



João André Costa Sena Martins

COMPORTAMENTO DE VARÕES COLADOS EM MADEIRA DE CASTANHO (*CASTANEA SATIVA* MILL.)

BEHAVIOUR OF GLUED-IN RODS IN CHESTNUT TIMBER (*CASTANEA SATIVA* MILL.)

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão

Coimbra, 19 de Janeiro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

João André Costa Sena Martins

Comportamento de Varões Colados em Madeira de Castanho (*Castanea Sativa* Mill.)

Behaviour of Glued-in Rods in Chestnut Timber (*Castanea Sativa* Mill.)

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 19 de Janeiro de 2018

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação compreendeu vários meses de trabalho e dedicação, cheios de desafios, desilusões, alegrias e algumas conquistas. Este percurso contou com a participação de várias pessoas que, direta ou indiretamente, tornaram possível a conclusão de mais uma etapa na minha vida. A elas dirijo as seguintes palavras de gratidão.

Ao Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão agradeço a brilhante orientação, os ensinamentos vários, a permanente disponibilidade e o companheirismo demonstrado. A confiança que sempre me transmitiu foi essencial em todo este percurso, impedindo que o desalento se instalasse mesmo nos momentos mais difíceis. O meu obrigado por tudo, professor.

À Direção do SerQ – Centro de Inovação e Competências da Floresta, por facultar as suas instalações para a realização de ensaios experimentais, e ao André Marques por toda a ajuda e apoio prestado, deixo um sincero agradecimento.

Ao Dr. Dave Smedley, pela a sua afabilidade, disponibilidade e experiência, e à Rotafix Lda, que gentilmente disponibilizou os seus produtos os quais, infelizmente, acabei por não poder utilizar, por incompatibilidade com o apertado prazo de conclusão do trabalho experimental.

À SIKA Portugal, que atenciosamente disponibilizou os seus produtos, e ao eng^o Marco Gomes, pela disponibilidade e esclarecimentos prestados, deixo também um profundo agradecimento.

Aos meus familiares mais próximos, um enorme bem-haja, porque este trabalho tem um pouco de todos vós.

RESUMO

A crescente aplicação, em estruturas de madeira, de ligações com varões colados ou *glued-in rods* (GiRs), como são conhecidos na terminologia anglo-saxónica, e a falta de regulamentação europeia têm promovido um acréscimo da investigação deste tema. Este tipo de ligações não integram a versão em vigor do Eurocódigo 5, sendo o tema, por esse motivo, considerado prioritário na revisão em curso. Este documento pretende contribuir para a definição de um método de dimensionamento comum, pese embora existam vários propostos na literatura. Neste sentido, foi realizado um estudo comparativo entre vários métodos, do qual se verificou que as diferenças entre eles são evidentes, revelando grandes amplitudes de valores estimados de resistência. Existem métodos demasiadamente conservadores e métodos bastante inseguros, sendo o método proposto num *draft* de 2003 do Eurocódigo5 o que melhor se ajusta a cerca de 100 resultados experimentais comparados afigurando-se, por isso, o mais adequado para o dimensionamento destas ligações.

A investigação realizada tem sido maioritariamente conduzida sobre espécies resinosas, porque são as de utilização mais frequente em estruturas de madeira novas, particularmente visadas pela técnica. No entanto, esta apresenta também interesse para trabalhos de reabilitação de estruturas antigas, nas quais foram frequentemente usadas madeiras de folhosas e, particularmente em Portugal, de Castanho. Neste sentido, para verificar a possibilidade da utilização de GiRs nestas situações, e expandir a informação relativa ao seu comportamento com madeiras folhosas em geral, foram ensaiados ao arranque cerca de 40 provetes de varões colados em madeira de Castanho nova e antiga. Complementarmente foram determinadas algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira utilizada para melhor interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de arranque. Este trabalho concluiu que a madeira de Castanho antiga apresenta propriedades mecânicas semelhantes às da nova resultando, assim, em cargas de rotura nos ensaios de arranque idênticas, o que comprova a viabilidade desta solução em trabalhos de reabilitação. À falta de métodos de dimensionamento específicos para espécies folhosas, foram também comparadas as estimativas fornecidas por alguns métodos concebidos com base em madeiras resinosas, com os resultados experimentais obtidos. Estes revelaram uma concordância razoável com os resultados, embora não demonstrando total segurança.

ABSTRACT

The increasing application of glued-in rods (GiRs) in timber structures connections, and the lack of european regulation, have geared an increase in research on this topic. Currently, this type of connections is not dealt with in Eurocode 5, therefore the topic is considered a priority in the ongoing review. This document seeks to contribute to the definition of a common design method, although there are several proposals in the literature. In this sense, a comparative study between various methods was carried out, from which the differences between them became evidente, showing large amplitudes of the estimated strength values. There are overly conservative methods and quite insecure methods, the method proposed in a 2003 draft of Eurocode 5 being the one that best fits to about 100 compared experimental results appearing to be, therefore, the most suitable for the design of these connections.

The existing results concern mostly research carried out on softwood species, because these are the most frequently used in new timber structures, particularly targeted by the technique. However, it is also of interest for rehabilitation works on old structures, in which hardwoods and, particularly in Portugal, Chestnut timber have been frequently used. In this sense, to assess the possibility of using GiRs in these situations, and to expand the information regarding their behaviour with hardwoods in general, about 40 specimens of GiRs in new and old Chestnut timber were tested at pull out. In addition, for better interpretation of the obtained results in the pull out tests, some physical and mechanical properties of the used timber were determined. This work concluded that the old Chestnut timber exhibits similar properties to the new one, resulting in identical pull-out loads, proving the viability of this solution in structural rehabilitation. In the absence of specific design methods, the estimates provided by some softwood based methods were also compared to the experimental results obtained. These showed a reasonable agreement with the results, however they did not demonstrate complete safety.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1 Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Âmbito e Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Aplicações de varões colados em estruturas de madeira	5
2.2 Mecânica de varões colados	6
2.3 Materiais	8
2.3.1 Elemento de madeira	8
2.3.2 Varão	8
2.3.3 Cola estrutural	9
2.4 Parâmetros influentes na resistência ao arranque de um varão isolado	10
2.4.1 Diâmetro do varão	10
2.4.2 Comprimento de colagem.....	10
2.4.3 Espessura da linha de cola	11
2.4.4 Distância do centro do varão ao bordo livre da madeira	11
2.4.5 Massa volúmica da madeira	12
2.4.6 Teor de água da madeira.....	13
2.4.7 Temperatura.....	13
2.4.8 Ângulo força-fio	15
2.5 Configurações de ensaio	15
2.6 Modos de rotura	16
2.7 Métodos de dimensionamento	17
2.8 Conclusões do Estado da Arte	21
3 Trabalho Experimental.....	23
3.1 Considerações iniciais.....	23
3.2 Determinação da resistência ao arranque de varões isolados colados	23
3.2.1 Materiais	23
3.2.2 Produção dos provetes	25

3.2.3	Ensaaios experimentais	29
3.3	Determinação do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão	32
3.3.1	Produção dos provetes	32
3.3.2	Ensaaios experimentais	34
3.4	Determinação do teor de água e da massa volúmica	35
3.4.1	Produção dos provetes	35
3.4.2	Ensaaios experimentais	35
3.5	Conclusões do Trabalho Experimental	36
4	Apresentação e Análise de Resultados	37
4.1	Considerações iniciais	37
4.2	Comparação entre métodos de dimensionamento de varões colados	37
4.3	Determinação da resistência ao arranque de varões isolados colados	46
4.4	Determinação do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão	53
4.5	Determinação do teor de água e da massa volúmica	57
4.6	Conclusões da Apresentação e Análise de Resultados	59
5	Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros	61
	Referências Bibliográficas	63
	Anexos	A-1
	Anexo A – Repartição e Nomenclatura dos provetes de varões colados	A-1
	Anexo B– Dimensões das peças de ensaio à flexão	A-2
	Anexo C– Dimensões das peças para determinação do teor de água	A-3
	Anexo D– Comparação entre métodos de dimensionamento de GiRs.	A-4
	Anexo E– Resultados experimentais da determinação do módulo de elasticidade e da resistência à flexão	A-8
	Anexo F– Resultados experimentais da determinação do teor de água e massa volúmica.	A-9

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As ligações coladas em estruturas de madeira são utilizadas há décadas com o propósito de conceber ligações rígidas, que possibilitem a transmissão de forças e momentos entre elementos. O exemplo mais frequente deste tipo de ligações é o de entalhes múltiplos (*finger-joints*), incontornável na produção de madeira lamelada colada. Os varões colados no interior de elementos de madeira ou *glued-in rods* (GiRs), como são conhecidos internacionalmente, constituem um outro tipo de ligações coladas extensivamente utilizado por grandes empresas europeias de construção em madeira. Na Figura 1.1- a), é visível parte da estrutura de uma conhecida construção em madeira situada na Malásia (*MTIB building*), concluída em 2011, que incluiu a aplicação de ligações com varões colados (Figura 1.1- b)).

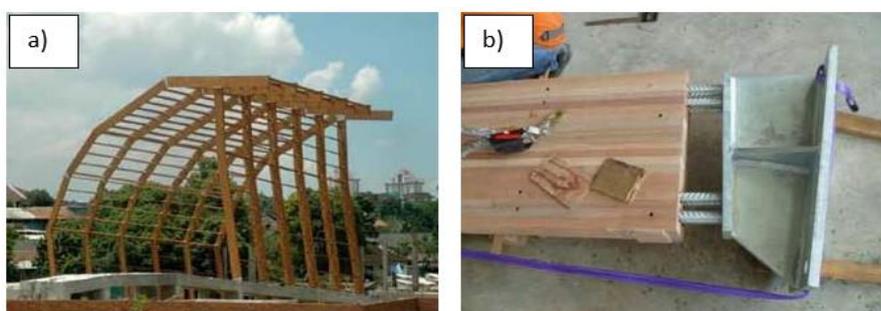


Figura 1.1- Estrutura do *MTIB building* (Malásia) a). Pormenor de ligação com GiRs b).
(Rotafix@, 2017b).

Este tipo de solução diferencia-se das ligações convencionais, como as entalhadas ou com ligadores tipo cavilha, fundamentalmente porque permite conceber ligações rígidas e de elevadas resistências mecânicas. Adicionalmente, é também uma solução bastante versátil, podendo ser aplicada em diversas configurações, apresenta um bom comportamento ao fogo e não interfere visualmente com a estrutura, caso os varões e a cola se encontrem inseridos na madeira. No entanto, tal como na generalidade das ligações coladas, este tipo de soluções requer a utilização de mão-de-obra especializada e um controlo de qualidade rigoroso, para que seja garantida a fiabilidade adequada às aplicações estruturais.

A investigação relativa a varões colados (GiRs) em madeira teve início nos anos 80 com o trabalho pioneiro de Riberholt (Riberholt, 1986) (Riberholt, 1988), e subsiste até ao presente. A complexidade da análise comportamental conjunta dos três materiais envolvidos neste sistema de ligação (madeira, varão e cola) traduz-se, ainda hoje, numa insuficiente compreensão do seu comportamento. Por este motivo, embora as aplicações práticas envolvam geralmente vários ligadores, como ilustrado na Figura 1.1- b), e o funcionamento do conjunto careça em si mesmo de investigação, a maior parte do trabalho teórico e experimental realizado tem-se dedicado, para efeitos de simplificação do problema, ao estudo do comportamento de um ligador isolado (Tlustochowicz *et al*, 2011). Para o sistema de ligação em causa, este comportamento depende essencialmente da resistência axial de tração (resistência ao arranque) do varão colado, uma vez que o eventual momento aplicado à ligação é traduzido pela soma dos momentos das forças axiais geradas nos ligadores.

Embora esta técnica tenha vindo a ser desenvolvida ao longo de mais de 30 anos, e apesar de existirem algumas regras consagradas a nível nacional em alguns países-membros do Comité Europeu de Normalização (CEN), continuam por aprovar normas de dimensionamento comuns, o que tem colocado a pressão do lado da comunidade técnica e científica e levado à intensificação da investigação deste tema. Após a inclusão de regras básicas de dimensionamento na versão de 1997 do Eurocódigo 5, parte 2 (CEN, 1997), a falta de acordo no processo de revisão de 2003 levou a que esse tópico fosse removido, sem substituição, do documento final. Por essa razão as ligações com GiRs não são cobertas pela atual versão desta Norma Europeia, pelo que o tema é considerado prioritário na revisão atualmente em curso, que deverá terminar em 2020.

1.2 Âmbito e Objetivos

A falta de regulamentação comum aos países-membros do CEN tem dificultado o uso generalizado de ligações com GiRs em estruturas de madeira. O esforço de normalização em curso, em sede da TC250/SC5, que detém o mandato europeu de revisão do Eurocódigo 5, tem como base os métodos existentes de dimensionamento deste tipo de ligações, alguns dos quais adotados a nível nacional em alguns países, resultantes de trabalhos de investigação conduzidos ao longo dos últimos 30 anos. No entanto, a diversidade de propostas apresentadas é considerável, dificultando a síntese num método comum.

Neste estudo, apresentam-se os métodos de dimensionamento mais relevantes disponíveis na literatura, e realiza-se uma análise comparativa com vista a identificar as principais diferenças entre eles, bem como a estimar quais os mais e menos conservadores para a utilização prática, contribuindo, assim, para a definição de um método comum.

A grande maioria dos trabalhos existentes sobre varões colados, incluindo as abordagens de dimensionamento propostas, foi conduzida sobre madeira de resinosas, visto serem estas as de utilização mais frequente em construções novas, para as quais este sistema de ligação foi originalmente concebido. No entanto, as espécies folhosas surgem com grande regularidade em estruturas antigas, nomeadamente em países do Centro e Sul da Europa, o que torna relevante a sua inclusão no estudo de varões colados para a condução de trabalhos de reabilitação de estruturas existentes e/ou antigas. Concretamente no âmbito da reabilitação é escasso o trabalho publicado e, quando existente, é mais focado na utilização do conceito de varões colados e não no estudo do comportamento deste sistema de ligação propriamente dito (Negrão, 2016) (Negrão *et al*, 2016). Por outro lado, como referido, são também escassos os resultados relativos ao desempenho de ligações com GiRs em madeiras de folhosas. O trabalho de Chans *et al* (2010a) é um desses raros estudos, mas foca-se numa madeira folhosa tropical de muito alta densidade, pouco utilizada em aplicações estruturais, tanto quanto se sabe.

Objetivando a melhoria do conhecimento do comportamento de ligações com varões colados em madeiras folhosas no geral, e concretamente em contextos de reabilitação estrutural, com particular atenção ao efeito da eventual degradação da madeira antiga por agentes biológicos, foi realizado um trabalho experimental com provetes de varões colados em madeira nova (proveniente diretamente de serração) e em madeira antiga (proveniente de obras de reabilitação e/ou demolição) de Castanho (*Castanea sativa* Mill.), uma espécie folhosa frequentemente encontrada em construções antigas, nomeadamente no Centro e Norte de Portugal. Complementarmente, e com a mesma finalidade, pretende averiguar-se se alguns dos métodos de dimensionamento disponíveis na bibliografia, concebidos com base em estudos conduzidos sobre espécies resinosas, são ou não adequados para aplicação a madeiras de folhosas, particularmente em situações de reabilitação.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, que pretendem dividir de uma forma lógica e sequencial a informação apresentada. Neste primeiro capítulo é realizado um enquadramento geral do tema varões colados (GiRs) em estruturas de madeira e, posteriormente, é contextualizado e justificado todo o trabalho desenvolvido, bem como apresentados os principais objetivos que este se propôs atingir.

