483	1.081	2.150	-0.612
A/10	3-4	3-4	2.930	1.282	2.627	-0.194
F11/10	3-4	3-4	2.639	1.142	2.320	-0.527
D65/2	3-4	3-4	2.534	1.148	2.201	-0.509

<u>Partida:</u>	<u>!HebertP_3</u>		<u>Padrão: !HebertP_0</u>			
	<u>ISO A05</u>	<u>AATCC</u>	<u>DE*</u>	<u>DL*</u>	<u>DC*</u>	<u>DH*</u>
D65/10	1-2	1-2	9.595	8.787	3.841	-0.303
A/10	1-2	1-2	9.562	8.908	3.473	0.119
F11/10	1-2	1-2	9.588	8.766	3.869	-0.357
D65/2	1-2	1-2	9.645	8.857	3.813	-0.179

Figura 6-6 - Resultado do ensaio de diferença de cor para a amostra P'.

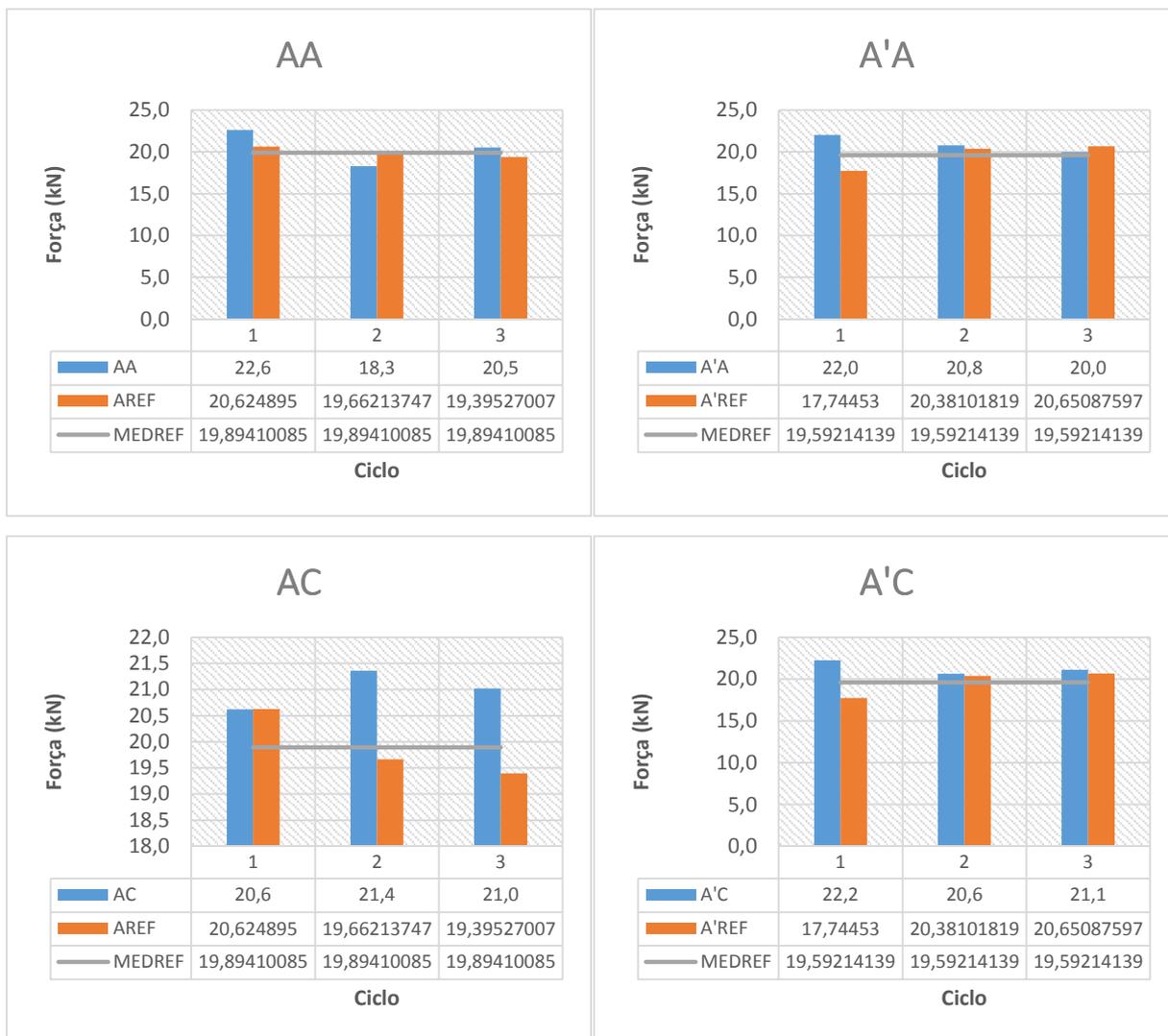


Figura 6-7 - Variação de força máxima de ruptura (amostras de acrílico).

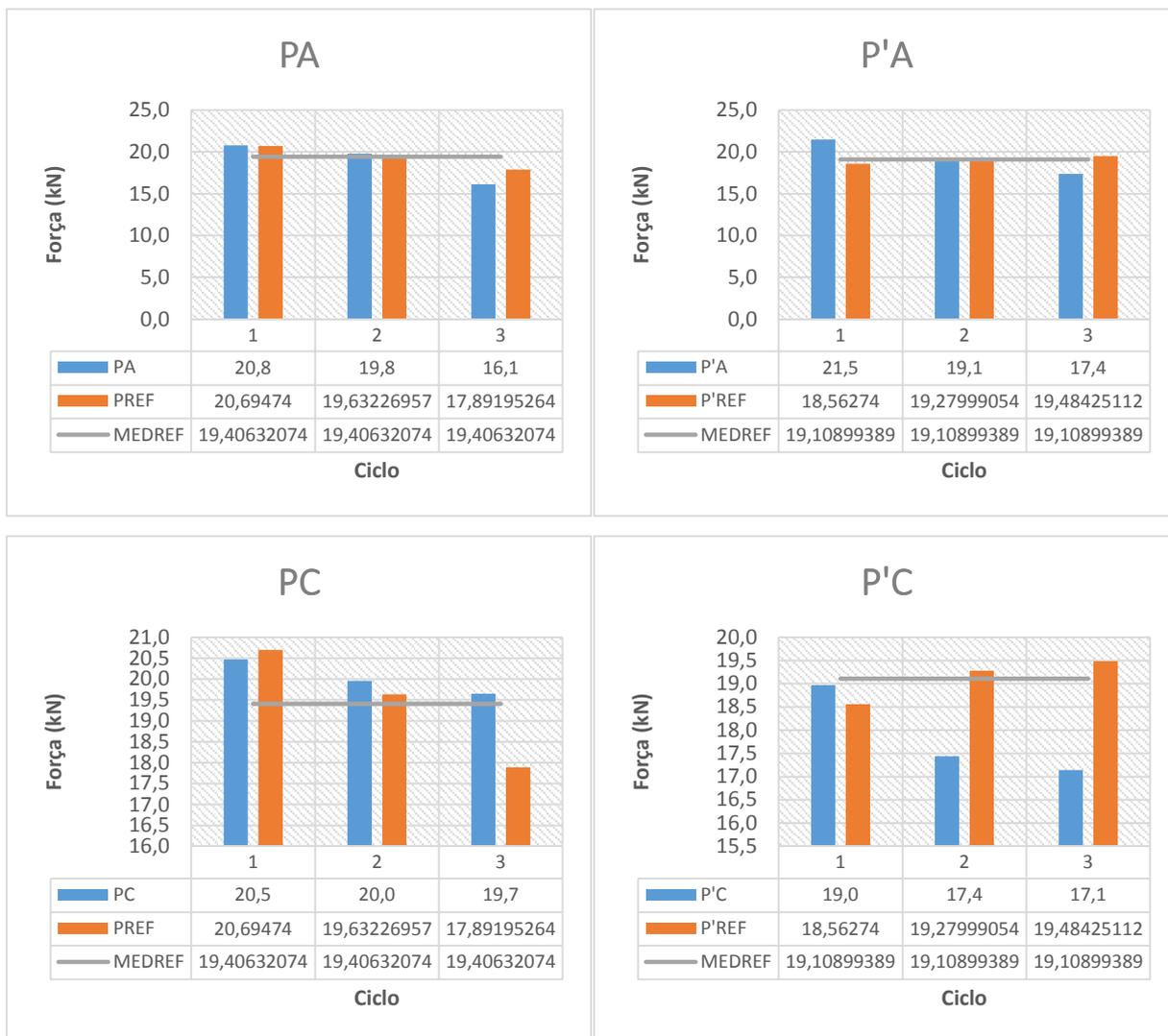


Figura 6-8 - Variação de força máxima de ruptura (amostras de poliéster).

