

EXECUÇÃO E CONTROLO DE QUALIDADE DA REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA COM COLAS EPOXÍDICAS E FRPS

Helena Cruz, João Custódio

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

João Nascimento, Maria Empis

STAP, Portugal

RESUMO

Esta comunicação pretende dar conta da actividade que tem vindo a ser conduzida no âmbito do projecto europeu LICONS, relativa ao desenvolvimento de especificações para a concepção, a preparação e a realização de trabalhos de reforço local de estruturas de madeira com colas epoxídicas e varões. São discutidos alguns aspectos fundamentais relativos ao controlo de qualidade necessário a este tipo de intervenções, referindo-se o desenvolvimento de métodos de ensaio expeditos para avaliação preliminar da qualidade da cola em obra.

Apresenta-se ainda os resultados de ensaios preliminares de vigas reforçadas produzidas para avaliar a influência de alguns aspectos da execução dos trabalhos de reforço.

1. INTRODUÇÃO

A reparação e o reforço de estruturas de madeira tem um impacto económico e social crescente. A utilização de colas epoxídicas associadas a varões de aço ou perfis compósitos (FRPs), principalmente de fibras de vidro, constitui uma das técnicas de reforço ou consolidação mais interessantes e promissoras, dada a rapidez e o carácter pouco intrusivo do processo, que permite a manutenção das estruturas em serviço com o mínimo de substituição da estrutura original.

No entanto, a grande diversidade de produtos disponíveis no mercado (colas e FRPs), com diferentes características e exigências de aplicação, levanta frequentemente reservas à adopção desta técnica e dificuldades à sua implementação. Além da adequada selecção dos produtos e cuidada pormenorização face aos objectivos e especificidade do trabalho, deve prever-se mão-de-obra especializada e ser implementado um adequado plano de qualidade, tanto mais que a eficácia da intervenção depende em grande medida do cuidado posto na sua realização.

Dados os condicionamentos do trabalho em obra, com prazos de trabalho desejavelmente curtos e em que frequentemente se procura causar o mínimo de perturbação ao edifício e seus utilizadores, importa controlar a par e passo a qualidade do trabalho executado. É deste modo essencial dispor de ensaios expeditos que permitam detectar de imediato eventuais deficiências, conduzindo à entrada em serviço dos elementos reabilitados, de forma rápida mas fiável.

Em contraponto a numerosos estudos que têm procurado estabelecer a influência de pormenores construtivos, como sejam a geometria das furações ou rasgos (número, dimensões, comprimento, inclinação, posicionamento) a espessura da linha de cola, etc, o projecto europeu LICONS tem por objectivos principais o estabelecimento de regras de dimensionamento e de procedimentos de execução e controlo de qualidade capazes de garantir o adequado desempenho do sistema a curto e longo prazo.

O projecto europeu Craft: LICONS – “Low intrusion conservation systems for timber structures” (CRAF-1999-71216) é coordenado pela ROTAFIX (UK) e conta com a participação da STAP e do LNEC, entre outros. Este projecto respeita à reparação ou reforço de elementos estruturais de madeira, por métodos reduzidamente invasivos, recorrendo a resinas epoxídicas e materiais compósitos. Por ser essa uma das situações mais frequentes, o trabalho aqui apresentado centra-se na reparação de anomalias devidas a deterioração biológica da madeira na zona das entregas de vigas ou de asnas, que envolvam a substituição parcial do material original por madeira e/ou argamassas ou pastas epoxídicas.

2. CONTROLO DE QUALIDADE

A realização do trabalho de reforço ou reparação em obra é precedida por um conjunto de operações que passam pela inspecção cuidada da estrutura, com identificação clara do material a remover e concepção geral da intervenção, e pelo dimensionamento e pormenorização da ligação entre a madeira a manter e os materiais de reparação (madeira e/ou argamassa epoxídica, varões ou chapas de ligação, etc). Estes aspectos revestem-se de alguma complexidade e, embora fundamentais, não serão aqui desenvolvidos.

Na generalidade das situações será também necessário proceder a escoramentos, mantidos até a polimerização dos produtos epoxídicos, cortar grosseiramente e remover o material deteriorado bem como eventuais revestimentos que dificultem o acesso às peças a interencionar.

Concluídas essas operações, será a vez da aplicação dos materiais de reforço, durante a qual haverá que controlar um conjunto de aspectos, que são determinantes para a eficácia do sistema, a resistência e a durabilidade da estrutura.