No segundo capítulo é apresentado o Estado da Arte de varões colados em estruturas de madeira. São abordados temas como as principais aplicações desta técnica, os materiais mais utilizados, o princípio mecânico de GiRs e os parâmetros que presumivelmente influenciam a sua resistência, as configurações de ensaio mais utilizadas (variadas, em virtude da falta de regulamentação), os modos de rotura frequentes e alguns dos métodos de dimensionamento

mais relevantes disponíveis na literatura. Por último, são apontadas algumas conclusões parciais do conteúdo abordado. Importa ainda salientar que este capítulo, assim como a restante dissertação, em face da justificação apresentada na secção 1.1, está direccionado para o comportamento de um varão isolado. Adicionalmente, é também pressuposta a utilização de cola epoxídica para colagem dos ligadores em aço roscado, salvo referência em contrário e pelos motivos apresentados na secção 2.3.

O capítulo três refere-se à preparação e realização do programa experimental. Este compreendeu a determinação da resistência ao arranque de GiRs, e a caracterização da madeira usada no fabrico dos provetes de GiRs, através da determinação de algumas das suas propriedades mecânicas e físicas. Por conseguinte, são apresentados os materiais utilizados (madeira, varão e cola), explicados todos os procedimentos para a obtenção dos provetes de ensaio, e descrita a metodologia adotada para os vários ensaios realizados. Por fim, como no capítulo anterior, são expostas algumas conclusões parciais.

No capítulo quarto é realizada a apresentação, análise e discussão dos resultados. Primeiramente é feita a discussão relativa ao estudo dos métodos de dimensionamento disponíveis na bibliografia, a qual inclui várias análises comparativas, seguindo-se a discussão dos resultados experimentais obtidos nos ensaios de resistência ao arranque dos provetes de GiRs, complementada com os dos ensaios de caracterização da madeira nova e antiga.

No quinto e último capítulo expõem-se as conclusões gerais que este estudo permitiu extrair e sugerem-se possíveis desenvolvimentos futuros desta linha de trabalho.

O corpo principal da Dissertação completa-se com a lista de Referências Bibliográficas, seguindo-se-lhe um conjunto de Anexos com informação complementar.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Aplicações de varões colados em estruturas de madeira

Os varões colados (GiRs) em estruturas de madeira foram inicialmente concebidos para a produção de sistemas de ligação com capacidade para resistir a momentos. As ancoragens de pilares às fundações (Figura 2.1- a)), as ligações em nós de pórticos (Figura 2.1- b) e c)), e a continuidade entre elementos (Figura 2.1- d)), são exemplos deste tipo de aplicação. Não obstante, a sua versatilidade tem possibilitado alargar o seu domínio de aplicação, nomeadamente em trabalhos de reforço e reparação estrutural.

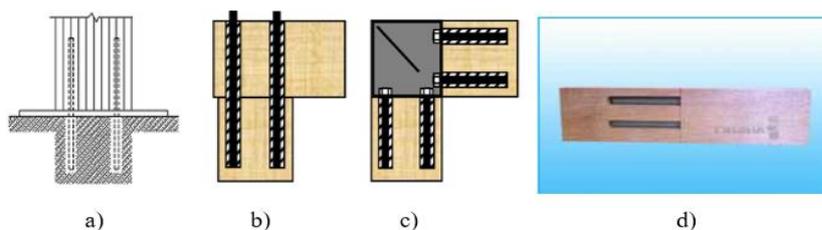


Figura 2.1-Ligações em estruturas de madeira com GiRs. a) (Tlustochowicz *et al*, 2011), b-c) (Fragiacomo e Batchelar, 2011), d) (Rotafix@, 2017a).

Um dos aspetos menos positivos da madeira enquanto material de construção é o das suas baixas resistências a esforços de tração e compressão perpendiculares ao fio. No entanto, de acordo com o apresentado por Steiger *et al* (2015), estas limitações podem ser superadas pelo reforço com varões colados nas zonas sujeitas a esse tipo de esforços excessivos (Figura 2.2). No caso de vigas curvas e de pendente dupla, representado pela Figura 2.2- (a), Negrão e Faria (2009) explicam que quando o momento fletor origina forças de tração na face côncava da viga, desenvolvem-se tensões de tração perpendiculares ao fio da madeira, devidas às forças de desvio originadas pela mudança de direção do eixo da peça, as quais podem originar rotura por tração transversal. Estes autores indicam também que a presença de entalhes na face tracionada de elementos à flexão (Figura 2.2- (b)) origina concentração de tensões na zona do entalhe, a qual agrava o risco de rotura por corte a partir da raiz deste. Dietsch *et al* (2013), através de um estudo de reforço ao corte por meio de varões colados a 45° em relação ao fio da madeira (situação representada pela Figura 2.2- (d)), provou ser uma alternativa eficiente de obter ganhos de resistência ao corte.

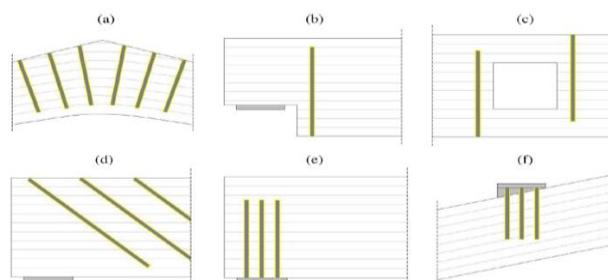


Figura 2.2- Reforço estrutural com GiRs: vigas curvas e de pente dupla (a), entalhes (b), aberturas (c), elevadas tensões de corte (d), compressão perpendicular ao fio em apoios (e) e (f), (Steiger *et al*, 2015).

Os varões colados podem ser igualmente ser aplicados como reforço de vigas em zonas onde possam ocorrer tensões de flexão excessivas (Steiger *et al*, 2015), e na reconstituição parcial de elementos estruturais de madeira através de próteses armadas que, como explicado por Machado *et al* (2009), consistem na substituição de um troço degradado por uma argamassa epoxídica armada ou, preferencialmente, por uma prótese de madeira, ligadas à madeira sã remanescente por meio de GiRs.

2.2 Mecânica de varões colados

O comportamento mecânico conjunto dos três materiais envolvidos neste sistema de ligação é complexo, não sendo ainda completa a sua compreensão. Por isso, pese embora as ligações constituídas por um único varão colado não serem de utilização comum na prática, a capacidade de carga a curto prazo de um varão isolado colado sujeito ao arranque, e os parâmetros que a condicionam, têm sido os aspetos fulcrais da investigação teórica e experimental realizada nesta área.

A transferência de carga entre o varão tracionado e a madeira é realizada por aderência entre materiais, resultando num regime de tensões tangenciais na cola e, conseqüentemente, na madeira, ao longo do comprimento de colagem. No caso dos varões de aço rugosos, Bernasconi (2001) refere que a rosca ou, ainda que em menor escala, as nervuras, asseguram uma ligação mecânica (indentação) entre o varão e a cola (Figura 2.3), de modo que a componente adesiva da ligação entre estes materiais não é tão preponderante como nos varões lisos.

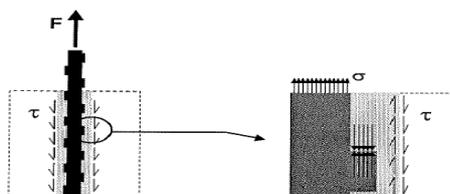


Figura 2.3- Transferência de carga em varões rugosos colados (Bernasconi 2001).

A distribuição das tensões tangenciais ao longo do comprimento de colagem foi estudada numericamente por Senno *et al* (2004) e Gardelle e Morlier (2006) através de uma análise linear de elementos finitos, uma vez que, segundo os primeiros autores, o comportamento deste tipo de ligação não apresenta fase não linear ou, quando apresenta, é desprezável do ponto de vista prático. Destes estudos, os autores observaram que a geometria do diagrama de tensões de corte apresenta concentração de tensões em ambas as extremidades, sendo que a maior ocorre na extremidade em que o varão é inserido no elemento de madeira. A Figura 2.4, apresentada por Senno *et al* (2004), representa graficamente a distribuição das tensões de corte ao longo da linha de colagem para varões colados paralelamente ao fio da madeira, compreendendo espessuras de cola de 1, 2 e 3 mm.

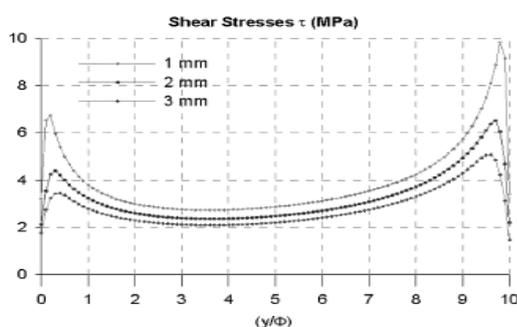


Figura 2.4- Distribuição das tensões de corte ao longo da linha de colagem. (y/Φ) : Relação entre a distância à extremidade do varão e o seu diâmetro. (Senno *et al*, 2004).

A distribuição de tensões de corte apresentada pelo autor, para varões colados paralelamente ao fio da madeira, está em concordância com o exposto por Bernasconi (2001). Contudo, no que diz respeito a varões colados perpendicularmente ao fio, este autor afirma que o diagrama destas tensões é aproximadamente constante (Figura 2.5).

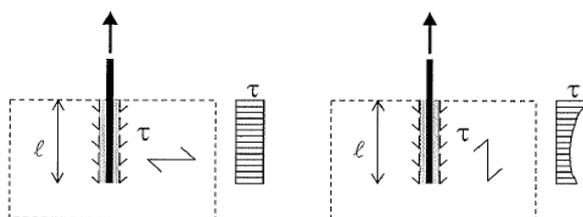


Figura 2.5- Distribuição das tensões de corte ao longo da linha de colagem para varões colados perpendicularmente (esq.ª) e paralelamente (dir.ª) ao fio (Bernasconi, 2001).

2.3 Materiais

2.3.1 Elemento de madeira

A maior parte da investigação realizada no âmbito de varões colados em estruturas de madeira, de que são exemplo os estudos de Riberholt (1988), Blaß e Laskewitz (1999), Feligioni *et al* (2003), Steiger *et al* (2006), Rossignon e Espion (2008) e outros, foi conduzida sobre espécies resinosas, porque são de utilização mais frequente em estruturas de madeira novas, particularmente visadas por este sistema de ligação. No entanto, os GiRs têm grande potencial em trabalhos de reparação e reforço de estruturas de madeira antigas degradadas, nas quais são frequentemente utilizadas madeiras de folhosas. Por este motivo, alguma investigação recente tem sido conduzida sobre estas espécies (Chans *et al* 2010a) e (Vallée *et al* 2016).

Tlustochowicz *et al* (2011) referem que a madeira lamelada colada de resinosas é o material de base mais usual tanto na utilização prática como científica, mas existem também estudos com madeira maciça (Chans *et al*, 2010a), madeira micro-lamelada colada (LVL) (Broughton e Hutchinson, 2001a) e, mais recentemente, com madeira lamelada colada cruzada (CLT) (Rajčić *et al*, 2016).

2.3.2 Varão

O aço, na forma de varão roscado ou nervurado, é o material mais utilizado neste tipo de solução. Devido à sua ductilidade, este material possibilita o dimensionamento da ligação condicionado pelo modo de rotura dúctil por cedência plástica do varão, comportamento desejável em geral, e concretamente no âmbito das ligações coladas. Adicionalmente, os varões de aço estão disponíveis numa gama alargada de diâmetros, podendo ser cortados a qualquer comprimento e, tratando-se de produtos normalizados e de grande consumo, a sua disponibilidade é frequentemente imediata e o seu custo moderado.

No caso dos varões roscados, a zona da rosca permite que a aderência aparente na interface seja conseguida não só pela aderência química entre o aço e a cola, mas também através da indentação mecânica originada pela rugosidade da interface, já abordada na secção 2.2. Os varões nervurados apresentam custos inferiores aos roscados, contudo a indentação mecânica não é tão expressiva quanto estes o que, segundo Ling *et al* (2014), poderá ser traduzido num decréscimo da capacidade de carga da ligação.

Os varões obtidos a partir de materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras (FRP) constituem uma alternativa aos varões de aço. Machado *et al* (2009) referem que as fibras de reforço mais utilizadas no domínio das estruturas de madeira são as de vidro (GFRP) e as de carbono (CFRP). O comportamento de varões colados de GFRP e CFRP foi estudado por Harvey *et al* (2000) e Lorenzis *et al* (2005) provando, em ambos os casos, a sua eficiência em

termos de capacidade de carga ao arranque. No entanto, como demonstrado pelos primeiros autores, as superfícies dos varões deverão apresentar rugosidade, tal como no aço, sob pena de a capacidade de carga reduzir consideravelmente.

Embora os varões de FRP sejam leves, apresentem boa resistência à corrosão e, em comparação com o aço macio tradicional, exibam níveis superiores de resistência mecânica (Ling *et al*, 2014), (Harvey *et al*, 2000), o carácter frágil destes materiais e o seu elevado custo, constitui o maior obstáculo à sua utilização neste tipo de ligações (Vallée *et al* 2016).

2.3.3 Cola estrutural

A cola estrutural desempenha um papel importante no comportamento de varões colados. Por esse motivo, existem vários estudos que procuram apurar qual a cola estrutural mais apropriada para este tipo de aplicação. Tlustochowicz *et al* (2011) referem que as colas estruturais que mais têm sido investigadas para aplicação em GiRs são as baseadas em poliuretanos (PUR), em fenol-resorcinol (PRF), e em resinas epóxi (EPX).

O projeto de investigação europeu GIROD (Bengtsson e Johansson, 2002), dedicado ao tema de varões colados em elementos de madeira, comparou o comportamento destes três tipos de colas estruturais quando solicitadas ao corte por arranque axial de varões colados. As colas baseadas em resinas epóxi (colas epoxídicas) foram as que melhor comportamento apresentaram em termos de resistência, com as roturas a ocorrerem nos elementos de madeira, seguindo-se as colas de poliuretano e, por último, as de fenol-resorcinol, ambas com as roturas a ocorrerem por corte na cola ao longo da linha de colagem. Os estudos experimentais de Broughton e Hutchinson (2001a) e Wheeler e Hutchinson (1998) verificaram, também, que as colas epoxídicas oferecem cargas de rotura superiores às das restantes. Serrano (2001) explica que a resistência inferior das colas baseadas em fenol-resorcinol, em comparação com as colas epoxídicas, se deve essencialmente à fraca aderência ao aço, resultante da sua retração durante a cura que leva a uma perda de ajuste à zona da rosca. Relativamente às colas baseadas em poliuretanos, este autor refere que a reação química de cura das mesmas origina o aparecimento de bolhas de dióxido de carbono na linha de colagem, agravando-se com a insuficiente pressão durante a cura, e consequentemente, a área de contacto entre a cola e a madeira fica naturalmente reduzida.

