



2.º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

QIC2016

Lisboa • LNEC • 21 a 23 de Novembro de 2016

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO PARA ESTRUTURAS EM PERFIS DE GFRP SISTEMA CLASSIFICATIVO DAS ANOMALIAS E RESPECTIVAS CAUSAS

André Miguel Pereira Castelo

*Aluno de Doutoramento, Eng.º Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
andre.castelo@tecnico.ulisboa.pt*

João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

*Professor Associado, Eng.º Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt*

Susana Bravo Cordeiro Baptista Cabral da Fonseca

*Investigadora Auxiliar, Eng.ª Química, Laboratório Nacional de Engenharia Civil,
sbravo@lnec.pt*

Jorge Manuel Caliço Lopes de Brito

*Professor Catedrático, Eng.º Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
jorge.brito@tecnico.ulisboa.pt*

Resumo

Na presente comunicação, apresentam-se os primeiros desenvolvimentos de um sistema de inspecção e diagnóstico para estruturas em perfis pultrudidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP, do inglês, *glass fibre reinforced polymer*). Em particular, é apresentado o sistema classificativo das anomalias que podem ocorrer em estruturas de perfis de GFRP, agrupadas de acordo com o seu aspecto visual. São também apresentados o sistema classificativo das causas possíveis para as anomalias neste tipo de estruturas, a matriz de correlação entre as anomalias e as suas possíveis causas e ainda a exemplificação de uma ficha de uma anomalia. Na parte final da comunicação, é apresentado um caso de estudo, resultante de uma das inspecções já realizadas, cujos objectivos consistem em (i) validar o sistema de inspecção e diagnóstico e (ii) analisar a frequência de ocorrência das diferentes anomalias e causas.

Palavras-chave: materiais compósitos / perfis de GFRP / sistema de inspecção e diagnóstico / anomalias / causas prováveis

Introdução

Nas últimas duas décadas, o recurso a perfis em compósito de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP, do inglês *glass fibre reinforced polymer*) em aplicações da engenharia civil aumentou consideravelmente, nomeadamente em indústrias com requisitos particulares em termos de durabilidade e manutenção, como por exemplo as estações de tratamento de águas e esgotos, a indústria petroquímica, a indústria dos portos e pescas e as centrais termoeléctricas (Correia; 2008).

Inicialmente, a utilização estrutural destes materiais compósitos na construção era limitada a projectos-piloto ou de investigação. Contudo, a par do crescente aumento do conhecimento acerca do seu comportamento, a aplicação de perfis de GFRP com fins estruturais tem vindo a aumentar. Presentemente, embora na maioria das construções os perfis de GFRP sejam utilizados em elementos não estruturais ou em estruturas secundárias, como passadiços, pequenos pavimentos, coberturas ou corrimões, já existem algumas construções que utilizam perfis de GFRP como elementos estruturais primários, quer em pontes pedonais (Keller *et al.*; 2015) e rodoviárias (Knipers *et al.*; 2008), quer em edifícios correntes (Keller *et al.*; 2001) ou de emergência (Castelo; 2014).

Actualmente, algumas das construções com elementos de GFRP utilizadas nas aplicações mencionadas já têm uma idade considerável (nalguns casos, mais de 20 anos) e, como referido, muitas delas estão localizadas em ambientes corrosivos ou agressivos. O seu bom desempenho relativo neste tipo de aplicações, nomeadamente por comparação com materiais convencionais, como o aço ou o betão armado, demonstra empiricamente a boa durabilidade destes materiais. No entanto, a maior parte das estruturas de engenharia civil é projectada para uma vida útil de 50 anos e ainda não existem modelos de degradação para perfis de GFRP ou informação suficientemente longa sobre a sua durabilidade em condições de serviço. Deste modo, paradoxalmente, a ausência de informação sistemática sobre a durabilidade destas construções tem constituído um obstáculo para a sua maior utilização nalgumas aplicações (Kharbari *et al.*; 2003), (Harries *et al.*; 2003).

Não obstante o seu bom desempenho a longo prazo mesmo em ambientes relativamente agressivos, as construções em perfis de GFRP também apresentam anomalias ao longo da sua vida útil, exigindo acções de manutenção e reabilitação. Apesar da existência de diversas construções em GFRP, ainda não existe nenhum sistema de inspecção e diagnóstico que descreva os principais defeitos e anomalias que podem ser encontrados neste tipo de construções, desde a fase de produção até à fase de utilização, nem as suas principais causas e possíveis consequências. A este nível, a maior parte da informação disponível diz respeito a outros tipos de aplicação, como as das engenharias mecânica, naval e aeronáutica, onde os materiais compósitos já são utilizados há mais tempo (embora com diferentes formas / tipologias) e numa maior variedade de aplicações, e em que foi possível obter algum conhecimento sobre o seu comportamento e durabilidade.