Muitos dos aspectos seguidamente referidos, por serem aparentemente óbvios, são frequentemente deixados ao discernimento dos operários. Não só essa abordagem poderá conduzir a erros ou omissões, por vezes com implicações graves, como limita a possibilidade de identificar *à posteriori* a origem de eventuais anomalias por falta de registo de condições particulares da realização do trabalho.

Além de uma formação adequada dos executantes, que os sensibilize para as implicações decorrentes de procedimentos inadequados, ou do não cumprimento de regras de segurança, é imprescindível a elaboração e implementação de um Plano da Qualidade, completo mas o mais simples e objectivo possível.

O Plano de Qualidade visa garantir a verificação sistemática de todas as variáveis do trabalho susceptíveis de comprometer a eficácia do sistema, nomeadamente:

2.1. Materiais

- Verificação dos componentes da cola (ou pasta ou argamassa), que deverão estar nas suas embalagens de origem, fechadas e dentro do prazo de validade.

Sendo as colas epoxídicas produtos obtidos pela mistura de resina epoxídica e do endurecedor, o respeito rigoroso pelas proporções estabelecidas é fundamental para garantir uma polimerização completa e características mecânicas adequadas; deste modo, embalagens com sinais de entorna devem ser rejeitadas, sendo pela mesma razão aconselhada a abertura das embalagens imediatamente antes da preparação da mistura e a utilização de todo o seu conteúdo, devendo ser pedidas ao fornecedor embalagens (“kits”) com o volume adequado ao trabalho a realizar.

Alguns produtos comerciais são fornecidos de forma a que um dos componentes pode ser vertido para dentro da embalagem do outro componente, dispensando assim um recipiente próprio para realizar a mistura. Se não for este o caso, é preciso prever recipientes apropriados, não reutilizáveis ou que sejam apenas usados para esse efeito, sendo de evitar eventuais limpezas com produtos que poderão vir a contaminar a cola. No caso dos equipamentos de mistura e injeção, tal não é possível, devendo promover-se a sua limpeza antes do endurecimento da mistura com os diluentes recomendados pelo fabricante.

- Tipo, geometria, dimensões dos perfis compósitos ou dos varões de aço e respectiva limpeza e preparação

A fim de maximizar a aderência dos varões, réguas ou “fitas?” de compósito, imediatamente antes da sua colocação, devem ser submetidos a tratamento abrasivo com lixa fina seguido de limpeza com acetona.

No caso de varões de aço, deve fazer-se tratamento semelhante mas recorrendo preferencialmente a jacto de areia (ou com escova de aço) seguido de desengorduramento com acetona. Em alternativa, podem usar-se varões de aço previamente revestidos com primário.

- Espécie, dimensões, teor em água, estado de limpeza e de superfície da madeira a utilizar como cofragem perdida ou como prótese no trabalho de reparação/reforço da estrutura

A madeira deve ter um teor em água compatível com a colagem (geralmente abaixo de 16%, dependendo do produto em causa) mas não excessivamente baixa face às condições ambientais do local, para minimizar as variações dimensionais após a realização do trabalho.

A escolha da madeira a utilizar prende-se com factores como sejam o aspecto, tanto quanto possível semelhante ao do elemento a reparar, a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e a durabilidade natural ou tratabilidade.

Sendo as intervenções deste tipo geralmente motivadas pela deterioração da madeira original por agentes biológicos associados à presença de humidade (fungos de podridão ou térmitas subterrâneas) não deve ser perdido de vista o eventual risco de reincidência dos problemas. Embora muitas vezes a resolução das deficiências da cobertura, rebocos ou canalizações, que permitiram a humedificação da madeira, seja suficiente para sustentar a progressão da deterioração, não deve ser esquecido que grossas paredes de alvenaria ou vigas de madeira podem demorar a secar após a erradicação da fonte de entrada de água, o que permitirá a progressão da degradação para além da obra e a deterioração da madeira introduzida na reparação. Por esse motivo, pode ser preferível optar por espécies de madeira com maior durabilidade natural ou, em alternativa, por uma madeira que embora pouco durável possa ser tratada previamente, em profundidade, com produtos preservadores adequados.