Vários investigadores, como Custódio *et al* (2009) e Machado *et al* (2009), afirmam que as colas epoxídicas constituem a melhor solução atual para a técnica em questão, essencialmente porque, segundo os mesmos, não requerem pressão durante a cura, possuem boa aderência a vários materiais (nomeadamente ao aço e à madeira), não são retráteis, e possuem boa resistência à humidade e a produtos químicos. Este tipo de colas estruturais inclui uma vasta gama de produtos disponíveis no mercado com propriedades bastantes distintas, nomeadamente

em termos de resistências mecânicas, viscosidade, temperatura de transição vítrea (T_g), tempo de cura, e tempo em aberto (“*pot life*”), as quais devem ser tidas em conta na escolha do tipo de cola a utilizar.

2.4 Parâmetros influentes na resistência ao arranque de um varão isolado

2.4.1 Diâmetro do varão

Entre os parâmetros geométricos, o diâmetro e o comprimento da linha de colagem desempenham papéis fundamentais no comportamento deste tipo de ligação. Estando o diâmetro da linha de colagem condicionado pelo do varão utilizado, vários estudos visam perceber a influência deste parâmetro na capacidade de carga da ligação.

Diversos autores, (Steiger *et al*, 2006), (Cimadevila *et al*, 2007), (Feligioni *et al*, 2003), (Chans *et al*, 2009), concluíram que, excluída a rotura por cedência plástica do varão, o aumento do diâmetro do varão sob espessura de cola constante resulta em aumento da carga última não existindo, contudo, uma relação clara entre eles. Esta conclusão parece ter uma base racional simples, uma vez que o aumento de diâmetro implica um acréscimo da superfície de contacto entre o aço e a cola e, conseqüentemente, entre a cola e a madeira.

2.4.2 Comprimento de colagem

O comprimento de colagem do varão corresponde, habitualmente, ao comprimento de inserção do varão no furo, e a generalidade dos estudos e métodos de dimensionamento aponta para o aumento da resistência, numa dada proporção, com o aumento deste parâmetro. Alguns estudos experimentais apontam para uma relação aproximadamente linear entre o aumento do comprimento de colagem e o acréscimo da resistência ao arranque (Broughton e Hutchinson, 2001a), (Ling *et al*, 2014). No entanto, outros apontam para relações não lineares entre eles (Gonzalez *et al*, 2016). A investigação desenvolvida por Cimadevila *et al* (2007), para comprimentos de colagem elevados (superiores a 200 mm), por sua vez, não demonstrou relações expressivas entre o aumento deste parâmetro e o aumento da capacidade de carga. Neste sentido, Chans *et al* (2013) recomendam que o comprimento de colagem seja limitado a 15 (madeiras de baixa densidade) ou 18 (madeiras de elevada densidade) vezes o diâmetro do varão, por não haver ganho significativo de resistência além destes limites. Com base numa análise numérica por elementos finitos, Broughton e Hutchinson (2001a) observaram que para comprimentos inferiores a 40 mm, existe um aumento acentuado no pico das tensões de corte na interface cola/madeira, correspondendo a reduções no desempenho experimental. Deste modo, estes autores recomendam optar-se por comprimentos superiores a este.

2.4.3 Espessura da linha de cola

A espessura da linha de cola é também um parâmetro importante no desempenho deste sistema de ligação. Atendendo a que espessuras de cola superiores originam maiores diâmetros da linha de colagem cola-madeira, ou seja, superfícies de contacto entre a cola e a madeira igualmente superiores, parece plausível admitir que o acréscimo deste parâmetro promova capacidades de carga ao arranque mais elevadas.

Broughton e Hutchinson (2001a) confirmam o raciocínio anterior através de um estudo numérico, onde verificaram que o pico das tensões de corte na interface madeira/cola diminuiu com o aumento da espessura da linha de cola, e de um estudo experimental, onde observaram um acréscimo da carga de rotura de arranque com o aumento da espessura da linha de cola (epoxídica). Estes autores concluíram ainda que, tal como com o comprimento de colagem, a carga de rotura aumentou de forma praticamente linear com o aumento da espessura da linha de cola. Também Bengtsson e Johansson (2000) e Cimadevila *et al* (2007) verificaram experimentalmente que, para colas epoxídicas, o acréscimo da espessura da linha de cola resulta em cargas de rotura de arranque superiores, apesar de não detetarem qualquer relação clara entre eles. Não obstante, os primeiros autores observaram perdas de resistência com o aumento deste parâmetro para colas de poliuretanos.

No geral, tal como suposto, parece consensual que existe um aumento da resistência ao arranque com o aumento da espessura da linha de cola quando utilizadas colas epoxídicas. No entanto, e dependendo da cola utilizada, linhas de colas espessas podem originar retrações elevadas durante o processo de cura, provocando tensões significativas na ligação, e apresentar maior vulnerabilidade à fadiga (Tlustochowicz *et al*, 2011), (Madhoushi e Ansell, 2004). Por este motivo, Tlustochowicz *et al* (2011) referem que as espessuras de cola adotadas situam-se usualmente entre os 0,5 mm e os 3 mm, sendo o valor mínimo condicionado pela dificuldade de controlar a qualidade de colagem *in situ*.

2.4.4 Distância do centro do varão ao bordo livre da madeira

A distância do varão ao bordo livre da secção de madeira também condiciona o modo e a carga de rotura em ligações com GiRs. O “bolbo” de tensões axisimétrico resultante da transferência da força de tração do varão colado paralelamente ao fio para a madeira produz trações perpendiculares a fio que, dada a baixa resistência à tração da madeira nesta direção, poderão causar fraturas paralelas às fibras (*splitting*). Blaß e Laskewitz (1999) aconselham a utilização de uma distância do eixo do varão ao bordo livre de 2,5 vezes o seu diâmetro, argumentando que se verificam perdas de capacidade de carga para distâncias inferiores. Steiger *et al* (2006) sugerem uma distância mínima de 2,3 diâmetros do varão para evitar a fratura (*splitting*) da madeira por tração perpendicular ao fio, que resulta em roturas prematuras. Alguns dos métodos

de dimensionamento propostos para este tipo de ligação recomendam distâncias mínimas do eixo do varão ao bordo livre da madeira (Quadro 2.1) sendo, na maioria dos casos, preconizado o valor mínimo de 2,5 diâmetros.

Quadro 2.1- Distâncias mínimas do eixo do varão ao bordo livre (a_1).

Método de Dimensionamento	a_1
ENV 1995-2:1997	2,5d
USSR Russian Standards - 1989	2d
French rules for Epoxy Mastafix	2,5d
DIN 1052:2008-12	2,5d
prEN 1995-2:2003	2,5d

2.4.5 Massa volúmica da madeira

A influência da massa volúmica da madeira, que se sabe apresentar razoáveis correlações com várias propriedades mecânicas deste material, na resistência ao arranque de varões não é consensual entre os investigadores do tema. Os métodos de dimensionamento deste tipo de ligação presentes na bibliografia refletem esse desacordo, uma vez que a influência desta propriedade na capacidade de carga da ligação não é tida em conta em alguns deles, como se poderá ver adiante.

Steiger *et al* (2006) estudaram a resistência ao arranque de varões colados paralelamente ao fio em provetes de madeira lamelada colada de resinosas com diferentes massas volúmicas, e verificaram que esta é consideravelmente superior nos provetes com massas volúmicas mais elevadas. Noutro estudo (Widmann *et al*, 2007) concluiu-se que, em varões colados perpendicularmente ao fio da madeira, a influência da massa volúmica na resistência é consideravelmente menos pronunciada em comparação com varões colados paralelamente ao fio, sendo o seu efeito negligenciável. Bengtsson e Johansson (2000) analisaram também a influência desta propriedade na resistência ao arranque de varões colados paralelamente ao fio em madeira lamelada colada de resinosas e reportam que, no geral, não encontraram qualquer relação clara entre elas.

Em investigações conduzidas sobre espécies folhosas, Chans *et al* (2008) e (2009) não encontraram qualquer relação entre a massa volúmica e a capacidade de carga de varões colados paralelamente ao fio. Mais recentemente, os mesmos autores (Chans *et al*, 2013) compararam a resistência ao arranque de varões colados em provetes idênticos de madeira lamelada colada de resinosas (menos densa) e de folhosas (mais densa), e concluíram que a carga de rotura dos varões colados foi superior nas madeiras mais densas, sem que contudo fosse observada qualquer relação linear entre elas.

2.4.6 Teor de água da madeira

O teor de água da madeira, para determinados intervalos, interfere significativamente em várias das suas propriedades, nomeadamente na resistência mecânica. Negrão e Faria (2009) referem que esta resistência apresenta valores máximos quando a madeira se encontra em estado anidro, diminuindo com o aumento do teor de água. O teor de água influencia também o desempenho das colagens estruturais em madeira, sobretudo no sentido de que as condiciona ou até inviabiliza quando são ultrapassados certos valores limite, pelo que a sua influência é geralmente expressa na forma de restrições ou contra-indicações de aplicação.

A investigação de Broughton e Hutchinson (2001b) não evidenciou, para colagens com cola epoxídica em madeira de folhosas, perdas significativas de resistência ao arranque para valores de teor de água, medidos no momento da colagem, consistentes com as classes de serviço 1 e 2 definidas pela EN 1995-1-1 (CEN, 2004). Esta resistência diminuiu de forma considerável apenas para valores de teor de água superiores a 22%, já correspondentes a classe de serviço 3. Wheeler e Hutchinson (1998) estudaram o comportamento de colagens em madeira-madeira com diferentes teores de água, utilizando colas epoxídicas e poliuretanos, e verificaram que os poliuretanos apresentam bastante sensibilidade ao teor de água da madeira no momento da colagem, resultando em quebras de resistência com o seu aumento. Pelo contrário, as colagens com colas epoxídicas não apresentaram quebras de eficácia expressivas, mesmo com teores de água de 22% na colagem. Para averiguar a durabilidade das colagens, estes autores realizaram também ensaios cíclicos de variação de humidade, não tendo observado perdas significativas de resistência em colagens com colas epoxídicas mesmo após 4 ciclos, com as roturas a dependerem consistentemente da resistência da madeira.

2.4.7 Temperatura

A influência da temperatura no comportamento de ligações com varões colados pode ser tratada de forma análoga à do teor de água, ou seja, através de restrições de aplicação. A temperatura de transição vítrea (T_g) é uma característica fundamental das colas estruturais termoendurecíveis, como as epoxídicas, pois definem a temperatura a partir da qual as colas começam a perder propriedades mecânicas de forma acentuada. Neste sentido, e por ser a principal causa da falha de ligações coladas sujeitas a elevadas temperaturas, a temperatura de transição vítrea da cola utilizada deverá situar-se bem acima da temperatura máxima expectável durante o tempo de serviço da ligação justificando, assim, a restrição deste tipo de ligações em ambientes com demasiada exposição solar.

A generalidade das colas estruturais sofre uma redução das suas propriedades mecânicas quando sujeitas a elevadas temperaturas e, neste sentido, apesar da disponibilidade de algumas colas epoxídicas no mercado especialmente concebidas para suportar elevadas temperaturas,

Cruz e Custódio (2006) indicam que a maioria das utilizadas na indústria da construção sofrem perdas significativas de resistência e de rigidez entre os 40°C e os 80°C. Broughton e Hutchinson (2001c) sugerem temperaturas de serviço adequadas entre os -30°C e os 60°C para colas epoxídicas.

Em situação de incêndio, devido à sua baixa condutibilidade térmica, o perfil de temperatura através da secção de um elemento de madeira sofre uma variação lenta, progredindo o aquecimento para o interior à medida que a superfície exposta vai sendo consumida pelo fogo. Por isso, a perda de resistência da madeira pode ser relacionada com a perda de secção. Esta baixa condutibilidade térmica proporciona também um isolamento adequado para a cola, na condição de que exista um total envolvimento da mesma (Cruz e Custódio, 2016). O estudo experimental realizado por Maria *et al* (2017), submeteu vários provetes de GiRs ao aumento de temperatura num forno elétrico, com um acréscimo de 100°C a cada 20 minutos, e em que a configuração de ensaio foi escolhida para evitar que o varão de aço fosse aquecido diretamente durante o decorrer do ensaio, assegurando que o processo de aquecimento da ligação ocorresse apenas pela transmissão de calor através da madeira. O gráfico da Figura 2.6, obtido neste estudo, mostra que para medições de temperatura realizadas num intervalo de tempo de 80 minutos, a subida de temperatura na cola dos provetes ensaiados foi moderada, mantendo-se bastante abaixo da temperatura de transição vítrea durante todo o período.

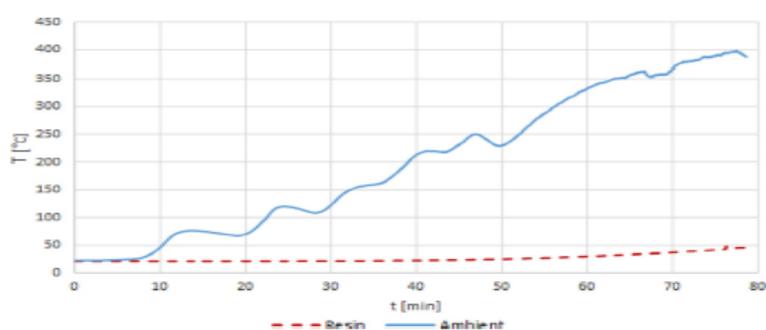


Figura 2.6- Variação da temperatura da cola estrutural com a da temperatura exterior (Maria *et al* 2017).

Em ciclos diários de variação de temperatura, Faye *et al* (2004) e Cruz e Custódio (2006) referem que a temperatura na cola tende a acompanhar a temperatura ambiente, ainda que com desfasamento temporal de algumas horas, dependendo da condutibilidade térmica da madeira e do recobrimento da cola. Deste modo, é evidente que a temperatura de serviço a que as estruturas de madeira estão expostas influenciam fortemente a temperatura atingida pelas linhas de cola, justificando, uma vez mais, a restrição de aplicações de varões colados em ambientes expostos a incidência solar direta.

2.4.8 Ângulo força-fio

A resistência ao arranque de GiRs é, como explicado na secção 2.2, fortemente condicionada pela resistência ao corte da madeira. Conforme apresentado por Negrão e Faria (2009), esta resistência varia consoante o plano de corte, ocorrendo o menor valor no plano LT e na direção longitudinal, no qual a rotura por corte se verifica pelo escorregamento entre anéis de crescimento. No plano da secção transversal, a rotura por esforço transversal implica o corte das fibras, o que requer tensões superiores às do primeiro caso. Para efeitos práticos, atribui-se uma única resistência ao corte do material, correspondente à verificada nos planos longitudinais. Neste sentido, no que diz respeito às roturas na madeira, e excluindo a rotura por tração desta, parece lógico considerar que para varões colados perpendicularmente ao fio a resistência ao arranque será superior à observada em varões colados paralelamente ao fio. Este raciocínio é confirmado pela investigação de Widmann *et al* (2007) em madeira lamelada colada, a qual determinou resistências ao arranque de varões colados perpendicularmente ao fio de 20% a 50% superiores às de varões colados paralelamente ao fio, em provetes com iguais propriedades geométricas e materiais. Faye *et al* (2004) observaram, de igual modo, resistências superiores em varões colados perpendicularmente ao fio de madeira lamelada colada. Em varões colados a 45° em relação ao fio, estes autores verificaram resistências idênticas às registadas em varões colados paralelamente a este.