Na área da engenharia civil, com excepção da norma Europeia EN 13706 (CEN; 2002), que especifica algumas das principais características que estes materiais devem apresentar após a sua produção, bem como alguns defeitos que podem ocorrer nessa fase, não existe muita informação disponível sobre as anomalias e as técnicas de inspecção e de reabilitação aplicáveis a elementos de GFRP. Existem apenas alguns casos de estudo de estruturas construídas no âmbito de projectos-piloto ou de investigação (Keller *et al.*; 2007), que têm vindo a ser inspeccionadas / monitorizadas periodicamente, e alguns relatórios científicos para aplicações específicas, como sistemas de redes de petróleo (NOROG; 2007) e tabuleiros de pontes (Telang *et al.*; 2006).

Neste contexto, o estudo apresentado nesta comunicação tem por objectivo conceber um sistema de inspecção e diagnóstico para estruturas constituídas por perfis pultrudidos e gradis moldados em GFRP, que inclua os seguintes elementos: (i) sistema classificativo das anomalias e das respectivas causas; (ii) técnicas de inspecção e diagnósticos aplicáveis; e (iii) técnicas de manutenção e reabilitação mais adequadas. O sistema de inspecção e diagnóstico incluirá também matrizes de correlação entre cada um daqueles elementos, que serão desenvolvidas e validadas através de uma campanha de inspecção a construções existentes. Este estudo segue a metodologia utilizada no IST para o desenvolvimento de outros sistemas de inspecção para elementos estruturais e não-estruturais: betão (Brito; 1992), elementos cerâmicos (Silvestre *et al.*; 2009), revestimentos de pavimentos industriais (Garcia *et al.*; 2008) e coberturas inclinadas (Garcez *et al.*; 2012).

Na presente comunicação, descreve-se a primeira parte do sistema. É apresentado o sistema classificativo das anomalias que podem ocorrer em estruturas de GFRP, agrupadas de acordo com o seu aspecto visual. Para cada anomalia, discute-se as principais causas que podem conduzir à sua ocorrência, bem como as possíveis consequências que delas podem advir. Na parte final da comunicação, apresenta-se um caso de estudo, resultante de uma das inspecções já realizadas, cujos objectivos consistem em (i) validar o sistema de inspecção e diagnóstico e (ii) analisar a frequência de ocorrência das diferentes anomalias e causas.

Sistema de classificação de anomalias

Com base na análise da literatura, de casos de estudo e de informação recolhida junto dos produtores e utilizadores de perfis de GFRP, foi desenvolvida uma lista preliminar de anomalias (Quadro 1). Como referido, esta lista foi criada tendo em conta apenas o aspecto visual das anomalias. De acordo com este critério, a mesma anomalia pode ser detectada em diversas zonas do material (na superfície ou no interior) e a diferentes níveis estruturais (do elemento estrutural, da ligação ou da estrutura), diferindo apenas nas possíveis causas que levaram ao seu aparecimento / desenvolvimento. As anomalias foram divididas em dois grupos, (i) anomalias não-mecânicas e (ii) anomalias mecânicas, sendo que as do segundo grupo são as que podem afectar consideravelmente as propriedades mecânicas do material, do elemento estrutural, da ligações ou da estrutura como um todo.

Quadro 1: Sistema de classificação das anomalias.

CLASSIFICAÇÃO DE ANOMALIAS	
Não-Mecânicas (A.N-ME)	Mecânicas (A.ME)
01 - Colonização biológica	01 - Corrosão de elementos metálicos
02 - Descoloração / perda de brilho	02 - Fissuração
03 - “ <i>Fibre blooming</i> ”	03 - Esmagamento
04 - Inclusões	04 - Descolamento
05 - Manchas	05 - Delaminação
06 - Marcas superficiais	06 - Deformação excessiva
07 - Desgaste superficial	07 - Imperfeições geométricas
	08 - Indentação / perfuração
	09 - Cura incorrecta do adesivo
	10 - Cura incorrecta da resina
	11 - Rotura do elemento
	12 - Ligações soltas
	13 - Vazios

Anomalias não-mecânicas

As anomalias não-mecânicas são as que não afectam as propriedades mecânicas do material, do elemento estrutural ou das ligações, sendo geralmente detectadas à superfície dos perfis. Apesar de não afectarem as propriedades mecânicas, estas anomalias podem criar as condições necessárias para o desenvolvimento de outras anomalias de cariz mecânico. A Figura 1 exemplifica algumas das anomalias mais comuns desta categoria.