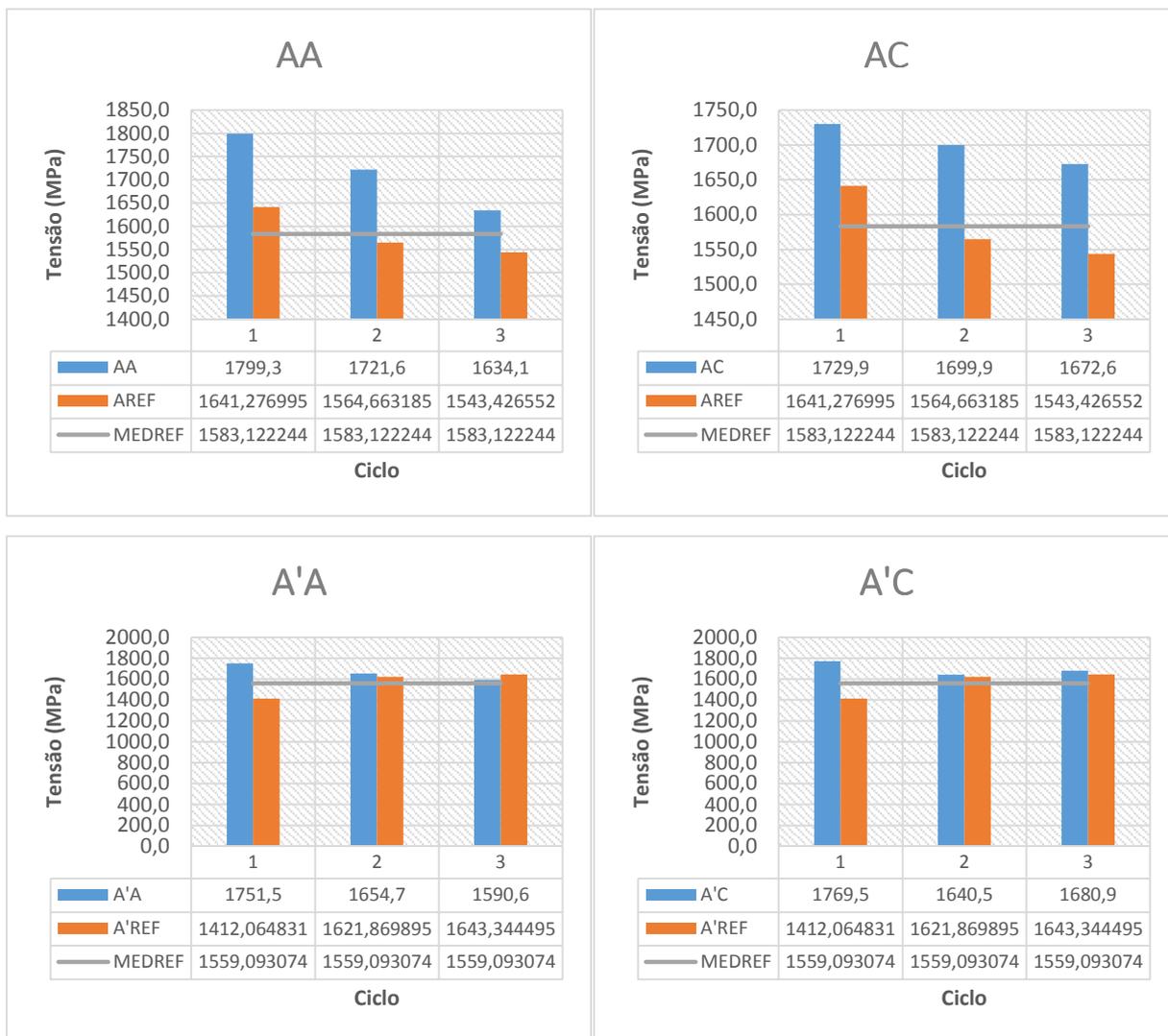


Figura 6-9 - Variação de tensão máxima de ruptura (amostras de acrílico).