De outro ponto de vista, tal como sugerem Tlustochowicz *et al* (2011), a relação intuitiva entre o carregamento e a inclinação das fibras é a de que a resistência é superior quando a carga atua ao longo da direção do fio e inferior quando atua perpendicularmente ao fio, pois resulta em trações perpendiculares a este. Este raciocínio parece ser confirmado por Gustafsson e Serrano (2001) *apud* (Tlustochowicz *et al*, 2011), todavia este resultado não é consistente com todos os estudos realizados, uma vez que parece limitado a roturas por tração da madeira.

2.5 Configurações de ensaio

A falta de regulamentação existente sobre este tema reflete-se na ausência de uma configuração normalizada de ensaio de arranque de GiRs e, portanto, a investigação realizada tem apresentado várias configurações possíveis, vejam-se, por exemplo, as indicadas por Tlustochowicz *et al* (2011) e Rajčić *et al* (2016). De acordo com estes autores, os ensaios de tração-tração (Figura 2.7- direita) e de tração-compressão (Figura 2.7- esquerda) são os mais usuais. Esta afirmação é sustentada por Stepinac *et al* (2013) com base num inquérito realizado a cientistas, projetistas e representantes da indústria da madeira, no qual estes ensaios foram maioritariamente referidos.



Figura 2.7- Ensaio de tração-compressão (esq.^a), e tração-tração (dir.^a) (Rajčić *et al* 2016).

A configuração de ensaios de tração-tração requer varões colados em ambas as extremidades e com um alinhamento perfeito, para evitar excentricidades que originem momentos espúrios, sendo o carregamento axial de tração aplicado num dos varões e equilibrado pela reação do outro. Nos ensaios de tipo tração-compressão, o carregamento axial de tração no varão ensaiado é equilibrado pela reação de uma chapa, fixada ao meio exterior, contra a qual o provete é comprimido. Por conseguinte, os ensaios de tração-compressão requerem provetes de madeira de menor comprimento e apenas um varão colado numa das extremidades, facilitando a produção e reduzindo o consumo de materiais. No entanto, Tlustochowicz *et al* (2011) observam que este tipo de ensaios não traduz da melhor forma o regime de tensões e deformações de uma ligação prática real com GiRs.

Alguns estudos comparativos entre estas duas modalidades de ensaio apontam para a obtenção de cargas de rotura inferiores nos ensaios de tração-compressão, como o de Bengtsson e Johansson (2000) em provetes de varões colados com cola epoxídica em madeira lamelada colada, e o de Broughton e Hutchinson (2001a) em madeira micro-lamelada colada (LVL). Mais recentemente Rajčić *et al* (2016) verificaram, em provetes idênticos de madeira lamelada colada cruzada (CLT), que foram os ensaios realizados em tração-tração que resultaram em cargas de rotura inferiores.

2.6 Modos de rotura

Os modos de rotura definem o carácter (dúctil ou frágil), a causa e a localização da rotura em ligações com varões colados. Como referem Gardelle e Morlier (2006) e Tlustochowicz *et al* (2011), estes são influenciados pelas propriedades mecânicas dos materiais constituintes da ligação, pela aderência entre eles, e pelo tipo de esforços a que estão sujeitos.

Os vários estudos experimentais realizados neste âmbito possibilitaram distinguir os seguintes modos de rotura: *i*) rotura coesiva por corte na madeira ou na cola ao longo da linha de colagem (Figura 2.8- (a)); *ii*) rotura coesiva em bloco por corte na madeira, no caso de múltiplos varões (Figura 2.8- (c)); *iii*) rotura por tração na madeira (Figura 2.8- (b)); *iv*) fratura (*splitting*) da madeira (Figura 2.8- (d)); *v*) cedência plástica do varão (Figura 2.8- (e)); *vi*) rotura adesiva na interface cola/madeira ao longo da linha de colagem (Tlustochowicz *et al*, 2011), (CEN, 1997).

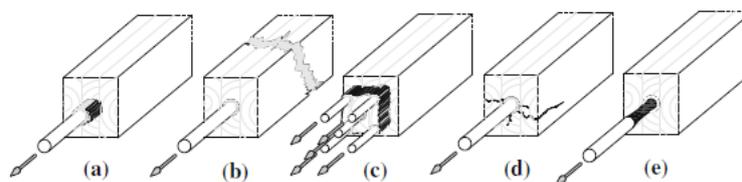


Figura 2.8- Modos de rotura possíveis em ligações com GiRs, (Tlustochowicz *et al* 2011).

Destes, a cedência plástica do varão é o único modo de rotura dúctil, pelo que deve ser condicionante no dimensionamento destas ligações. Adicionalmente, a baixa variabilidade das propriedades mecânicas do aço permite que o cálculo da resistência da ligação seja bastante preciso.

2.7 Métodos de dimensionamento

As ligações com varões colados têm sido estudadas ao longo dos últimos 30 anos, com o objetivo de estabelecer regras de dimensionamento consensuais. Contudo, os resultados experimentais contraditórios, a multiplicidade de parâmetros presumivelmente influentes na resistência ao arranque de varões colados, e as diferentes abordagens científicas têm, segundo Rajčić *et al* (2016), motivado uma discordância entre os especialistas sobre esse tópico.

Riberholt, pioneiro no estudo de GiRs, apresentou em 1988 a primeira proposta de dimensionamento (Riberholt, 1988). Na ENV 1995-2:1997, ou parte 2 da versão de 1997 do Eurocódigo 5 (CEN, 1997) foi consagrado um método de dimensionamento. Contudo, num processo conturbado relatado por Larsen (2011), este veio a ser removido sem substituição na revisão de 2003. Entre 1998 e 2001 concretizou-se o projeto europeu GIROD (Bengtsson e Johansson, 2002), especificamente dedicado ao tema. Os resultados deste projeto foram posteriormente aproveitados para uma proposta de dimensionamento, implementada no anexo C de um *draft* da EN 1995-2 (CEN, 2003) *apud* (Larsen, 2011) mas, como referido, este processo não chegou a bom termo.

O uso crescente desta solução de ligação tem pressionado a definição de regras de projeto consensuais, motivando o aumento da investigação nesta área. Stepinac *et al* (2013) e Steiger *et al* (2015) compilaram alguns dos métodos de dimensionamento propostos ao longo dos últimos 30 anos. A Figura 2.9 reúne as abordagens apresentadas pelos referidos autores.

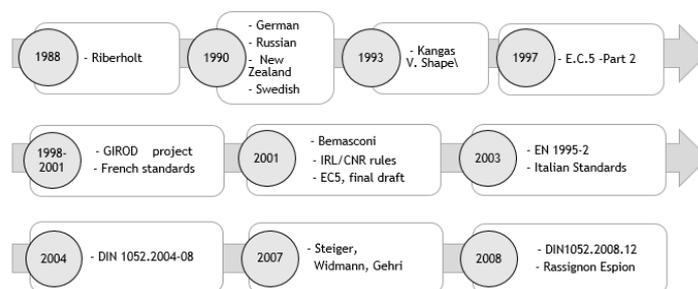


Figura 2.9- Métodos de dimensionamento propostos para GiRs, (Stepinac *et al* 2013), (Steiger *et al* 2015).

As equações que permitem estimar a resistência ao arranque propostas por alguns destes métodos, e outros, serão a seguir apresentadas (Quadro 2.3), traduzindo a questão central da falta de consenso, a que este documento se dedica de forma particular. Estas equações destinam-se, na generalidade dos casos, a varões isolados colados paralelamente ao fio de madeiras resinosas, embora em alguns métodos, como o da ENV 1995-2:1997 (CEN, 1997), o do anexo C do *draft* de 2003 da mesma norma, e o das normas alemãs (DIN, 2008), a resistência ao arranque para varões colados perpendicularmente ao fio possa também ser calculado pelas mesmas equações utilizadas para varões colados paralelamente ao fio. Widmann *et al* (2007) apresentam uma proposta específica para varões colados perpendicularmente ao fio, no entanto essa variante está fora do âmbito do presente documento.

De modo a facilitar a compreensão do leitor, foi uniformizada a terminologia de alguns parâmetros que, nos trabalhos originais, são designados de formas diferentes, nomeadamente:

- F_k : Valor característico da resistência ao arranque;
- F_{mean} : Valor médio da resistência ao arranque;
- F_d : Valor de cálculo da resistência ao arranque;
- d_h : Diâmetro do furo (mm);
- d_{rod} : Diâmetro nominal do varão (mm);
- l_g : Comprimento de colagem (mm);
- ρ_k : Valor característico da massa volúmica da madeira (kg/m^3);
- e : Distância do centro do varão ao bordo livre do provete de madeira (mm).

Importa ainda salientar que o significado e o valor de alguns parâmetros carecem de confirmação. Em alguns casos a indefinição provém do documento original, noutros deve-se a pequenas alterações introduzidas, talvez por equívoco, em artigos que fazem referência ao trabalho original, o que, em algumas situações, poderá afetar consideravelmente o resultado. Para identificação dos métodos apresentados no Quadro 2.3 foi-lhes atribuída a seguinte numeração (Quadro 2.2):

Quadro 2.2- Numeração (ID) atribuída aos métodos de dimensionamento.

ID:	Método:
1	Riberholt (1988)
2	USSR Russian Standards (Turkovsky, 1989)
3	French rules according to Riberholt (1999) (Faye <i>et al</i> , 2004)
4	French rules for Epoxy Mastafix (1999) (Faye <i>et al</i> , 2004)
5	Swedish guidelines (Carling, 1992) <i>apud</i> (Tlustochowicz <i>et al</i> , 2011)
6	New Zealand Design Guide (NZTIF, 2007) <i>apud</i> (Stepinac <i>et al</i> , 2013), (Tlustochowicz <i>et al</i> , 2011)
7	ENV 1995-2:1997 (CEN, 1997)
8	GIROD project (Bengtsson e Johansson, 2002)
9	DIN 1052:2008-12 (DIN, 2008)
10	Steiger <i>et al</i> (2006)
11	prEN 1995-2:2003 (CEN, 2003) <i>apud</i> (Larsen, 2011)
12	Yeboah <i>et al</i> (2013)
13	Rossignon e Espion (2008)
14	Townsend (1990) <i>apud</i> (Feligioni <i>et al</i> , 2003)
15	Feligioni <i>et al</i> (2003)
16	D. Otero Chans <i>et al</i> (2013)

Quadro 2.3- Apresentação dos métodos de dimensionamento por ordem cronológica:

ID:	Resistência ao arranque:	Parâmetros e observações:
1	$F_k(N) = \begin{cases} f_{ws}\rho_k d \sqrt{l_g} & , \text{ para } l_g \geq 200\text{mm} \\ f_{wl}\rho_k d l_g & , \text{ para } l_g < 200\text{mm} \end{cases}$	<ul style="list-style-type: none"> - f_{ws} e f_{wl}: Parâmetros da cola para os casos da raiz quadrada e linear: <ul style="list-style-type: none"> $f_{ws} = 520 \text{ N/mm}^{1,5}$ Para colas frágeis; $f_{wl} = 37 \text{ N/mm}^2$ Para colas frágeis. - d (mm) = máx.(d_h; d_{rod}) - Para classe de serviço 3 o comprimento de colagem (l_g) não deverá ultrapassar os 200 mm.
2	$F_d(N) = R_{sh}\pi(d_{rod} + 5)l_k K_1 K_2$	<ul style="list-style-type: none"> R_{sh}: Valor de cálculo da resistência ao corte da madeira normal às fibras (N/mm^2). - l (mm) = $l_g - 30$ - $k_1 = 1 - 0,01(l/d_{rod})$ - $k_2 = \begin{cases} 1 & \text{Para um só varão} \\ 0,9 & \text{Para dois varões} \\ 0,8 & \text{Para três varões alinhados} \end{cases}$ - O valor de k_2 deve ser subtraído de 0,1 se os varões estiverem dispostos em duas linhas.
14	$F_{mean}(N) = 9,2d_{rod}l_g(d_h/d_{rod})^2(e/d_{rod})^{0,5}$	
5	$F_k(N) = \pi d_{rod} l_g f_{v3}$	<ul style="list-style-type: none"> - f_{v3} (N/mm^2): Parâmetro de resistência ao corte local da linha de colagem: $f_{v3} = \begin{cases} 3,4 & \text{se } l_g/d_{rod} \leq 10 \\ 3,9 - 0,05(l_g/d_{rod}) & \text{se } 10 < l_g/d_{rod} \leq 20 \end{cases}$ - Para a classe de serviço 2 o valor de resistência calculado deve ser reduzido 10%.
7	$F_k(N) = \pi d_{equ} l_g f_{v,k}$	<ul style="list-style-type: none"> - d_{equ} (mm) = $\text{mín.}(1,25d_{rod}; d_h)$ para varões roscados. - $f_{v,k}$: Valor característico da resistência ao corte local da madeira: $f_{v,k} (\text{N/mm}^2) = 1,2 \cdot 10^{-3} d_{equ}^{-0,2} \rho_k^{1,5}$ - Aplicação de GiRs limitada a classes de serviço 1 e 2.
3	$F_k(N) = 85f_{v,k} d_{rod} \sqrt{l_c}$	<ul style="list-style-type: none"> - $f_{v,k}$: Valor característico da resistência ao corte da madeira (N/mm^2). - l_c (mm) = $l_g - 1,5d_{rod}$