A.N-ME.01 - Colonização biológica

Esta anomalia consiste no aparecimento de matéria biológica (plantas, fungos, animais) à superfície dos perfis de GFRP. Esta anomalia ocorre normalmente em zonas com elevada humidade ou permanentemente em imersão.

A.N-ME.02 - Descoloração / perda de brilho

Esta anomalia afecta a camada superficial de resina dos perfis, levando a que estes sofram alteração da cor ou percam o seu brilho. Geralmente, este processo ocorre na fase de utilização, maioritariamente devido à exposição à radiação ultravioleta (UV). A anomalia também se pode dever

a uma incorrecta cura da resina ou à exposição a soluções aquosas ou a ambientes quimicamente agressivos.

A.N-ME.03 - “Fibre blooming”

Esta anomalia consiste no aparecimento, à superfície, das fibras interiores do perfil, geralmente da manta mais superficial. Esta anomalia ocorre pela degradação da camada superficial de resina e, maioritariamente, em situações de elevada exposição à radiação UV. Para além do problema funcional que pode acarretar (por exemplo, o desconforto táctil dos utilizadores em corrimãos), esta anomalia potencia a acumulação de humidade e o desenvolvimento de colonização biológica.

A.N-ME.04 - Inclusões

Esta anomalia, que tem origem na fase de produção, consiste no aparecimento de material anómalo ao material compósito de GFRP no interior dos perfis.

A.N-ME.05 - Manchas

Esta anomalia consiste no aparecimento de manchas à superfície dos perfis, podendo estas dever-se a humidade, pinturas exteriores (*graffiti*) e/ou queimaduras superficiais.

A.N-ME.06 - Marcas superficiais

Esta anomalia compreende um total de nove situações anómalas distintas (por exemplo, riscos ou bolhas), mas que se manifestam de forma similar em termos de aspecto visual. Estas anomalias têm diversas causas possíveis, podendo ocorrer nas fases de produção, montagem e instalação.

A.N-ME.07 - Desgaste superficial

Esta anomalia consiste na degradação das camadas superficiais, de protecção ou de revestimento dos perfis, devido ao uso normal ou incorrecto dos elementos.



Figura 1: Exemplos de anomalias não-mecânicas.

Anomalias mecânicas

As anomalias mecânicas são as que têm potencial para afectar as propriedades mecânicas do material, dos elementos ou das ligações. A Figura 2 exemplifica algumas das anomalias mecânicas que podem ser encontradas em estruturas de GFRP. Em princípio, as anomalias mecânicas resultantes de problemas de produção deveriam ser descartadas pelos sistemas de controlo de qualidade nas fases de fabrico (em fábrica) e de instalação (em obra). Deste modo, as anomalias com estas origens não se deveriam manifestar em construções em serviço. Por isso, a inclusão destas anomalias neste sistema enquadra-se também numa perspectiva de controlo de qualidade, tanto dos produtores como dos utilizadores.

A.ME.01 - Corrosão de elementos metálicos

Esta anomalia consiste na corrosão dos elementos metálicos da estrutura, ocorrendo principalmente em zonas de ligação entre elementos. A corrosão pode dever-se à falta de protecção ou à incorrecta escolha e/ou aplicação dos materiais de ligação, como ilustrado na Figura 2 (01).

A.ME.02 - Fissuração

Esta anomalia pode ocorrer em qualquer componente estrutural, seja ao nível do material, seja em zonas de ligação coladas / aparafusadas entre elementos, como ilustrado na Figura 2 (02). As causas que levam ao surgimento desta anomalia são diversas e podem ocorrer em qualquer fase do ciclo de vida deste material (fabrico, montagem ou utilização).

A.ME.03 - Esmagamento

Esta anomalia consiste no esmagamento (por compressão) de um elemento estrutural, ocorrendo mais frequentemente em zonas de ligação ou nas extremidades dos elementos. As causas que levam ao aparecimento desta anomalia estão, de um modo geral, associadas a erros de projecto.