- Características e estado de conservação de outros produtos a utilizar no trabalho, como sejam a pasta de colagem usada para a selagem de fendas ou de juntas, antes de injectar ou verter a mistura epoxídica ou do silicone usado para a selagem da cofragem ou da prótese ao elemento a reparar

Sendo a pasta de colagem um produto obtido pela mistura de resina epoxídica e do endurecedor, devem ser tidos os mesmos cuidados e seguidos procedimentos idênticos aos das colas (ou pastas ou argamassas).

O silicone é um adesivo temporário e encontra-se pronto a usar. Deverá ter-se em conta que quanto mais húmida estiver a superfície de aplicação mais rápida é a polimerização.

2.2. Execução

- Integridade da madeira a conservar na zona da ligação, geometria das furações e do corte (bom ajustamento entre a madeira antiga e os elementos a introduzir, cofragem ou prótese)

É desejável que toda a madeira deteriorada seja removida por forma a que a ligação entre a madeira velha e o material novo seja sólida e durável. Embora a delimitação dos estragos deva ter sido feita numa fase anterior à execução do reforço, e sumariamente confirmada após o seccionamento do elemento, é importante verificar que o corte de pormenor e a abertura de entalhes, feita imediatamente antes da colagem, não expuseram madeira afectada.

Por outro lado, a geometria prevista para os cortes, entalhes e furações deve ser cuidadosamente respeitada, sob pena de dificultar a montagem do sistema ou de obter espessuras de cola inadequadas, o que se traduzirá inevitavelmente na perda de eficiência do sistema.

- Estado da superfície e limpeza da madeira a conservar na zona da ligação

No corte do extremo deteriorado do elemento de madeira deverá ser utilizada uma serra eléctrica com a lâmina em bom estado por forma a garantir a regularidade e a rectidão do corte a realizar. Deverá ainda permitir que o corte não produza temperaturas excessivas capazes de provocar danos na madeira.

Na abertura de furos e entalhes deverá ser utilizada uma broca apropriada para a furação em madeira e com o diâmetro especificado no projecto. Deverá ser utilizado equipamento eléctrico de furação por rotação.

A preparação (corte e/ou lixagem) das superfícies deve ter lugar imediatamente antes da aplicação da cola, recomendando-se que tenha lugar dentro das 24h em que a cola é aplicada. Este aspecto é ainda mais crítico no caso de madeiras muito densas, resinosas ou com extractivos, já que pode afectar de forma drástica a qualidade da colagem.

Embora possa ser recomendável o tratamento preservador da madeira deixada no local, deve evitar-se, pela mesma razão, a aplicação de produto preservador nas superfícies de colagem, o que requereria, além disso, um período de secagem subsequente.

As superfícies de colagem (cortes e furos) devem ser cuidadosamente limpas de estilhas e poeira, para o que deve ser disponibilizado um aspirador industrial com bico e uma pistola de pressão de ar.

- Condições ambientais que, face às condições de trabalho especificadas pelo fabricante, possam determinar a necessidade de cuidados específicos ou desaconselhar a realização do trabalho

Por exemplo, uma temperatura demasiado baixa pode impedir a polimerização da cola, podendo ser contornada com o aquecimento local dos materiais ou do ambiente; pelo contrário, temperatura ambiente elevada geralmente reduz de forma drástica o tempo de trabalho, pelo que é aconselhável a sua execução às primeiras horas da manhã, a preparação de volumes de cola tão pequenos quanto possível e eventualmente o arrefecimento prévio dos componentes da cola antes de proceder à mistura.

Os equipamentos de mistura e injeção deverão ser os recomendados pelo fabricante dos produtos epoxídicos. A mistura perfeita dos componentes é de tal modo importante que, frequentemente, os fabricantes coram um dos componentes do produto, por forma a facilitar a detecção visual de uma mistura incompleta.

Tabela 1 – Vigas ensaiadas

Viga	Perfil do compósito	Emenda de topo	
1	Chapas	45°	Colada
2			Aberta
3		90°	Colada
4			Aberta
5	Varões	45°	Colada
6			Aberta
7		90°	Colada
8			Aberta

As vigas assim constituídas (com dimensões aproximadas: 1000mmx175mmx50mm) foram sujeitas à flexão em 3 pontos, simplesmente apoiadas sobre um vão de 900mm. As especificações da EN 408 foram seguidas, excepto no que se refere à geometria, em resultado do reduzido comprimento das vigas. O módulo de elasticidade global foi determinado sobre um troço recto definido entre 0.1 e 0.4 da força máxima, embora se apresente o registo de deslocamentos até à rotura, dado que a rigidez e a resistência foram avaliados num mesmo ensaio.