4	$F_k(N) = 104f_{v,k}d_hl_c^{0.45}$	- $f_{v,k}$: Valor característico da resistência ao corte da madeira (N/mm ²). - l_c (mm) = $l_g - 1,5d_{rod}$
8	$F_k(N) = \pi d_l g \tau_f (\tanh \omega) / \omega$	- τ_f : Resistência ao corte local da linha de colagem: $\tau_f = 10,5$ N/mm ² para colas epoxídicas. - $\omega = \sqrt{(l_{geo}/l_m)}$ - $l_{geo} = \frac{\pi d_{rod} l^2}{2} \left(\frac{1}{A_r} + \frac{(E_r/E_w)}{A_w} \right)$ - A_r : Área da secção transversal do varão (mm ²). - A_w : Área da secção transversal do elemento de madeira (mm ²). - E_r : Valor característico do módulo de elasticidade do varão (N/mm ²). - E_w : Valor característico do módulo de elasticidade da madeira (N/mm ²). - $l_m = E_r G_f / \tau_f^2$ - G_f : Energia de rotura da linha de colagem: $G_f = 1,89$ N.mm/mm ² , para colas epoxídicas.
15	$F_k(N) = \pi l_g (f_{v,k} d_{equ} + k(d_{rod} + t_{adh}) t_{adh})$	- $f_{v,k}$: Valor característico da resistência ao corte local da madeira: $f_{v,k}$ (N/mm ²) = $0,0012 d_{equ}^{-0.2} \rho_k^{1.5}$ - d_{equ} (mm) = $\min(1,25d_{rod}; d_h)$ - k : Parâmetro de resistência da cola: $k = 0,086$ para colas frágeis. - t_{adh} - Espessura da linha de cola.
11	$F_k(N) = \pi d_{equ} l_g f_{ax,k} (\tanh \omega / \omega)$	- d_{equ} (mm) = $\min(1,15d_{rod}; d_h)$ para varões roscados. - $f_{ax,k}$: Valor característico da resistência ao corte local da linha de colagem: $f_{ax,k} = 5,5$ (N/mm ²) - $\omega = (0,016 l_g) / \sqrt{d_{equ}}$
10	$F_{mean}(N) = f_{v,0,mean} \pi d_h l_g$	- $f_{v,0,mean}$: Valor médio da resistência ao corte local da linha de colagem: $f_{v,0,mean}$ (N/mm ²) = $7,8(\lambda/10)^{-1/3}(\rho_k/480)^{0.6}$ - λ : Coeficiente de esbelteza: $\lambda = l_g/d_h$ - Método sujeito às seguintes limitações: ▶ $7,5 \leq \lambda \leq 15$ ▶ $12 \text{ mm} \leq d_{rod} \leq 20 \text{ mm}$ ▶ Madeira lamelada colada obtida de espruce noruegês ou outra com propriedades semelhantes e com valores característicos de massa volúmica compreendidos entre 350 kg/m ³ e 500 kg/m ³ .
6	$F_k(kN) = 6,73 K_b K_e K_m (l_g/d_{rod})^{0.86} (d_{rod}/20)^{1.62} (d_h/d_{rod})^{0.5} (e/d_{rod})^{0.5}$	- $k_b = 1$ para varões roscados; - k_e : Parâmetro obtido experimentalmente para ter consideração os diferentes tipos de colas epoxídicas, varia entre 0,86 e 1,17. - k_m - Parâmetro de influência do teor de água da madeira (w): $k_m = \begin{cases} 1 & \text{para } w < 14\% \\ 0,9 & \text{para } 14\% \leq w < 18\% \\ 0,75 & \text{para } 18 \leq w < 22\% \end{cases}$ - Método sujeito às seguintes limitações: ▶ $12 \text{ mm} \leq d_{rod} \leq 24 \text{ mm}$ ▶ $5d_{rod} \leq l_g \leq 17,5d_{rod}$ ▶ $1,15d_{rod} \leq d_h \leq 1,4d_{rod}$ ▶ $e \geq 1,5d_{rod}$
9	$F_k(N) = \pi d_{rod} l_g f_{k1,k}$	- $f_{k1,k}$: Valor característico da resistência ao corte da linha de colagem: $f_{k1,k}$ (N/mm ²) = $\begin{cases} 4,0 & \text{se } l_g \leq 250 \text{ mm} \\ 5,25 - 0,005 l_g & \text{se } 250 \text{ mm} < l_g \leq 500 \text{ mm} \\ 3,5 - 0,0015 l_g & \text{se } 500 < l_g \leq 10000 \text{ mm} \end{cases}$

13	$F_{\text{mean}}(\text{kN}) = (-0,15 \lambda^2 + 9,24 \lambda)(d_{\text{rod}}/16)^{1,5}$	<ul style="list-style-type: none"> - λ: Coeficiente de esbelteza: $\lambda = l_g/d_h$ - $F_k = 0,76 F_{\text{mean}}$; - Método sujeito às seguintes limitações: <ul style="list-style-type: none"> • Espessura da linha de cola de 4mm. • $12 \text{ mm} \leq d_{\text{rod}} \leq 24 \text{ mm}$ • $10 \leq \lambda \leq 25$ • Madeira lamelada colada da classe de qualidade GL24. • Classes de serviço 1.
12	$F_{\text{mean}}(\text{N}) = \pi f_{v,\text{mean}} d_h l_g$	<ul style="list-style-type: none"> - $f_{v,\text{mean}}$: Valor médio da resistência ao corte local da linha de colagem: $f_{v,\text{mean}} = 5,7 \text{ MPa}$ (determinado experimentalmente). - Método sujeito às seguintes limitações: <ul style="list-style-type: none"> • $l_g \geq 1,5 d_h$.
16	$F_k(\text{N}) = f_{\text{joint}} \pi d_h l_g$	<ul style="list-style-type: none"> - $f_{\text{joint}} = 0,6 \rho_k^\alpha \left(1 - \frac{0,7 k^3}{\rho_k + k^2}\right)$ - $\alpha = 0,4$ - $k = (l_g/d_{\text{rod}}) - 10$

A lista apresentada ilustra a multiplicidade de parâmetros presumivelmente influentes na resistência ao arranque de GiRs em madeira, realçando a dificuldade de conceber um método consensual. Genericamente, como sugerido por autores como Steiger *et al* (2015) e Stepinac *et al* (2013), parece razoável considerar que a resistência ao arranque de um varão isolado depende, essencialmente, da sua área de colagem (d : diâmetro de colagem, l_g : comprimento de colagem) e de um parâmetro de resistência ao corte ($f_{v,k}$), dependente das propriedades mecânicas dos três materiais envolvidos na ligação e da aderência entre eles.

$$F_k(\text{N}) = f(d, l_g, f_{v,k}) \quad (1)$$

2.8 Conclusões do Estado da Arte

As aplicações práticas de varões colados em estruturas de madeira envolvem geralmente vários ligadores. Contudo, e embora o funcionamento do conjunto careça em si mesmo de investigação, o primeiro passo para o entendimento do sistema é o do conhecimento do comportamento do ligador individual sujeito ao arranque, pelo que este tem sido o âmbito da maior parte dos estudos. No arranque, a transferência de carga entre o varão tracionado e a madeira é realizada por aderência entre materiais resultando, assim, num regime de tensões tangenciais na cola e na madeira ao longo de todo o comprimento de colagem.

A aderência do varão à cola estrutural é a base de todo o sistema, devendo utilizar-se varões rugosos a fim de se mobilizar, para além da aderência química entre os materiais a ligar, a parcela devida à indentação mecânica na interface. Pela sua ductilidade, baixo custo económico e pela referida indentação originada na zona da rosca, os varões de aço roscado são, de um modo geral, os mais utilizados. Relativamente às colas estruturais utilizadas, as epoxídicas apresentam, na generalidade dos estudos comparativos, a maior aptidão para este tipo de aplicação segundo critérios como o da resistência mecânica, sensibilidade à humidade e

condições de aplicação e cura. Quanto à madeira, grande parte da investigação tem sido conduzida sobre madeira nova de resinosas, particularmente visadas por esta técnica. No entanto, a reabilitação estrutural de construções de madeira antigas degradadas, onde a madeira de folhosas surge com frequência, tem motivado um acréscimo de investigação sobre estas espécies.

Relativamente às propriedades geométricas da ligação, o diâmetro, dependente do diâmetro do varão e da espessura da linha de cola, e o comprimento de colagem assumem papéis fundamentais no seu comportamento. Genericamente os estudos apontam para um acréscimo da capacidade de carga ao arranque com o aumento destes parâmetros, mas o grau de importância que cada um assume nessa resistência não é consensual. A distância do centro do varão ao bordo livre da madeira é um parâmetro geométrico importante para prevenir a rotura por tração perpendicular ao fio, ou a fratura da madeira. A massa volúmica da madeira, que se sabe apresentar razoável correlação com várias das suas propriedades mecânicas, é um dos parâmetros intervenientes em alguns dos métodos de dimensionamento propostos na bibliografia, não obstante a sua interferência na resistência ao arranque gera desacordo entre os investigadores. O teor de água e a temperatura influenciam também o desempenho das colagens estruturais em madeira, mas no sentido de que as inviabilizam quando são ultrapassados valores-limite, pelo que a sua influência é geralmente expressa na forma de restrições ou contra-indicações de aplicação. O ângulo do varão colado em relação ao fio da madeira tem também interferência na resistência ao arranque, mas ainda não existe uma conclusão evidente sobre esta questão.

A carência de regulamentação sobre varões colados em estruturas de madeira faz-se sentir a vários níveis. No referente à investigação científica, é necessário um documento que regule e uniformize as metodologias de ensaio para a determinação de resistência ao arranque de GiRs. No contexto prático, urge desenvolver um documento comum, a nível europeu, que normalize o seu dimensionamento. Embora existam alguns métodos de dimensionamento disponíveis na literatura para estimar a resistência ao arranque de varões colados, os parâmetros que cada método considera influentes nessa resistência originam várias contradições entre eles, acentuando a dificuldade de os sintetizar numa proposta única.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Para além da sua aplicação em estruturas novas, a ligação com varões colados (GiRs) constitui uma possibilidade interessante e eficaz para o restabelecimento da integridade em elementos degradados de estruturas de madeira, no âmbito da reabilitação estrutural. Contudo, esta aplicação particular carece ainda de investigação especificamente dedicada ao tema. O presente estudo e, mais concretamente, o trabalho experimental que ele envolveu, pretendem contribuir para alterar essa situação.

O tópico central deste programa experimental foi a determinação da resistência axial à tração, ou resistência ao arranque, de varões isolados colados em elementos de madeira de Castanho. Complementarmente, realizaram-se também ensaios de determinação de algumas propriedades mecânicas e físicas da madeira utilizada nos provetes de varões colados, necessárias para melhor interpretação de resultados do programa principal. O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra e no laboratório do SerQ- Centro de Inovação e Competências da Floresta.

3.2 Determinação da resistência ao arranque de varões isolados colados

3.2.1 Materiais

- Madeira:

A utilização de varões colados em estruturas de madeira ocorreu originalmente em sistemas de ligação resistentes a momentos para aplicação em construções novas, mas tem-se estendido a outras aplicações, como apoio indireto de vigas, e afigura-se uma técnica promissora em trabalhos de reforço e reparação de elementos estruturais em construções antigas, frequentemente realizadas com espécies folhosas, nomeadamente na Europa do Sul, o que motivou a escolha da madeira de Castanho (*Castanea sativa* Mill.) para este estudo. O Castanho é uma espécie folhosa frequente na construção tradicional de vários países do Centro e Sul da Europa. Em Portugal, verifica-se a sua aplicação com especial destaque nas regiões Norte e Centro do país, onde ocorrem as machas de povoamento da espécie.

Os provetes de ensaio foram produzidos com madeira de Castanho nova, adquirida e aparelhada numa serração da região Centro, e de madeira antiga, proveniente de obras de demolição e/ou reabilitação e cedida por empresas do ramo. A madeira de Castanho nova foi fornecida em 9 barrotos com secções transversais constantes de 70 mm x 70 mm, e comprimentos variáveis, perfazendo um total de 12 metros lineares (Figura 3.1- a)). A madeira de Castanho antiga foi obtida de duas vigas com secções transversais irregulares e cerca de 1,20 m de comprimento cada (Figura 3.1- b) e c)), e de um segmento de tronco com 26 cm de comprimento (Figura 3.1- d)). As vigas de madeira antiga apresentavam na sua superfície bastantes sinais de degradação mecânica e biológica como é possível notar-se pela Figura 3.2. Após a receção dos dois lotes de madeira (nova e antiga), as peças foram mantidas numa sala climatizada a 20°C e 65% de humidade relativa nas semanas anteriores e durante todo o trabalho experimental.

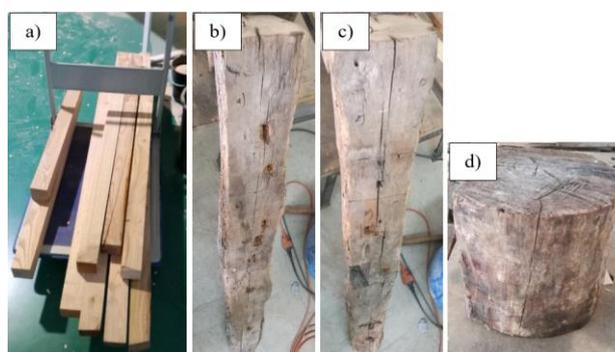


Figura 3.1- Madeira de Castanho nova a), e antiga b), c), d).



Figura 3.2- Pormenor da degradação mecânica e biológica visível nas vigas de madeira antiga.

Atualmente, o Castanho não integra a EN 1912 (CEN, 2010) e, conseqüentemente, não é possível atribuir-lhe uma classe resistente da EN 338 (CEN, 2009). Por esse motivo, e com vista à sua caracterização, foram determinadas experimentalmente algumas propriedades físicas e mecânicas dos dois tipos de madeira utilizados, como descrito adiante.

- Varões:

Os varões de aço roscado, pelos motivos já referidos na secção 2.3.2, constituem a alternativa mais utilizada para GiRs em estruturas de madeira. Adicionalmente, o conhecimento preciso do comportamento deste material, proporciona uma confiança suplementar na sua utilização.

Na execução deste trabalho foram utilizados varões com 12 milímetros de diâmetro nominal (M12) de aço roscado galvanizado da classe 8.8 (800 MPa de tensão característica de rotura, e 640 MPa de tensão característica de cedência). Esta classe, geralmente excessiva para a aplicação com madeira, foi escolhida para evitar as roturas por cedência plástica dos varões, uma vez que se pretendem evidenciar os modos de rotura relacionados com a linha de colagem. É importante referir que, na prática, a cedência plástica dos varões é o modo de rotura aconselhado, por ser dúctil, pelo que é preferível a utilização de varões de classes de resistência inferiores.

- Cola estrutural:

A investigação que tem vindo a ser realizada aponta para a maior aptidão das colas baseadas em resinas epóxi para o tipo de aplicação em causa. Neste trabalho, a cola estrutural utilizada foi a Sikadur 32-EF (Figura 3.3) atenciosamente fornecida pelo Grupo Sika. A referência “32” caracteriza em termos gerais o produto, enquanto a designação “EF” tem que ver com pequenas variações regionais de formulação. Esta é uma cola de dois componentes baseada em resinas epóxi e cargas especiais que, segundo as especificações do fabricante, endurece sem retração, é tolerante à humidade, e apresenta boa aderência tanto ao aço como à madeira. A elevada resistência mecânica em ancoragens, a pronta disponibilidade, e a baixa viscosidade (apesar de incluir cargas), porque o volume a preencher é consideravelmente baixo, foram os motivos que determinaram a escolha deste produto.



Figura 3.3- Cola estrutural epoxídica de dois componentes Sikadur 32-EF.

3.2.2 Produção dos provetes

- Preparação dos elementos de madeira:

Numa primeira fase foi realizada uma identificação visual dos defeitos nos barrotes de madeira nova, como nós ou fendas de dimensões passíveis de influenciar negativamente a resistência ao arranque. Os provetes foram depois obtidos por corte transversal dos barrotes em comprimentos de 30 cm, após excluídos os troços de pior qualidade (Figura 3.4- a)).

As vigas de madeira antiga apresentavam forma irregular e secções transversais substancialmente superiores, pelo que não foi possível utilizar um procedimento análogo ao anterior para obter os provetes deste tipo de madeira. Em primeiro lugar, as duas vigas com 1,20 metros de comprimento foram seccionadas transversalmente em peças de cerca de 30 cm de comprimento (Figura 3.4- b)), tal como na madeira nova. No segmento de tronco este passo não foi realizado, uma vez que o seu comprimento original era já adequado à dimensão dos provetes. Os troços resultantes foram, por sua vez, seccionados longitudinalmente de modo a obter provetes que, embora com geometria irregular, garantissem um recobrimento conveniente do varão colado ao contorno da peça de madeira (Figura 3.5). No Anexo A, Quadros A.1 e A.2, pode consultar-se a nomenclatura atribuída a todos os provetes. Os sinais de degradação mecânica e biológica apresentados pela madeira antiga, salvo quando muito pronunciados, não foram fator de exclusão, visto que um dos objetivos deste estudo foi precisamente o de comparar o desempenho desta solução aplicada em madeira antiga, sujeita ao efeito depletivo do tempo, com o de madeira nova.