A.ME.04 - Descolamento

Esta anomalia consiste no descolamento de dois elementos estruturais numa ligação colada, estando geralmente relacionada com a incorrecta escolha ou aplicação do adesivo ou o incorrecto tratamento das superfícies dos elementos a ligar. Poderá também dever-se ao incorrecto dimensionamento das ligações.

A.ME.05 - Delaminação

Esta anomalia consiste na separação (delaminação) entre as diferentes camadas de reforço fibroso dos perfis, como ilustrado na Figura 2 (05), podendo conduzir a uma redução considerável das propriedades mecânicas dos elementos.

A.ME.06 - Deformação excessivas

Esta anomalia consiste numa deformação excessiva dos elementos estruturais (geralmente, o deslocamento vertical a meio vão de elementos horizontais), tendo por referência as flechas admissíveis para este tipo de estruturas. Esta anomalia, geralmente relacionada com um incorrecto dimensionamento (nomeadamente no que se refere ao fenómenos da fluência), também se pode dever a uma utilização incorrecta da estrutura ou uma alteração de uso.

A.ME.07 - Imperfeições geométricas

Esta anomalia manifesta-se na aplicação de perfis com dimensões incorrectas (fase de produção), ou seja, com desvios que excedem as tolerâncias definidas na norma EN 13706, ou em perfis com cortes incorrectamente executados (fase de instalação), levando à existência de imperfeições em zonas de ligação ou zonas correntes, como se ilustra na Figura 2 (07).

A.ME.08 - Indentação / perfuração

Esta anomalia consiste na indentação, parcial ou total (perfuração), de uma ou mais faces de um perfil pultrudido por um elemento externo, como ilustrado na Figura 2 (08).

A.ME.09 - Cura incorrecta do adesivo

Esta anomalia consiste na cura incorrecta do adesivo, na fase de instalação da estrutura, em zonas de ligação colada entre dois elementos estruturais. Esta anomalia pode comprometer o comportamento mecânico da ligação.

A.ME.10 - Cura incorrecta da resina

Esta anomalia consiste na cura incorrecta da resina do material GFRP durante a fase de produção dos perfis. Tal como a anterior, esta anomalia também pode afectar consideravelmente as propriedades mecânicas do material dos elementos.

A.ME.11 - Falha do elemento

Esta anomalia, que se manifesta na fase de utilização, consiste na falha (rotura) de um elemento estrutural. Esta rotura pode ocorrer de diferentes modos, por exemplo ao nível da ligação entre o banzo e a alma dos perfis, ou nas arestas dos laminados dos elementos, como ilustrado na Figura 2 (11).

A.ME.12 - Ligações soltas

Esta anomalia consiste na existência de ligações aparafusadas em que falem elementos da ligação (por exemplo, porcas ou anilhas) ou em que os mesmos estejam soltos. Esta anomalia pode assim

conduzir a um deficiente comportamento da ligação, em termos de resistência e de rigidez, podendo também provocar outras anomalias (por exemplo, indentação por ausência de anilhas).

A.ME.13 - Vazios

Esta anomalia consiste no aparecimento de vazios (bolsas de ar) no interior do material dos perfis pultrudidos ou do adesivo utilizado em ligações coladas.



Figura 2: Exemplos de anomalias mecânicas.

Sistema de classificação das causas

O Quadro 2 apresenta a classificação proposta para as causas das anomalias, que inclui quatro grupos de causas, consoante estejam associadas à produção, ao projecto, à instalação ou à utilização. Salienta-se o facto de, em geral, uma anomalia neste tipo de materiais não se dever apenas a um factor mas a um conjunto de factores relacionados que, desde a fase de fabrico até à fase de utilização, permitam o desenvolvimento da mesma.

Causas associadas à produção

Diversas anomalias podem advir da fase de produção dos elementos em GFRP. Esta fase é uma das mais importantes para o desempenho das construções em GFRP, já que dela resultam as propriedades mecânicas e visuais dos elementos. Este é o maior grupo de possíveis causas para anomalias, sendo que tal se deve às características do processo de fabrico, isto é, a pultrusão ou moldação manual. A maioria das causas deste grupo encontra-se relacionada directamente com a resina da matriz dos perfis, ou ao incorrecto manuseamento das fibra, levando à ocorrência de anomalias na fase de produção.