3.2. Resultados

Os diagramas força – flecha a meio vão são apresentados na figura 2, os resultados na tabela 2.

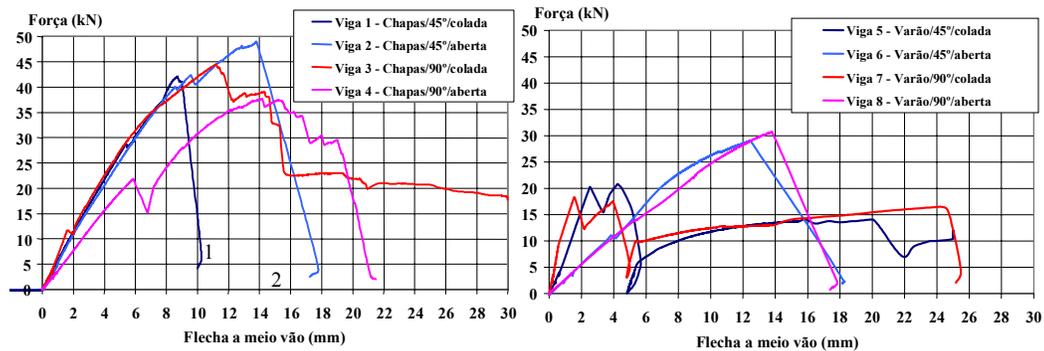
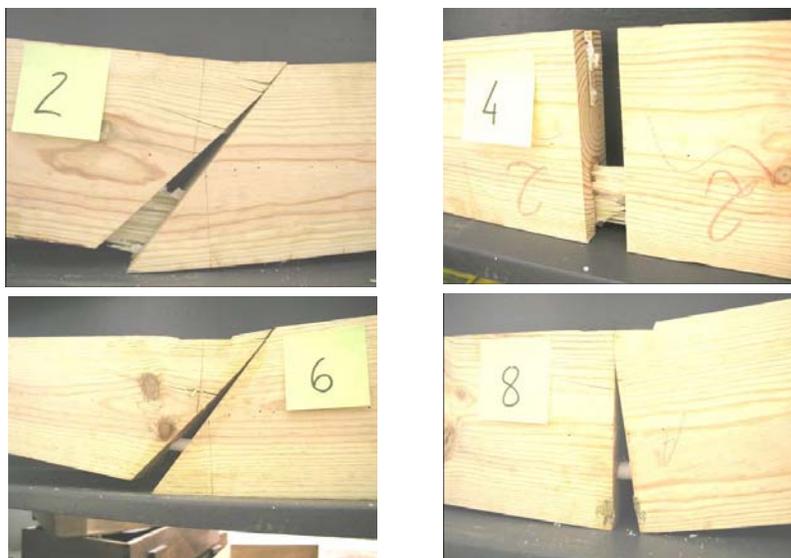


Figura 2 – Diagramas força – flecha a meio-vão

Tabela 2 – Resultados

Vigas	F_{max} (kN)	$E_{m,g}$ (MPa)
1	42.12	3718
2	49.02	3512
3	44.47	3888
4	37.67	2729
5	20.83	5335
6	29.03	1768
7	18.13	-
8	30.76	1793

As figuras 3 a 6 mostram as vigas (ligações) ensaiadas e alguns pormenores da zona de rotura.



Figuras 3 a 6 – Ligações após ensaio

3.3. Discussão dos resultados experimentais

Estes resultados devem ser encarados com reserva e não generalizados uma vez que dizem respeito apenas a uma viga de cada tipo. Em todo o caso, e dentro das condições de ensaio, ressaltam as seguintes observações:

No caso das ligações envolvendo varões, verifica-se um comportamento totalmente distinto entre as que têm emenda de topo colada e aquelas em que a junta ficou aberta (sem cola): as primeiras apresentando maior rigidez e menor resistência que as segundas. Em contrapartida, o comportamento da ligação não parece ser afectado pela geometria dessa junta (45° ou 90°).

As ligações realizadas com chapas (além de apresentarem maior resistência que as ligações realizadas com varões), aparentam ser menos sensíveis à variação dos parâmetros analisados: ângulo de corte da junta de topo e respectiva colagem. Há apenas um pequeno indício de que a geometria da junta de topo (45° ou 90°) poderá ser mais determinante do tipo de comportamento do que a presença/ausência de cola na junta.