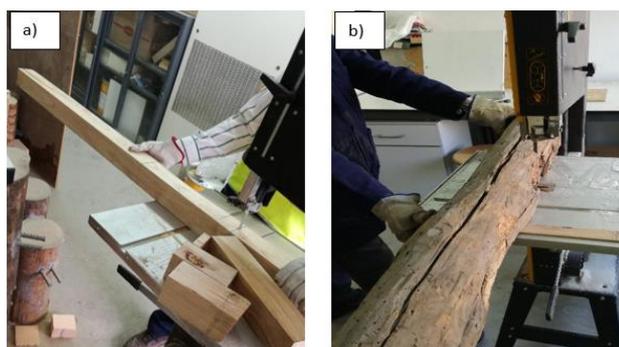


Figura 3.4- Corte transversal dos barrotes de madeira nova a), e das vigas antigas b).



Figura 3.5- Corte longitudinal das vigas de madeira antiga.

Obtidos os provetes dos dois tipos de madeira (nova e antiga), seguiu-se a respetiva furação. Foram efetuados furos em ambos os topos dos provetes, maquinados num torno mecânico, para que se pudesse garantir o alinhamento perfeito dos mesmos, evitando assim excentricidades que introduzissem momentos adicionais à ligação no decurso do ensaio (Figura 3.6). A broca utilizada na furação foi de 16,5 mm de diâmetro e os furos compreenderam profundidades de 75 mm, 90 mm, 105 mm e 120 mm em ambos os tipos de madeira, à exceção da última (120mm)

em provetes de madeira antiga, pela menor quantidade de peças disponíveis (Quadro 3.1). Note-se que as profundidades dos furos equivalem aos comprimentos de colagem, os quais estão em conformidade com os limites sugeridos por Chans *et al* (2013), para madeiras densas, e por Broughton e Hutchinson (2001a), apresentados no Capítulo 2, secção 2.4.2.



Figura 3.6- Furação dos provetes através de um torno mecânico.

Concluído o processo de furação, realizou-se uma limpeza com recurso a escovilhão e jato de ar comprimido da totalidade dos furos, de forma a eliminar poeiras ou resíduos que pudessem afetar a aderência entre a cola e a madeira (Figura 3.7).

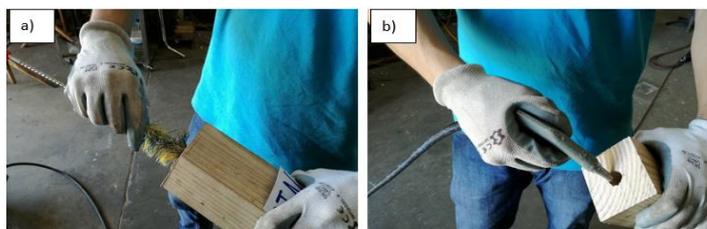


Figura 3.7- Limpeza dos furos com recurso a escovilhão a), e jato de ar comprimido b).

- Preparação dos varões:

Os varões de aço roscado foram fornecidos em comprimentos de 1 metro, pelo que a primeira etapa da sua preparação consistiu no corte transversal em segmentos de 20 cm e 25 cm (Figura 3.8), estes últimos destinados exclusivamente aos furos com 120 mm de profundidade, de modo a garantir o comprimento de colagem desejado, e um comprimento adicional destinado à amarração das garras da máquina de ensaio.



Figura 3.8- Corte transversal dos varões de aço roscado em serra de fita.

Para assegurar as melhores condições de aderência da cola, os varões foram posteriormente submersos em água a ferver, lavados e escovados com água e sabão neutro, garantindo-se assim o desengorduramento e a remoção de outras sujidades.

No sentido de garantir a perfeita centragem dos varões roscados nos furos, foram colados 3 “grãos” metálicos, a intervalos de 120° segundo o perímetro e em duas secções longitudinais do varão, com espessura igual à da linha de cola (Figura 3.9). Esta foi de 2,25 mm, equivalente à semi-diferença entre o diâmetro dos furos (16,5 mm) e o diâmetro nominal dos varões M12, congruente com os valores sugeridos por Tlustochowicz *et al* (2011), apresentados na secção 2.4.3.

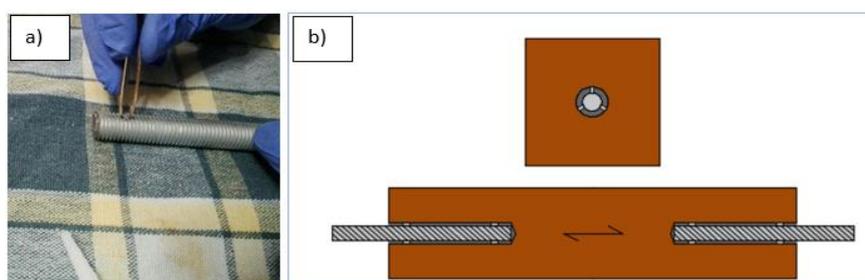


Figura 3.9- Colagem dos grãos metálicos a). Efeito final após a colagem dos grãos b).

- Colagem:

Concluída a preparação dos provetes de madeira e dos varões de aço roscado, realizou-se a colagem dos varões no interior dos furos. Esta foi dividida em duas etapas, procedendo-se à colagem numa extremidade e, após 4 dias de cura, repetindo-se o processo de colagem para a outra extremidade. Segundo o fabricante da cola, após o primeiro dia de cura obtém-se cerca de 50% da sua resistência bastando, para se obter a resistência necessária ao simples manuseamento dos provetes, apenas algumas horas. Ainda assim, por segurança, optou-se por separar as duas etapas de colagem em 4 dias.

A preparação da cola foi realizada de acordo com a ficha técnica do produto disponibilizada pelo fabricante. Foram misturados os dois componentes (A e B), na relação em peso de A:B=1:2, com um misturador elétrico durante pelo menos 3 minutos (Figura 3.10). As misturas foram realizadas em pequenas quantidades devido ao tempo em aberto (*pot life*) da cola, cerca de 45 minutos. Este inviabiliza a simples mistura dos componentes pré-doseados das duas embalagens uma vez que, quando ultrapassado, a cola endurece e a quantidade que ficou por aplicar é desperdiçada. Após misturados os componentes, a baixa viscosidade da cola permitiu o seu vazamento direto nos furos dos provetes de madeira, a partir de um recipiente de plástico (Figura 3.11- a)).

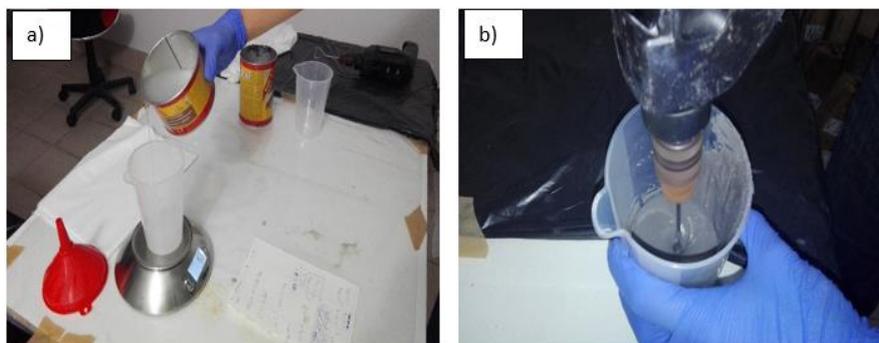


Figura 3.10- Doseamento dos componentes a). Mistura dos componentes b).

A introdução dos varões no interior dos furos foi efetuada de forma manual em rotação lenta no sentido da rosca, para que a formação de bolhas de ar e, conseqüentemente, a perda de superfície de contacto entre os materiais aderentes fosse minimizada (Figura 3.11- b)). O excesso de cola que emergia dos furos foi cuidadosamente removido com recurso a uma espátula, de forma a que o comprimento de colagem não fosse alterado pela sua acumulação exterior em torno do varão, tal como ilustrado na Figura 3.12.

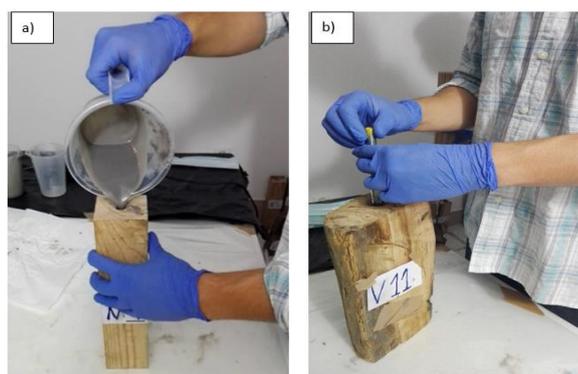


Figura 3.11- Vazamento da cola nos furos a). Inserção dos varões em rotação lenta b).

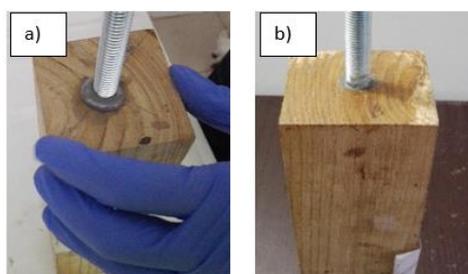


Figura 3.12- Excesso de cola no provete a). Cola em excesso removida b).

3.2.3 Ensaios experimentais

Terminado o fabrico dos provetes de GiRs, de acordo com a geometria ilustrada na Figura 3.13, foram definidas várias séries, diferenciadas pelo comprimento de colagem e pelo tipo de

madeira (nova e antiga), apresentadas no Quadro 3.1. Dada a irregularidade das secções transversais dos provetes de madeira antiga, não são aqui apresentadas as suas dimensões. Contudo, salienta-se que foi sempre respeitada uma distância do centro do varão ao bordo livre da madeira de 30 mm (2,5 vezes o diâmetro do varão), coerente com o recomendado pela maioria dos estudos e métodos de dimensionamento disponíveis na literatura.

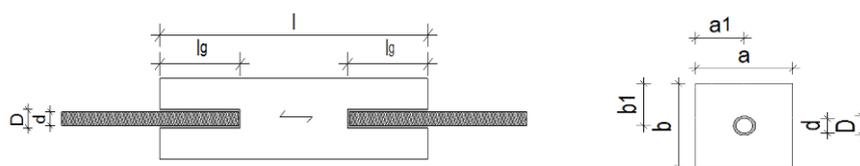


Figura 3.13- Perfil longitudinal (esq^a) e transversal (dir^a) dos provetes de GiRs.

Quadro 3.1- Propriedades geométricas dos provetes de GiRs.

Série	Tipo de madeira	Número de provetes	Diâmetro do varão- d (mm)	Espessura da linha de cola (mm)	Diâmetro do furo- D (mm)	Comprimento de colagem- lg (mm)	Distância ao bordo livre- a ₁ e b ₁ (mm)
G1-N	Nova	8	12	2,25	16,5	75	35
G2-N	Nova	7	12	2,25	16,5	90	35
G3-N	Nova	7	12	2,25	16,5	105	35
G4-N	Nova	4	12	2,25	16,5	120	35
G1-V	Antiga	5	12	2,25	16,5	75	*
G2-V	Antiga	8	12	2,25	16,5	90	*
G3-V	Antiga	2	12	2,25	16,5	105	*

*- Dada a irregularidade das secções transversais dos provetes não se apresentam as respectivas distâncias do centro do varão ao bordo livre da madeira, contudo foi sempre respeitado a distância mínima de 2,5 vezes o diâmetro do varão.

A determinação experimental da resistência ao arranque de GiRs compreendeu o ensaio de um total de 41 provetes de madeira nova e de madeira antiga, em configurações do tipo tração-tração (Figura 3.14- a) e b)). Posteriormente, as extremidades que permaneceram intactas nestes ensaios foram submetidas a ensaios do tipo tração-compressão (Figura 3.14- c) e d)). Neste caso, teve-se presente a possibilidade de o primeiro ensaio ter enfraquecido a ligação e, em consequência, os resultados poderem ser inferiores aos do ensaio anterior, o que seria inconclusivo quanto à possibilidade de a modalidade de ensaio do tipo tração-compressão poder proporcionar estimativas adequadas da resistência da ligação. De um ponto de vista prático seria desejável que tais estimativas fossem adequadas, uma vez que esta variante requer provetes de madeira menores e colagem do varão em apenas uma extremidade, o que se traduz em economia de materiais e de mão-de-obra, e minimiza erros de execução, como a eventual excentricidade entre o eixo dos varões.

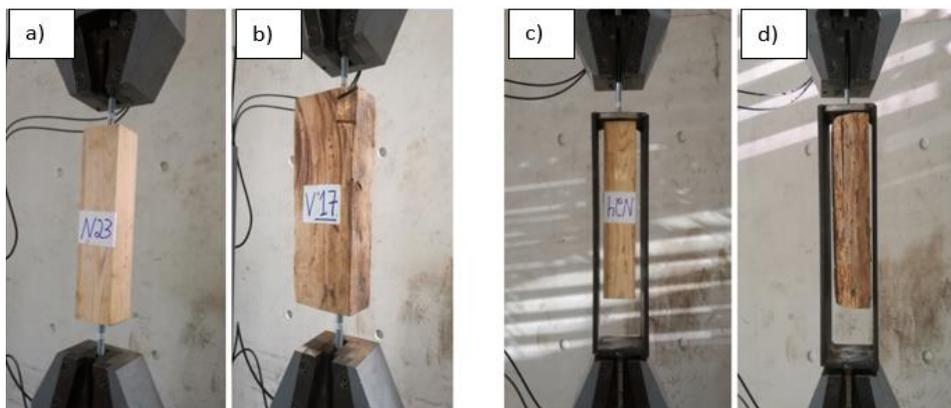


Figura 3.14- Ensaio de tração-tração em madeira nova a), e em madeira antiga b). Ensaio de tração-compressão em madeira nova c), e em madeira antiga d).

Os ensaios foram realizados seguindo o método estipulado na norma desenvolvida para ligadores mecânicos, EN 26891:1991 (CEN, 1991), numa máquina de ensaio universal. De acordo com a norma, a carga foi aplicada da seguinte forma (Figura 3.15):

1. Aplicação de carga (F) até 40% da força de rotura estimada (F_{est});
2. Patamar de carga (F) constante a 40% da força de rotura estimada (F_{est}) durante 30 segundos;
3. Redução de carga (F) até 10% da força de rotura estimada (F_{est});
4. Patamar de carga (F) constante a 10% da força de rotura estimada (F_{est}) durante 30 segundos;
5. Aplicação de carga (F) até à rotura.

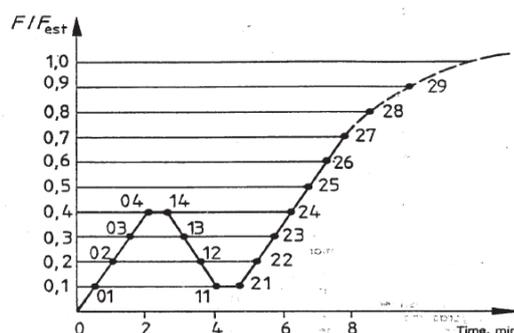


Figura 3.15- Esquema de carregamento utilizado no ensaio de GiRs, (CEN, 1991).