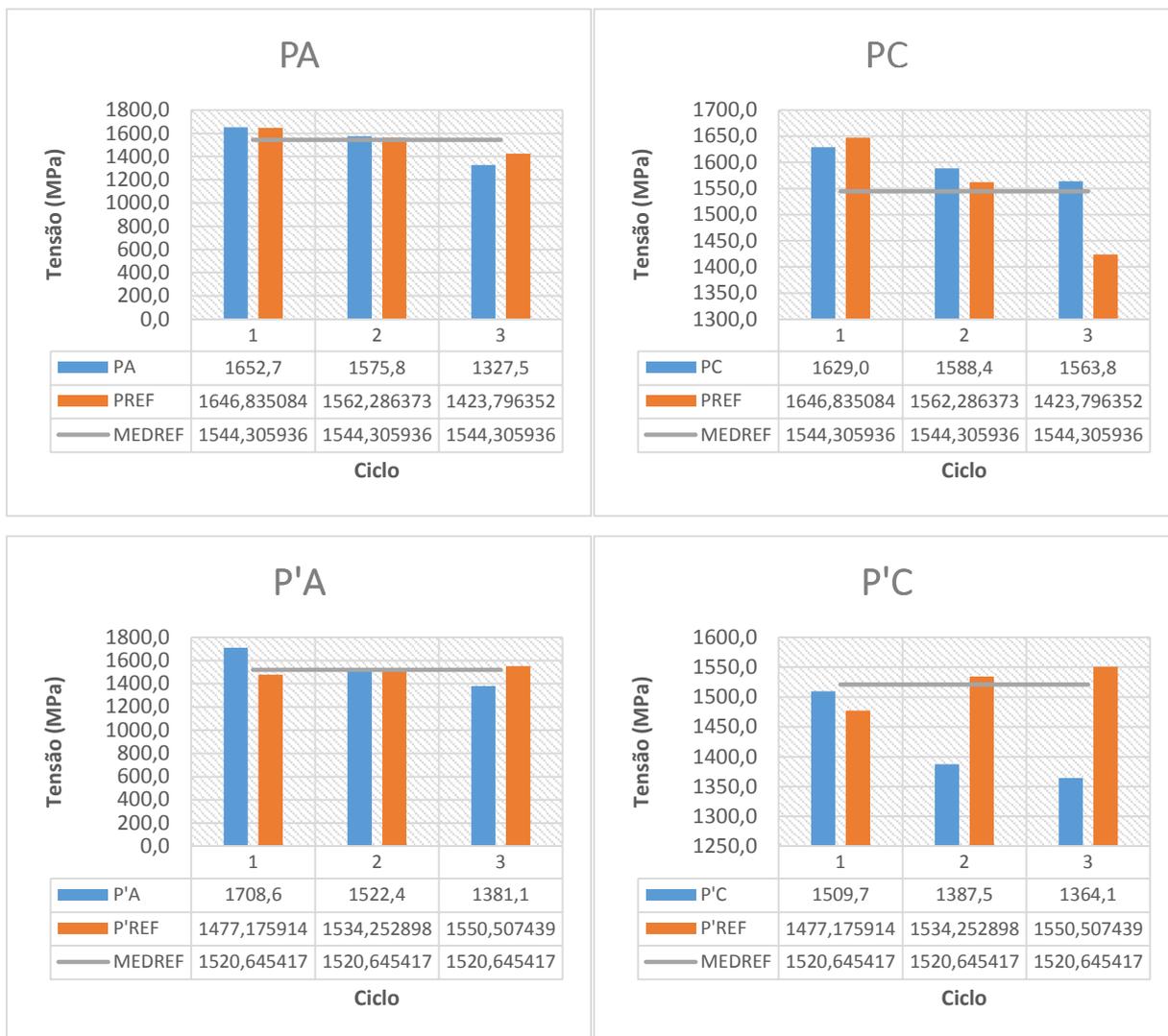


Figura 6-10 - Variação de tensão máxima de ruptura (amostras de poliéster).