Causas associadas ao projecto

As causas associadas ao projecto devem-se, de um modo geral, ao nível de desconhecimento sobre o comportamento mecânico dos materiais e, também, à inexistência de códigos consensuais para o dimensionamento de estruturas com perfis de GFRP. As anomalias associadas a estas causas estão

relacionadas com o dimensionamento incorrecto dos vários componentes da estrutura e das suas ligações (aparafusadas ou coladas), com erros de pormenorização e especificações inadequadas dos materiais para as condições ambientais a que a estrutura estará exposta (por exemplo, o tipo de resina, os aditivos, a arquitectura de fibras e a protecção superficial). Deste modo, as causas deste tipo poderiam ser mitigadas por um melhor conhecimento do material GFRP e dos pormenores construtivos mais adequados a estas construções e, também, pelo desenvolvimento de regulamentação (em curso).

Quadro 2: Classificação proposta das possíveis causas de anomalias em GFRP.

CLASSIFICAÇÃO DAS ANOMALIAS
Causas associadas à produção (C.P)
01 - Condições incorrectas de cura da resina (temperatura, humidade e duração)
02 - Excesso de resina
03 - Qualidade / mistura / formulação dos componentes da resina incorrecta
04 - Escorrimento de resina ou pequenas bolhas de ar
05 - Manutenção / limpeza / isolamento do equipamento de pultrusão incorrecto
06 - Posicionamento incorrecto das fibras / mantas
07 - Posicionamento incorrecto das peças metálicas do molde
08 - Manuseamento incorrecto dos perfis ou elemento de corte
Causas associadas ao projecto (C.D)
01 - Dimensionamento estrutural incorrecto
02 - Escolha incorrecta de secção transversal / material
03 - Dimensionamento de ligações incorrecto
04 - Inexistência de véu superficial / aditivos UV / protecção superficial
Causas associadas à instalação (C.I)
01 - Instalação ou pré-fabricação incorrecta
02 - Aplicação incorrecta do adesivo
03 - Qualidade / mistura / formulação incorrecta dos componentes do adesivo
04 - Tratamento incorrecto das superfícies em ligações adesivas
05 - Condições incorrectas de temperatura e humidade para a cura do adesivo
06 - Aperto incorrecto dos parafusos em ligações aparafusadas
Causas associadas à utilização (C.S)
01 - Condições ambientais com humidade elevada ou permanente imersão
02 - Exposição a radiação UV
03 - Exposição a ambientes salinos / químicos
04 - Perda de aperto ou protecção de ligações aparafusadas
05 - Vandalismo / impacto accidental
06 - Desgaste / mudança de utilização ou utilização imprópria

Causas associadas à instalação

A maioria das causas deste tipo envolve uma incorrecta instalação, quer dos elementos, quer das suas ligações. Geralmente, estas causas estão associadas ao desconhecimento das melhores técnicas construtivas para este tipo de estruturas e/ou a mão-de-obra pouco qualificada. As causas associadas à instalação de construções em GFRP não deveriam ter uma grande incidência, visto que a maioria dos elementos é, pelo menos parcialmente, pré-montada em fábrica.

Causas associadas à utilização

As causas associadas à utilização advêm da exposição dos perfis aos elementos atmosféricos e da má utilização ou mudança de uso das estruturas. Algumas das anomalias detectadas na fase de utilização podem também resultar de causas de fases anteriores. A implementação de planos de

utilização e de planos de inspecção e manutenção poderá diminuir a incidência de anomalias com este tipo de causas.

Matriz de correlação anomalias-causas

A construção de matrizes de correlação tem como objectivo facilitar o trabalho do inspector, relacionando as anomalias com as suas causas prováveis. Para cada anomalia, são assim identificadas as causas prováveis da sua ocorrência, sendo cada par anomalia-causa classificado de acordo com um número, designado índice de correlação, definido em função do grau de correlação entre a causa e a anomalia: 0 - **sem relação** - não existe qualquer correlação (directa ou indirecta) entre a anomalia e a causa; 1 - **pequena correlação** - causa indirecta (primeira) da anomalia relacionada com o início do processo de deterioração; causa secundária do processo de deterioração não necessária para o seu desenvolvimento; 2 - **grande correlação** - causa directa (próxima) da anomalia, associada à fase final do processo de deterioração; quando ocorre, constitui uma das razões principais do processo de deterioração e é indispensável ao seu desenvolvimento. Da aplicação desta metodologia resultou a matriz de correlação anomalias - causas apresentada no Quadro 3.

Quadro 3: Matriz de correlação anomalias - causas prováveis.