A carga de rotura foi estimada, para cada comprimento de colagem, pelo método da ENV 1995-2:1997 (CEN, 1997) apresentado na secção 2.7, considerando o valor característico da massa volúmica da madeira de Castanho da classe de qualidade “MEF”, definida na norma espanhola UNE 56546 (AENOR, 2013), de 510 kg/m^3 , e convertendo depois o valor estimado para valor

médio (Quadro 3.2). Esta conversão foi realizada por aplicação das Equações (2) e (3) da secção 4.2 deste documento, assumindo um coeficiente de variação de 15%, habitualmente adotado para traduzir a variabilidade estatística das propriedades mecânicas da madeira, e uma amostra de dimensão infinita. Embora o método utilizado para estimar a carga de rotura seja aplicável apenas a espécies resinosas, admitiu-se igualmente válido para a madeira de Castanho (espécie folhosa), dada a inexistência de uma regra própria.

Quadro 3.2- Cargas de rotura estimadas pelo método da ENV 1995-2:1997 (CEN, 1997).

Série	Carga de rotura estimada (F_{est}) [kN]
G1-N	37,9
G2-N	45,5
G3-N	53,1
G4-N	60,6
G1-V	37,9
G2-V	45,5
G3-V	53,1

A norma EN 26891:1991 (CEN, 1991) estabelece uma velocidade de carregamento em controlo de força de 20% da carga de rotura estimada por minuto, com valor constante até 70% dessa carga (Figura 3.15). Ultrapassado esse patamar, a norma refere que a velocidade de carregamento deve continuar com um valor constante, ajustado para que a rotura ocorra num tempo adicional de 3 a 5 minutos. Deste modo, a velocidade de carregamento considerada foi de 0,15 kN/s até 70% da força de rotura estimada para cada ensaio, e 0,08 kN/s até à rotura, sendo que a duração total dos ensaios nunca foi inferior a 10 minutos nem superior a 15 minutos. Esta velocidade foi calculada para o caso do comprimento de colagem de 90 mm e adotada para todos os ensaios, tendo em atenção que os limites de duração total dos ensaios foram sempre respeitados.

3.3 Determinação do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão

3.3.1 Produção dos provetes

As peças utilizadas nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade global paralelo ao fio e da resistência à flexão foram obtidas através do corte longitudinal dos provetes de GiRs (Figura 3.16).

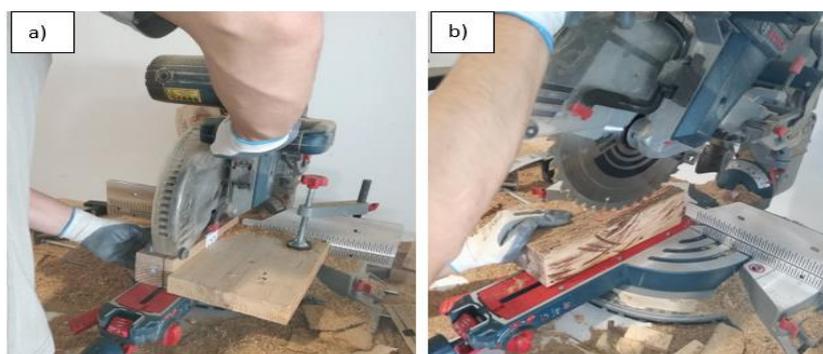


Figura 3.16- Corte das peças de ensaio dos provetes de GiRs de madeira nova a), e antiga b).

Dada a irregularidade geométrica dos elementos de madeira antiga e de alguma degradação superficial notória, os comprimentos úteis disponíveis para extração das peças para ensaio à flexão (provetes) de madeira limpa antiga eram inferiores aos da madeira nova. Uma vez que a norma EN 408:2010+A1 (CEN, 2012), seguida na realização destes ensaios, estabelece um vão entre apoios de $18 \pm 3h$ (Figura 3.17), sendo h a altura nominal dos provetes de ensaio, optou-se por definir um vão entre apoios de 27 cm para os provetes de madeira nova, e de 19,5 cm para os de madeira antiga. Consequentemente, foi então estabelecida uma altura nominal (h) de 1,5 cm para os provetes madeira nova, e de 1,3 cm para os de madeira antiga. Esta norma recomenda ainda a utilização de provetes com comprimentos totais não inferiores a 19 vezes a altura nominal definida. Todavia, não foi possível cumprir esta recomendação em três provetes de madeira antiga, não obstante serem conseguidos os 19,5 cm de vão entre apoios.

Foram assim obtidos um total de 28 provetes de madeira limpa, dos quais 11 de madeira antiga, 13 de madeira nova, e 4 destinados a testes preliminares para estimar a carga de rotura. Note-se que, para efeitos de aplicação das expressões da EN 408:2010+A1, para o cálculo do módulo de elasticidade e da resistência à flexão, foram consideradas as dimensões reais dos provetes, medidas com paquímetro em vários pontos das mesmas. As medições realizadas para cada provete encontram-se detalhadas no Anexo B, Quadro A.3.

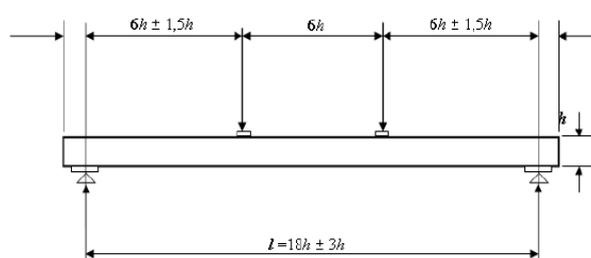


Figura 3.17- Esquema de ensaio para determinação do o módulo de elasticidade global e resistência à flexão, (CEN, 2012).

3.3.2 Ensaios experimentais

Na realização destes ensaios foi utilizado o esquema de flexão de 4 pontos da Figura 3.17, preconizado na EN 408:2010+A1 (CEN, 2012), tanto para a determinação do módulo de elasticidade global como para a da resistência à flexão (Figura 3.18- a)).

Os provetes foram apoiados em cilindros metálicos de elevada rigidez, com liberdade de rotação e fixos a uma bancada de ensaio. A carga foi aplicada através duas peças metálicas igualmente cilíndricas e também com elevada rigidez, fixas a uma estrutura metálica auxiliar com 50 kg de massa total, acoplada a um atuador. A esta estrutura de ensaio foi ainda adicionada, entre o atuador e a estrutura metálica auxiliar, uma célula de carga para medição da força aplicada. O deslocamento foi, por sua vez, medido por um defletómetro posicionado no ponto central de cada provete (Figura 3.18- b)).

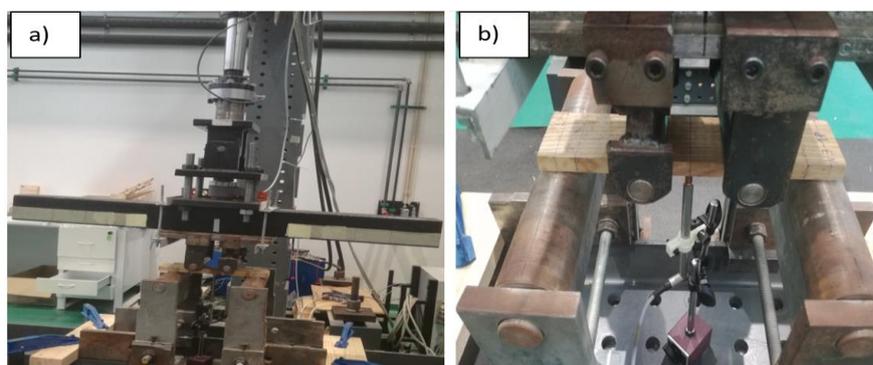


Figura 3.18- Configuração dos ensaios de flexão a). Posicionamento do defletómetro b).

Para cada provete foi realizado um primeiro ensaio não destrutivo, para determinação do módulo de elasticidade global com medição do deslocamento e, após a retirada do defletómetro, um segundo ensaio destrutivo para a determinação da resistência à flexão.

Os ensaios para determinação do módulo de elasticidade global foram realizados em controlo de deslocamento, com aplicação de carga a uma velocidade constante de 0,04 mm/s, correspondente a aproximadamente 0,003h mm/s, sendo h correspondente à altura nominal da secção dos provetes. Os ensaios deram-se por concluídos quando a carga aplicada atingiu sensivelmente 40% do valor de rotura estimado. Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em controlo de força, com taxa de aplicação de carga constante, ajustada à previsão de ocorrência da rotura num intervalo de 300 ± 120 segundos, como recomendado pela norma supracitada.

3.4 Determinação do teor de água e da massa volúmica

3.4.1 Produção dos provetes

O teor de água e a massa volúmica da madeira foram determinados em 28 peças obtidas pelo corte dos provetes de madeira nova e antiga utilizados nos ensaios de flexão os quais, por sua vez, haviam sido extraídos dos provetes utilizados nos ensaios de arranque de GiRs.

A norma EN 13183-1 (CEN, 2002) estabelece que a obtenção das peças para determinação do teor de água deve ocorrer a uma distância não inferior a 30 cm dos topos dos provetes utilizados nos ensaios experimentais. Contudo, a dimensão dos provetes ensaiados impossibilita o cumprimento dessa indicação e, como tal, as peças foram cortadas dos provetes ensaiados em flexão o mais distante possível dos seus topos (Figura 3.19- a)). Após a extração das peças através de corte, as suas dimensões e massa foram devidamente medidas e anotadas, com recurso a um paquímetro e a uma balança de alta precisão, salientando-se que o comprimento mínimo de 20 mm na direção do fio da madeira, recomendado pela norma acima mencionada, foi respeitado em todos os casos. As medições realizadas poderão ser consultadas no Anexo C, Quadro A.4.

3.4.2 Ensaios experimentais

O teor de água foi obtido experimentalmente de acordo com a norma EN 13183-1 (CEN, 2002), e a massa volúmica foi determinada a partir da norma ISO 12061-2 (ISO, 2014). De acordo com a norma que regula a determinação do teor de água, as peças de madeira foram colocadas num tabuleiro no interior de um forno a uma temperatura de 103°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) (Figura 3.19- b)). As pesagens das peças foram realizadas numa balança de alta precisão, em intervalos de tempo nunca inferiores a 2 horas (Figura 3.19- c)). Quando a diferença entre duas pesagens consecutivas foi inferior a 0,1% deu-se por terminado o ensaio e registou-se a massa da peça em estado anidro.



Figura 3.19- Peças obtidas para determinação do teor de água a). Colocação das peças no interior do forno b). Pesagem das peças c).

3.5 Conclusões do Trabalho Experimental

O estudo apresentado neste documento pretende contribuir para a melhoria do conhecimento do comportamento de ligações com varões colados (GiRs) em madeira nova e antiga de Castanho (*Castanea sativa* Mill.), espécie folhosa frequente em construções de madeira antigas. Neste sentido, foi realizado um trabalho experimental para determinação da resistência ao arranque de varões de aço roscado colados com cola epoxídica em provetes de madeira nova, proveniente diretamente de serração, e de madeira antiga, proveniente de obras de reabilitação e/ou demolição. Este trabalho compreendeu a produção e o ensaio de 41 provetes de GiRs, tendo o comprimento de colagem sido o parâmetro variável. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma EN 26891:1991 (CEN, 1991), primeiro em tração-tração, e depois em tração-compressão com os varões que não foram arrancados na primeira série de ensaios. A velocidade carregamento considerada, em todos os ensaios, foi de 0,15 kN/s até 70% da força de rotura estimada para cada ensaio, e 0,08 kN/s até à rotura, sendo que a duração total destes nunca foi inferior a 10 minutos nem superior a 15 minutos

Complementarmente ao estudo da resistência ao arranque de GiRs, realizaram-se ensaios para a determinação do módulo de elasticidade global paralelo ao fio e da resistência à flexão em 28 provetes de madeira, obtidos através do corte longitudinal dos provetes de GiRs. Foi usado um esquema de flexão de 4 pontos tendo sido, para cada provete, realizado um primeiro ensaio não destrutivo para determinação do módulo de elasticidade global, em controlo de deslocamento com aplicação de carga a uma velocidade constante de 0,04 mm/s, dando-se por concluído quando a carga aplicada atingia sensivelmente 40% do valor de rotura estimado, e um segundo ensaio destrutivo para determinação da resistência à flexão, em controlo de força com velocidade de aplicação de carga constante ajustada à previsão ocorrência da rotura num intervalo de 300 ± 120 segundos, ambos conforme estipulado na norma EN 408:2010+A1 (CEN, 2012). Foi também determinado o teor de água e a massa volúmica da madeira utilizada no trabalho experimental, em 28 peças cortadas o mais distante possível dos topos dos provetes ensaiados em flexão, de acordo com as normas EN 13183-1 (CEN, 2002) e ISO 12061-2 (ISO, 2014) respetivamente.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados do estudo comparativo entre as várias abordagens de dimensionamento de varões colados expostas no Capítulo 2, e do estudo experimental de varões isolado colados em provetes de madeira de Castanho nova e antiga sujeitos ao arranque, descrito no Capítulo 3. Na apresentação de resultados privilegiar-se-á a apresentação gráfica ou, alternativamente, em quadros resumo, para que a compreensão do leitor seja facilitada. Em alguns casos, para consulta de dados mais detalhados, complementa-se o texto com a informação adicional contida nos Anexos.

4.2 Comparação entre métodos de dimensionamento de varões colados

Observando os métodos de dimensionamento apresentados na secção 2.7, destinados a estimar a resistência ao arranque de varões isolados colados paralelamente ao fio, facilmente se percebe que os parâmetros presumivelmente influentes nessa resistência não são consensuais, permitindo anteciper uma significativa disparidade de valores fornecidos pelos diferentes métodos. Esta suposição é confirmada pela análise comparativa efetuada de seguida.

Alguns dos métodos apresentados fornecem valores médios de resistência ao arranque (F_{mean}), outros valores característicos (F_k) e, num dos métodos, a resistência estimada é um valor de cálculo (F_d). Para efeitos de comparabilidade entre métodos, optou-se por exprimir todas as resistências ao arranque em termos de valores característicos. Para calcular a relação entre os valores médios e os característicos assumiu-se um coeficiente de variação (COV) de 15%, habitualmente adotado para traduzir a variabilidade estatística das propriedades mecânicas da madeira, na falta de informação mais rigorosa. Quer isto dizer que o desvio padrão (s) da amostra é igual a 15% do seu valor médio (\bar{x}).

$$COV (\%) = \left(\frac{s}{\bar{x}} \right) 100 \Rightarrow s = \frac{COV (\%)}{100} \bar{x} \Rightarrow s = 0,15 \bar{x} \quad (2)$$

Considerando uma amostra de dimensão infinita, é possível obter-se o seu valor característico (x_k) a partir da seguinte equação:

$$x_k = \bar{x} - 1,64 s \cong 0,75\bar{x} = \left(\frac{3}{4}\right)\bar{x} \quad (3)$$

Para calcular a relação entre os valores médios e os de cálculo (Equação 4), utilizou-se a expressão da EN 1995-1-1 (CEN, 2004), considerando o coeficiente parcial de segurança para ligações, γ_M , de 1,3 e um fator K_{mod} igual à unidade, uma vez que as condições de ensaio correspondem a classe de serviço 1 e a duração, de alguns minutos, se pode considerar intermédia entre a ação instantânea e a de curta duração.

$$F_d = k_{mod} \frac{F_k}{\gamma_M} \quad (4)$$

Em suma, foram então utilizadas as seguintes relações:

- $F_k = (3/4) F_{mean}$;
- $F_k = 1,3 F_d$.