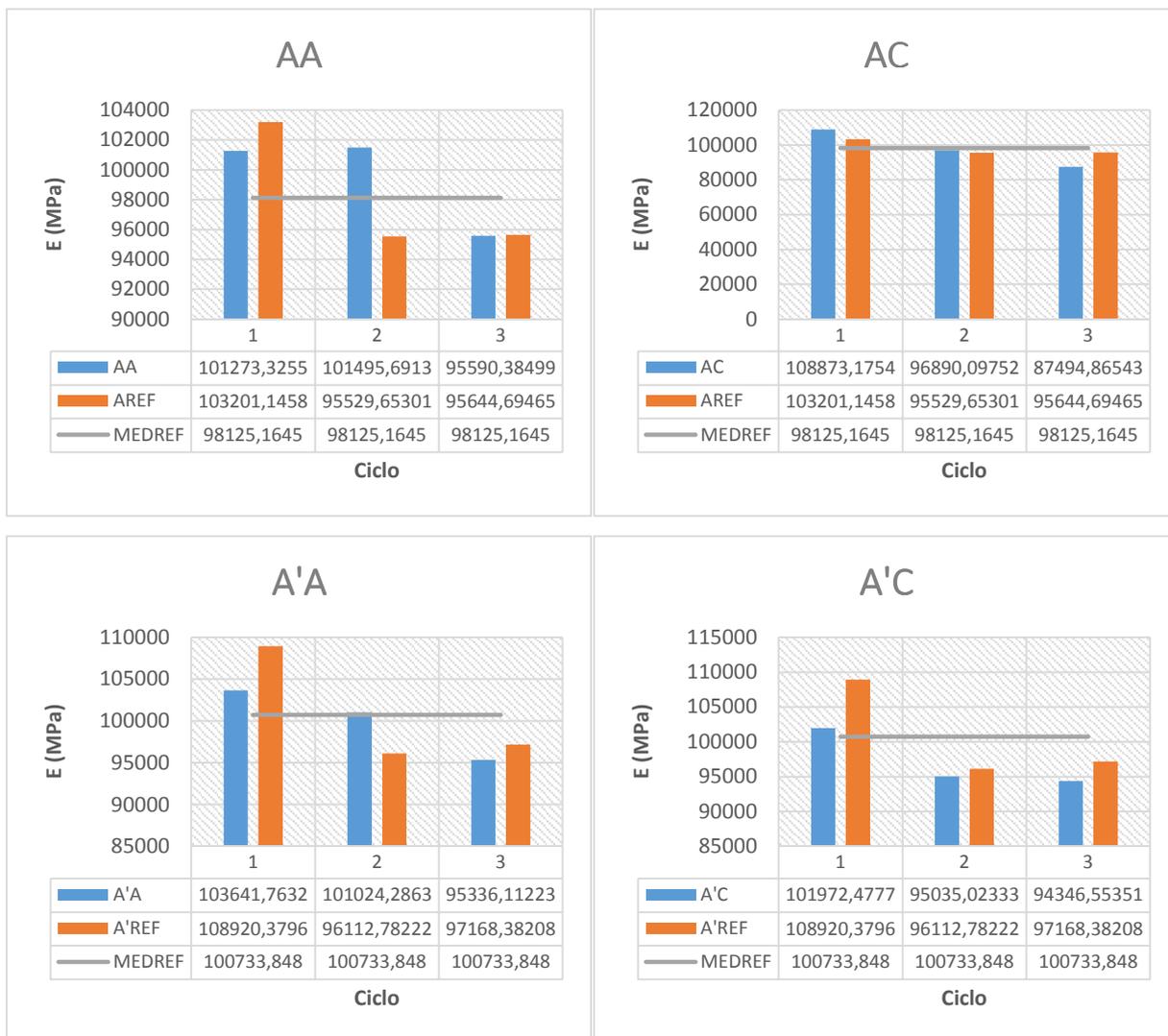


Figura 6-11 - Variação do módulo de elasticidade máximo de ruptura (amostras de acrílico).