		ANOMALIAS																				
		Não-mecânicas							Mecânicas													
		A.N-Me.01	A.N-Me.02	A.N-Me.03	A.N-Me.04	A.N-Me.05	A.N-Me.06	A.N-Me.07	A.Me.01	A.Me.02	A.Me.03	A.Me.04	A.Me.05	A.Me.06	A.Me.07	A.Me.08	A.Me.09	A.Me.10	A.Me.11	A.Me.12	A.Me.13	
CAUSAS	Produção	C.P.01	0	2	0	0	0	1	0	0	2	0	0	2	0	1	0	0	2	0	0	0
		C.P.02	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
		C.P.03	0	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	2
		C.P.04	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		C.P.05	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
		C.P.06	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	1
		C.P.07	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		C.P.08	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	Projecto	C.D.01	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0
		C.D.02	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0
		C.D.03	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0
		C.D.04	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Instalação	C.I.01	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	1
		C.I.02	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	1	0	2	0	0	0	2
		C.I.03	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	2
		C.I.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		C.I.05	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
		C.I.06	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	Utilização	C.S.01	2	1	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		C.S.02	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C.S.03		0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	
C.S.04		0	0	0	0	2	0	0	1	2	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
C.S.05		0	0	0	0	1	0	2	0	1	1	0	0	2	0	1	0	0	2	0	0	

Ficha de anomalia

Nas fichas de anomalias individuais, reúne-se toda a informação resultante tanto da classificação e caracterização de anomalias como das relações anomalias - causas prováveis.

Estas fichas condensam a informação principal sobre cada anomalia e, com o objectivo de serem validadas no trabalho de campo, constituem um elemento fundamental no apoio à inspecção. A Figura 4 mostra uma das fichas correspondente à anomalia A.N-Me.01 - colonização biológica.

FICHA DE ANOMALIA - A.N-Me.01	
Designação da anomalia	
Colonização biológica	
Descrição da anomalia	
A colonização biológica consiste no aparecimento de matéria biológica (plantas, fungos, animais) à superfície de um elemento. Esta anomalia ocorre em zonas com elevada humidade ou permanentemente submersas.	
Possíveis causas	
- Condições ambientais com humidade elevada (C.S.01).	
- Condições ambientais de permanente imersão (C.S.01).	
Possíveis consequências	
- Alteração da aparência estética.	
- Redução das propriedades mecânicas (pela acumulação de humidade).	
Aspectos a inspeccionar	
- Área afectada.	- Exposição a radiação UV.
- Origem da humidade / água.	
Técnicas de inspecção	
- Inspeção visual (IM.01).	- Humidímetro (IM.08).
- Termografia (IM.04).	
Parâmetros de classificação	
- Valor estético do elemento.	- Área superficial afectada - A_f (%).
- Condição para progressão da anomalia (Y/N).	
Parâmetros de classificação	
0 - Colonização biológica pequena ($A_f < 20\%$).	
1 - Colonização biológica elevada ($A_f > 20\%$) e/ou elevada importância estética do elemento.	
Técnicas de reabilitação	
- Aplicação de protecção superficial (R.03).	
- Limpeza superficial (R.04).	

Figura 4: Ficha da anomalia A.N-Me.01 - colonização biológica.

Neste tipo de fichas, deve constar a seguinte informação:

- cabeçalho com a designação da anomalia, o seu nome e uma fotografia ilustrativa; descrição sumária das manifestações patológicas características da anomalia;
- causas prováveis para a ocorrência da anomalia;
- consequências possíveis da anomalia;
- aspectos a inspeccionar (características relacionadas com a anomalia detectada que podem vir a ter interesse no diagnóstico da mesma);
- ensaios a realizar *in-situ* (de forma a caracterizar a anomalia em termos de extensão, gravidade e estado de evolução);

- parâmetros de classificação (os quais podem ser resultantes dos ensaios efectuados e que permitem aferir o nível de gravidade da anomalia);
- nível de gravidade / urgência de intervenção, de acordo com a seguinte escala:
 - 0 - nível não preocupante: necessidade de acompanhar a evolução da anomalia;
 - 1 - nível médio-baixo de preocupação: necessidade de monitorizar a evolução da anomalia;
 - 2 - nível médio de preocupação: necessidade de intervenção num período de 12 meses;
 - 3 - nível médio-alto de preocupação: necessidade de intervenção num período de 6 meses;
 - 4 - nível muito preocupante: necessidade de intervenção imediata num período de 3 meses.
- técnicas de reabilitação aplicáveis à correcção da anomalia.