As ligações feitas com varões romperam pela ligação cola-varão. Já no caso das ligações com chapas, estas romperam em tracção, em simultâneo com rotura adesiva entre a cola e a chapa e rotura da madeira em tracção nessas imediações.

4. NOVOS ENSAIOS EXPEDITOS PARA CONTROLO DE QUALIDADE

A Subcomissão 1 (Adhesives for wood and derived timber products) da Comissão Técnica 193 do Comité Europeu de Normalização (CEN/TC 193-Adhesives), foi recentemente re-estruturada dando origem a onze grupos de trabalho (WGs), um dos quais dedicado ao tema da colagem em obra e do restauro ou reforço de estruturas de madeira em serviço (WG11 – Adhesives for on-site assembly or restoration of timber structures).

Tendo em vista o controlo de qualidade da execução dos trabalhos de reparação por colagem, este grupo de trabalho está a desenvolver os seguintes projectos de norma europeia (ainda sem número atribuído).

- Adhesives for on-site assembling or restoration of timber structures – On-site acceptance testing – Part 1: Sampling and measurement of the adhesive’s cure schedule.
- Adhesives for on-site assembling or restoration of timber structures – On-site acceptance testing – Part 2: Verification of the shear strength of an adhesive joint.
- Adhesives for on-site assembling or restoration of timber structures – On-site acceptance testing – Part 3: Verification of the adhesive bond strength using tensile proof-loading.

4.1. Curva exotérmica

A Parte 1da norma (Sampling and measurement of the adhesive’s cure schedule) especifica um método e os requisitos para o ensaio em obra para aceitação de colas, mediante a verificação da mistura no local de lotes individuais de cola. Esta norma destina-se a constituir um método fiável de avaliação da mistura da cola dentro de um processo de colagem específico e os resultados estão intimamente relacionados com as condições particulares do local, especialmente a temperatura e a humidade.

Importa salientar que o método de ensaio preconizado, aplicável a colas epoxídicas multi-componentes e a algumas colas à base de poliuretano, não se destina à aprovação de colas nem à aprovação do método de reparação ou dos elementos reparados.

A progressão da cura é seguida pela curva de libertação de calor e pela temperatura máxima atingida por um determinado volume de cola mantido isolado termicamente.

Imediatamente após a mistura da cola, enchem-se recipientes plásticos descartáveis com 20cl cada, inseridos num contentor apropriado que os isola termicamente. A cura é monitorizada por meio de termopares que são inseridos em contacto com a cola durante a cura e ligados a um sistema de aquisição da dados. A temperatura ambiente é também registada e a

exotérmica da cura é comparada com curvas de referência providenciadas pelo fornecedor da cola, permitindo detectar eventuais problemas numa fase muito precoce.

4.2. Resistência ao corte

A Parte 2 da norma (Verification of the shear strength of an adhesive joint) estabelece um método e os requisitos para a verificação da resistência ao corte pela junta colada.

A resistência ao corte da junta colada é medida em ensaios de corte por compressão, antes e após um ensaio de envelhecimento acelerado. Os provetes são colhidos em obra em simultâneo com a aplicação da cola na estrutura. Os resultados são avaliados mediante a comparação entre a resistência ao corte da junta colada e a da madeira, medidas sobre os mesmos provetes.

A junta colada é fabricada em obra a partir da colagem de duas réguas de madeira com cerca de 900mmx65mmx30mm, uma das quais apresenta um rebordo com espessura adequada às especificações da cola, o qual garante a espessura pretendida para a camada de cola nos provetes. A madeira usada é, em princípio, da mesma espécie da usada na estrutura e a preparação das superfícies e aplicação da cola devem representar os processos seguidos na obra. Cada uma destas colagens deve originar 10 provetes, metade dos quais é submetida ao envelhecimento acelerado, que inclui vários ciclos de impregnação com água à temperatura ambiente seguida por secagem a cerca de 60°C.

4.3. Arrancamento

A Parte 3 da norma (Verification of the adhesive bond strength using tensile proof-loading) especifica um método para ensaio de carga de varões colados, unicamente no âmbito dos ensaios em obra para aceitação de um lote de cola. Os requisitos para aceitação devem ser especificados pelo projectista. A resistência da colagem é medida aplicando uma força de tracção ao varão colado. O ensaio é feito em obra, imediatamente após o período mínimo de cura especificado pelo fabricante, registando-se as condições ambientais durante esses período.