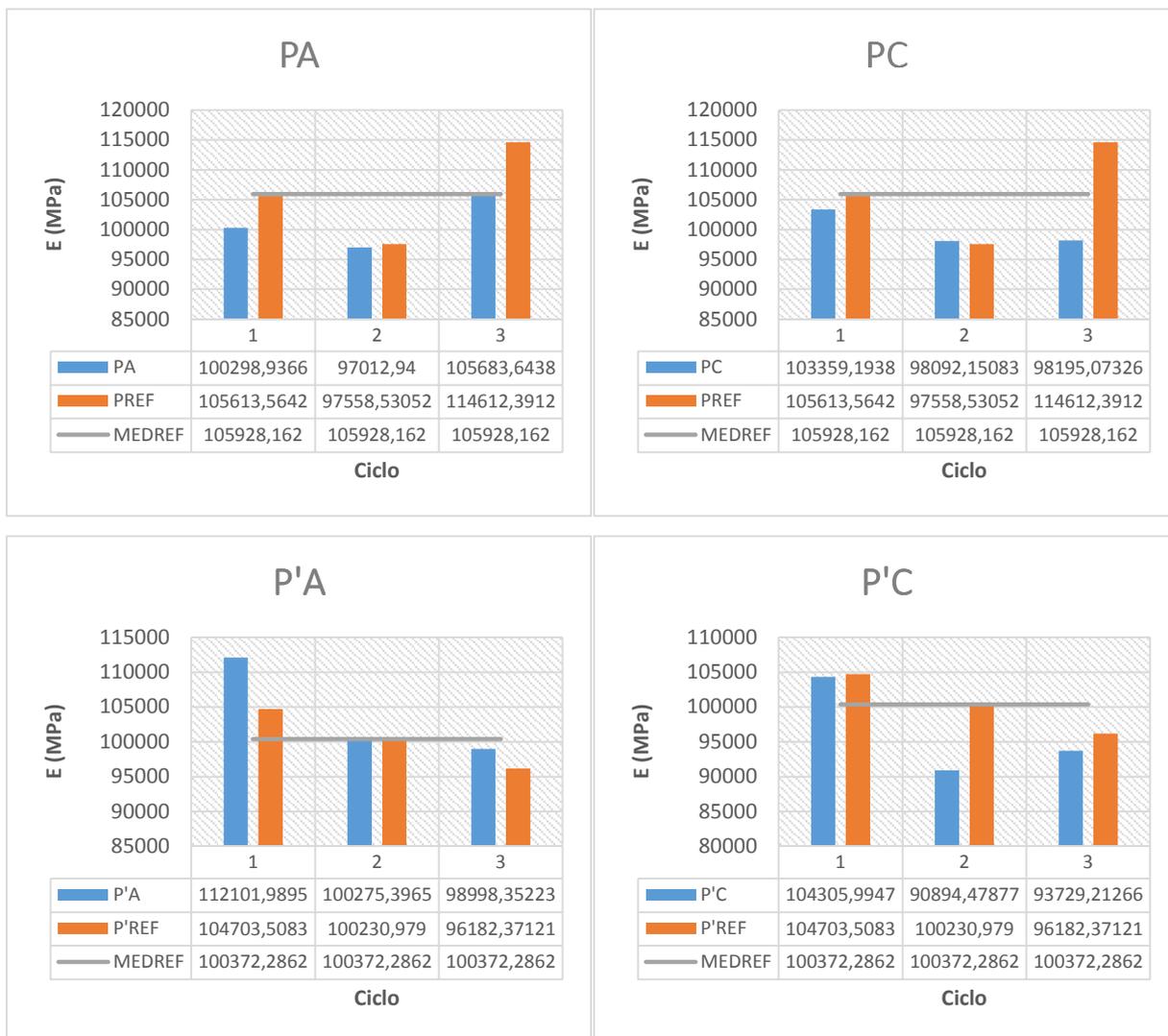


Figura 6-12 - Variação do módulo de elasticidade máximo de ruptura (amostras de poliéster).