Caso de estudo - ETAR do Barreiro

A ETAR do Barreiro (Figura 5), inaugurada em 2011, serve os concelhos do Barreiro e da Moita, com aproximadamente 300.000 habitantes, recebendo as suas águas residuais num volume total de aproximadamente 18.000 m³/dia. Esta ETAR apresenta um total de 13 subestruturas constituídas por perfis e gradis em GFRP, duas das quais têm carácter estrutural principal, sendo as restantes 11 estruturas secundárias, correspondentes a guardas e escadas. Das estruturas inspeccionadas, cinco encontram-se no interior de edifícios e as restantes seis localizam-se no exterior. Das estruturas interiores, uma encontra-se em ambiente químico de agressividade elevada, duas em ambiente químico moderadamente agressivo e as restantes duas em ambientes considerados inertes. Todas as estruturas exteriores se encontram directamente expostas às condições ambientais, nomeadamente à radiação ultravioleta, visto não terem qualquer tipo de sombreamento directo. Em todas as estruturas inspeccionadas, não foi detectado qualquer tipo de protecção superficial. Para a inspecção realizada a esta ETAR, foi apenas utilizado o método de inspecção visual.



Figura 5: Vista aérea da ETAR do Barreiro (à esquerda, AdP; 2015); uma das subestruturas exteriores inspeccionadas (à direita).

A anomalia detectada com maior frequência foram as marcas superficiais (Figura 6 a), tendo sido possível detectar esta anomalia em todas as subestruturas; algumas situações tiveram origem na fase de fabrico e outras foram desenvolvidas na fase de utilização. A segunda anomalia mais detectada foi a perda de brilho (Figura 6 b), que ocorreu em todas as estruturas expostas à exposição solar, bem como nas estruturas em ambiente de agressividade química elevada e moderada. A terceira anomalia mais detectada foi o “*fibre blooming*” (Figura 6 b), que ocorreu em simultâneo com a perda de brilho em todas as estruturas expostas ao sol e na estrutura localizada em ambiente quimicamente mais agressivo. A relação entre ambas as anomalias era esperada, visto que a perda de brilho se deve à degradação da camada superficial de resina que, num estado suficientemente avançado, também dá origem ao aparecimento das fibras à superfície dos perfis (“*fibre blooming*”). Também foi possível registar um elevado número de situações de elementos metálicos de ligação corroídos (Figura 6 c). Tais situações, observadas pontualmente ao longo das várias estruturas,

devem-se à incorrecta selecção ou aplicação dos elementos metálicos. Foram ainda detectadas outras anomalias com pequena incidência, como a falha local de alguns elementos e de algumas ligações (Figura 6 d), fissuração, colonização biológica, ligações soltas, delaminação, manchas e vazios.

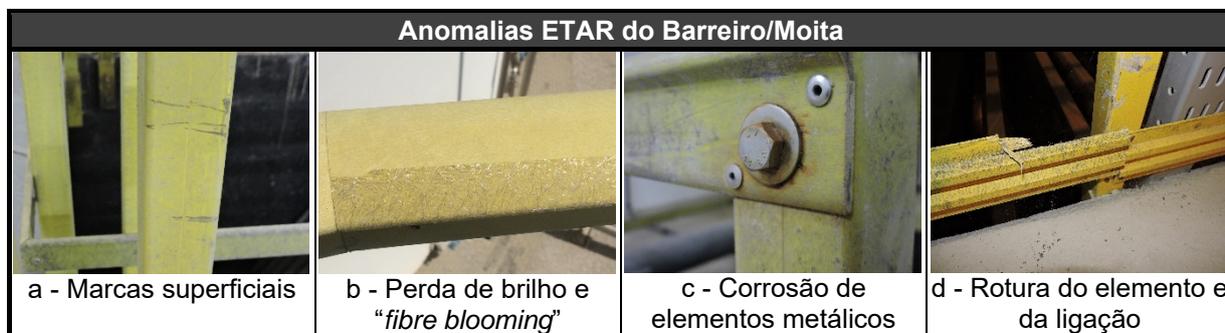


Figura 6: Exemplificação de anomalias detectadas na ETAR do Barreiro/Moita.

De um modo geral, considera-se que as estruturas inspeccionadas, com 5 anos de idade, apresentam um estado de conservação aceitável, necessitando apenas de pequenas operações de manutenção e reparação.