O número de ensaios é especificado pelo projectista. O ensaio pode ser conduzido sobre a própria estrutura ou num elemento à parte, considerado representativo do material da estrutura. Os varões são normalmente inseridos em furos com diâmetro superior ao do varão, onde foi colocada a cola, ficando saliente em relação à madeira pelo menos 240mm para permitir acomodar o equipamento de ensaio – um macaco hidráulico portátil.

O ensaio consiste na aplicação de forças de arrancamento com incrementos de 20% da força nominal especificada, com tempo de espera de pelo menos 20 segundos entre patamares, registando-se as eventuais perdas de carga em cada um dos incrementos. Caso ocorra uma perda de carga antes de se atingir a força especificada, o ensaio é interrompido.

5. CONCLUSÕES

A eficácia e a durabilidade de intervenções de reforço envolvendo colas epoxídicas dependem naturalmente da escolha dos produtos, que devem ser adequados ao tipo de trabalho e às condições ambientais durante e após a conclusão da obra.

Dependem também da pormenorização das ligações. Como se exemplificou, pequenas variações de geometria ou de execução, quer sejam intencionais ou acidentais, podem traduzir-se em diferenças significativas de desempenho das ligações; a influência dessas variações será distinta caso a caso, podendo no entanto ser estimada quantitativamente.

A qualidade da execução do trabalho é, talvez, o factor mais crítico. A intervenção de diversos operários, com formação e temperamento distintos, e a necessidade de obedecer a ritmos de trabalho relativamente apertados – impostos por prazos de preparação das superfícies e tempos de trabalho da cola – recomendam a implementação de um Plano de Qualidade que garanta a realização das diversas operações da forma prevista.

Por último, e porque os imprevistos também podem ocorrer, importa dispor de meios expeditos de controlo da execução, em particular os relacionados com a mistura da cola e com as suas características, passível de implementar em obra no âmbito do Plano de Qualidade. A especificação de métodos de ensaio rápidos, fáceis e significativos não é tarefa fácil, já que as características da junta colada dependem de numerosos factores inter-actantes (Cruz, 2003). No entanto, o meio técnico disporá dentro de algum tempo de métodos de ensaio que traduzem um bom compromisso entre os aspectos referidos e certamente serão uma ferramenta útil para promover a qualidade e a fiabilidade requeridas.

6. AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado foi elaborado no âmbito do projecto europeu Craft: LICONS – “Low intrusion conservation systems for timber structures” (CRAF-1999-71216). Participam neste projecto as seguintes entidades: ROTAFIX (UK), coordenador; ECC Timber Engineering Ltd (UK), Assechement de Murs et Traitement des Charpentes (AMTC) SRL (F); STAP – Reparação, Consolidação e Modificação de Estruturas SA (P); La Bottega del Restauro SRL (I); TRADA Technology Ltd (UK); Oxford Brookes University (UK); Université Bordeaux (F); LegnoDoc (I) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (P).

Informação sobre o projecto pode ser encontrada em :

<http://research.tlchiltern.co.uk/licons/pages/members.htm>

6. REFERÊNCIAS

- CEN TC 193/SC1/WG11(2003) – “Adhesives for on-site assembling or restoration of timber structures – On-site acceptance testing:
- Part 1: Sampling and measurement of the adhesive’s cure schedule. Doc. N20;
 - Part 2: Verification of the shear strength of an adhesive joint. Doc. N21;
 - Part 3: Verification of the adhesive bond strength using tensile proof-loading. Doc. N22”.
- CEN – EN408 (1995) – “Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties”.
- Cruz, H; Machado, J Saporiti (2003) – “Epoxy resins used for the repair of timber structures. The problem of short and long-term performance evaluation”. 8th International Conference on Structural Studies and Maintenance of Heritage Architecture (STREMAH 2003). Maio, Halkidiki, Grécia
- Cruz, H; Baptista, A M (2003) – “Trial evaluation of structural timber joints made with epoxy adhesives and FRPs”. LNEC, NT12/03-NEM; NT60/03-NCE.
- STAP, SA (2004) – “Plano da Qualidade PQ 6 L 001 – Execução de ligações entre peças de madeira de construções existentes tendo em vista a sua reparação e/ou reforço, por processo reduzidamente invasivo, recorrendo a resinas epoxídicas e a materiais compósitos”.