Considerações finais

Os resultados apresentados nesta comunicação representam uma parte do sistema de inspecção e diagnóstico que está presentemente a ser desenvolvido no âmbito da tese de doutoramento do primeiro autor. Nas fases seguintes deste trabalho, de forma a completar o sistema, serão incluídas as técnicas de inspecção e de reabilitação, bem como as matrizes de correlação anomalias - técnicas de inspecção, anomalias - técnicas de reabilitação e inter-anomalias.

Após o desenvolvimento do sistema, pretende-se proceder à sua validação através de uma extensa campanha de inspecções a estruturas de GFRP localizadas em diferentes zonas do País. Esta campanha de inspecções também permitirá realizar uma análise estatística sobre a incidência das diferentes anomalias e causas e fornecerá informação sobre o comportamento e durabilidade deste tipo de construções em condições de serviço.

Agradecimentos

O primeiro autor gostaria de agradecer o apoio financeiro dado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através da bolsa de doutoramento PD/BD/113640/2015, no âmbito do programa doutoral EcoCoRe. Os autores agradecem ao CERIS, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e às empresas Águas de Portugal, ALTO Perfis Pultrudidos e STEP.

Referências bibliográficas

- Águas de Portugal (AdP), 2015 - **Saneamento de águas residuais**. [Consult. 28 de Julho de 2016]. Disponível em <http://www.adp.pt/pt/?id=61&img=41&bl=6>
- BRITO, J. DE, 1992 - **Desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Obras de Arte em Betão**. Lisboa: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- CASTELO, A., 2014 - **Construções de emergência em zonas de catástrofe. Desenvolvimento de uma solução construtiva em materiais compósitos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.
- CORREIA, JR., 2008 - **GFRP Pultruded Profiles in Civil Engineering: Hybrid Solutions, Bonded Connections and Fire Behaviour**. Lisboa: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.

- EN 13706-2:2002 - **Reinforced plastic composites - Specifications for pultruded profiles - Part 2: Methods of test and general requirements**. Brussels: Comité Européen de Normalisation (CEN).
- GARCIA, J.; DE BRITO, J., 2008 - **Inspection and diagnosis of epoxy resin industrial floor coatings**. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 20(2), pp. 128–136.
- GARCEZ, N.; LOPES, N.; DE BRITO, J.; SISLVESTRE, J.D., 2012 - **System of inspection, diagnosis and repair of external claddings of pitched roofs**. Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 1034-1044.
- HARRIES, K.A.; PORTER, M.L.; BUSEL, J.P., 2003 - **FRP materials and concrete - Research needs**. Concrete International, vol. 65, pp. 69-74.
- KELLER, T., 2001 - **Recent all-composite and hybrid fibre-reinforced polymer bridges and buildings**. Progress in Structural Engineering and Materials, vol. 3, pp. 132-140.
- KELLER, T.; BAY, Y.; VALLÉE, T., 2007 - **Long-term performance of a glass fibre-reinforced polymer truss bridge**. Journal of Composites for Construction, vol. 11(1), pp. 99-108.
- KELLER, T.; THEODOROU, N.; VASSILOPOULOS, A.; CASTRO, J., 2015 - **Effect of natural weathering on durability of pultruded glass fibre-reinforced bridge and building structures**. Journal of Composites for Construction, vol. 20(1), pp. 04015025-1, 9.
- KHARBARI, V.M.; CHIN, J.W.; HUNSTON D.; BENMOKRANE B.; JUSKA T.; MORGAN R.; LESKO J.J.; SORATHIA U.; REYNAUD D., 2003 - **Durability gap analysis for fibre-reinforced polymer composites in civil infrastructure**. Journal of Composites for Construction, vol. 7, pp. 238-247.
- KNIPPERS, J.; GABLER, M., 2008 - **The FRP road bridge in Friedberg Germany – new approaches to a holistic and aesthetic design**, In Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering - CICE2008, Zurich, Switzerland.
- NOROG, 1997 - **Recommended Guidelines for NDT of GRP Pipe Systems and Tanks**. Norwegian Oil and Gas Association, Norway.
- SILVESTRE, J.D.; DE BRITO, J., 2009 - **Ceramic tiling inspection system**. Construction and Building Materials, vol. 23(2), pp. 653–668.
- TELANG, N.M.; DUMLAO, C.; MEHRABI, A.; CIOLKO, A.T.; GUTIERREZ, J., 2006 - **Report 564: Field Inspection of In-Service FRP Bridge Decks**. EUA: National Cooperative Highway Research Program, (NCHRP Report, 564).