O gráfico da Figura 4.1 apresenta os valores característicos, obtidos por aplicação destas regras, da resistência ao arranque estimada pelos vários métodos, supondo o seguinte caso de estudo:

- Materiais: Cola epoxídica, varão de aço roscado, madeira das classes de resistência C24 (a azul) e C30 (a laranja) de acordo com a EN 338 (CEN, 2009);
- Comprimento de colagem: 100 mm;
- Espessura da linha de cola: 1 mm;
- Diâmetro nominal do varão: 12 mm;
- Diâmetro do furo: 14 mm;
- Secção transversal do elemento de madeira: 60 mm x 60 mm;
- Distância do eixo do varão ao bordo livre: 30 mm;

Por não ter a ver com os métodos em comparação, admitiu-se não ser condicionante a rotura plástica do varão, pelo que não se especificou a classe do aço.

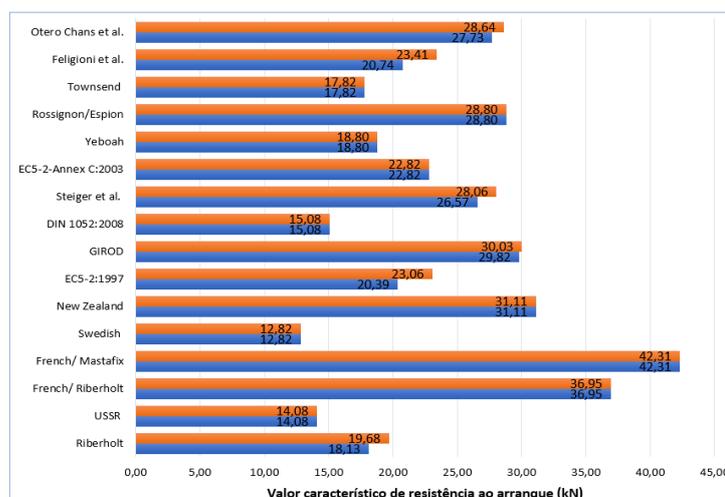


Figura 4.1- Resistências ao arranque características (kN) dos métodos de dimensionamento.

A discrepância de valores fornecidos pelos métodos é notória neste gráfico, observando-se que, para o mesmo cenário, os valores de resistência previstos variam de 13 kN a 42 kN. O gráfico permite ainda observar que, aumentando a classe de resistência da madeira de C24 para C30, e pese embora que a resistência ao corte se mantenha constante (valor característico de 4,0 MPa), alguns dos métodos preveem um aumento da capacidade de carga devido ao aumento da massa volumica e, no caso do método do projeto GIROD (Bengtsson e Johansson, 2002), do módulo de elasticidade global paralelo ao fio.

O comprimento de colagem é um parâmetro geométrico preponderante no desempenho deste tipo de ligações e, por conseguinte, a sua influência na resistência ao arranque de GiRs é considerada na totalidade dos métodos. No entanto, como ilustram os gráficos da Figura 4.2, a relação entre eles não é consensual, uma vez que a influência deste parâmetro na referida resistência, prevista pelos vários métodos, é manifestamente desigual. O método proposto por Chans *et al* (2013) distingue-se dos restantes, em virtude de considerar que a partir de um certo comprimento de colagem deixe de existir acréscimo de resistência, observando-se até a sua redução. Na elaboração destes gráficos foi considerado o seguinte caso de estudo:

- Materiais: Cola epoxídica, varão de aço roscado, madeira da classe C45 de acordo com a EN 338 (CEN, 2009);
- Comprimento de colagem: Variável;
- Espessura da linha de cola: 1 mm (Figura 4.2- Esq^a.), 2 mm (Figura 4.2- Dir^a.);
- Diâmetro do varão: 12 mm;
- Diâmetro do furo: 14 mm (Figura 4.2- Esq^a.), 16 mm (Figura 4.2- Dir^a.);
- Secção transversal do elemento de madeira: 60 mm x 60 mm;
- Distância do centro do varão ao bordo livre: 30 mm;

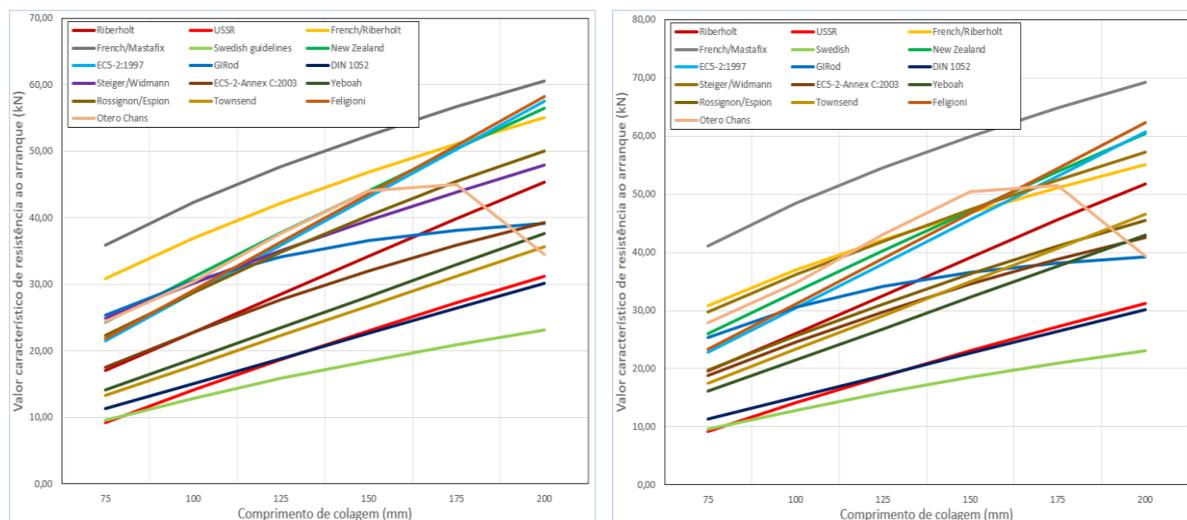


Figura 4.2- Resistência característica ao arranque (kN) versus comprimento de colagem (mm) e espessura da linha de cola (Esq^a.: 1 mm; Dir^a.: 2 mm).

O diâmetro do varão é outro parâmetro geométrico bastante influente no comportamento de GiRs, uma vez que determina, conjuntamente com a espessura da linha de cola, a área lateral de colagem da ligação. Como tal, é também tido em conta na generalidade dos métodos, como é perceptível pelos gráficos da Figura 4.3. À semelhança do que ocorre para o comprimento de colagem, a influência deste parâmetro na resistência ao arranque não é consensual, pelo que os gráficos variam também de forma desigual de método para método. Na elaboração destes gráficos foi considerado o mesmo caso de estudo que o anterior, mas fazendo agora variar o diâmetro do varão e o diâmetro do furo, e fixando o comprimento de colagem em 100 mm.

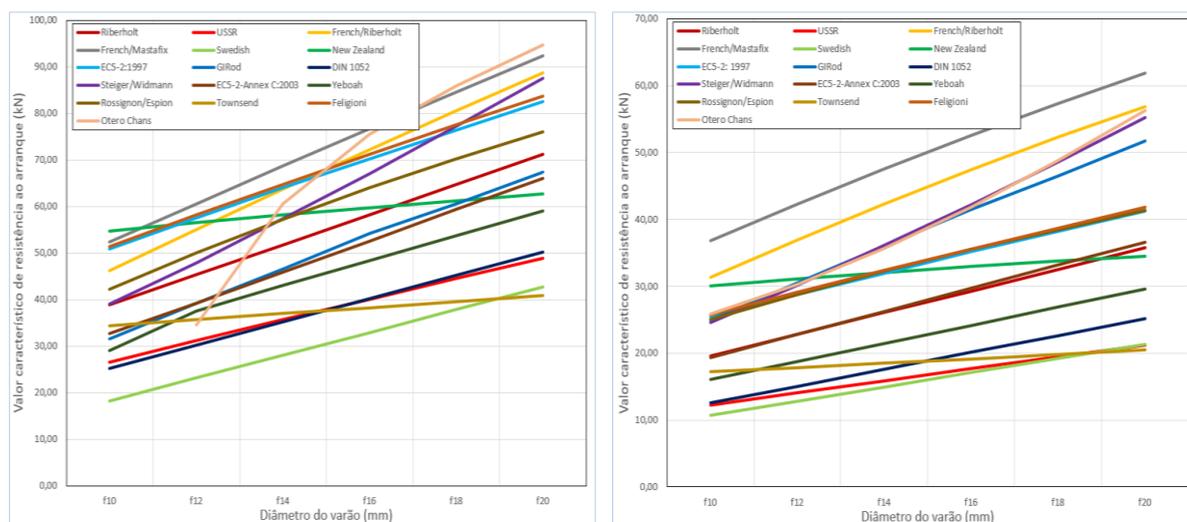


Figura 4.3- Resistência característica ao arranque (kN) versus diâmetro do varão (mm) e espessura da linha de cola (Esq^a.: 1 mm; Dir^a.: 2 mm).

As Figuras 4.2 e 4.3 evidenciam a enorme amplitude de estimativas fornecidas pelos vários métodos para o mesmo cenário em estudo. O método de dimensionamento da ENV 1995-2:1997 (parte 2 da versão de 1997 do Eurocódigo 5) (CEN, 1997) encontra-se, em todas as situações, no grupo dos métodos menos conservadores, todavia mantém-se sempre limitado superiormente por alguns ainda menos seguros. Já o método do anexo C do *draft* de 2003 da mesma norma (CEN, 2003) *apud* (Larsen, 2011), situa-se em todos os casos analisados numa zona intermédia dos gráficos, sendo mais conservador do que o anterior. Os métodos Russo (Turkovsky, 1989), Sueco (Carling, 1992) *apud* (Tlustochowicz *et al*, 2011) e Alemão (DIN, 2008) aparentam ser os mais conservadores, e os métodos franceses (Faye *et al*, 2004) os menos conservadores.

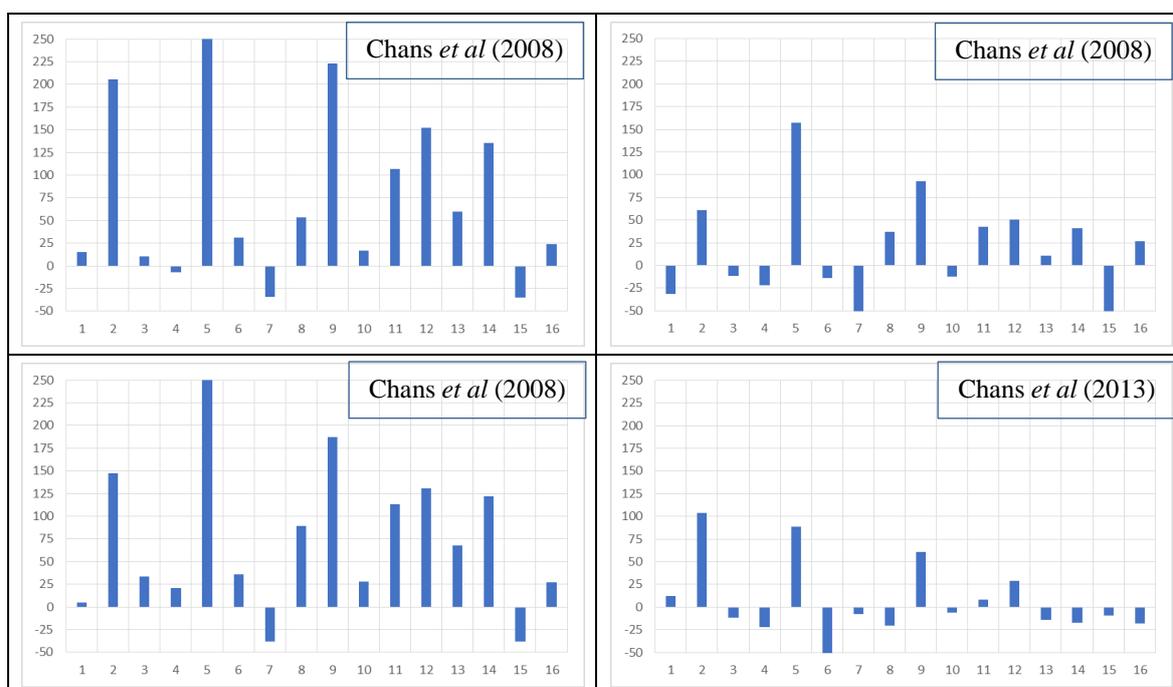
A comparação entre métodos de dimensionamento realizada permite comprovar a dispersão de estimativas de resistências ao arranque fornecidas, ilustrar como variam de acordo com certos parâmetros, e prever quais os métodos que fornecem estimativas mais e menos conservadoras. Contudo, importa referir que as considerações efetuadas poderão perder a validade para intervalos de valores não contemplados nos gráficos. Além disso, a falta de inclusão de resultados experimentais constitui também uma limitação à análise realizada. Para colmatar essas limitações, foi reunido um conjunto de resultados experimentais de diversos estudos disponíveis na literatura e, posteriormente, foram comparados com os métodos de dimensionamento apresentados. Realça-se que este estudo não se restringiu a nenhum intervalo de propriedades geométricas e/ou materiais, dada a grande diversidade de configurações utilizadas nos estudos experimentais cujos resultados se comparam.

Idealmente, a comparação mais lógica e direta consistiria em sobrepor, nos gráficos anteriores (Figuras 4.2 e 4.3), os pontos correspondentes aos valores das cargas de rotura obtidas nos ensaios experimentais. No entanto, a grande variedade de configurações geométricas e materiais dos provetes ensaiados nas diversas investigações inviabiliza esta solução comparativa. Note-se que somente o tipo de cola (epoxídica) e o varão em aço roscado são comuns à generalidade dos ensaios apresentados. A forma de comparação encontrada foi, então, a de justapor o valor da carga de rotura de cada série individual de ensaios experimentais, com as estimativas fornecidas pelos métodos para a configuração específica utilizada nessa série, através de um gráfico de barras. Assim, para cada série de ensaios, foi elaborado um gráfico que reflete as diferenças em termos percentuais (Equação 5) entre o valor experimental da carga de rotura, e as estimativas fornecidas por cada método. Estas diferenças são representadas em ordenadas, indicando o eixo das abcissas um simples número de ordem, atribuído na secção 2.7 deste documento a cada método. Esta solução comparativa torna possível a identificação, para cada série, dos métodos que fornecem estimativas seguras (diferenças positivas) ou inseguras (diferenças negativas).

$$\text{Diferença (\%)} = 100(R_{k,\text{ensaio}} - R_{k,\text{método}})/R_{k,\text{método}} \quad (5)$$

Para efeitos de comparabilidade, tanto os valores da resistência ao arranque estimados pelos métodos ($R_{k,\text{método}}$) como os obtidos nos ensaios experimentais ($R_{k,\text{ensaio}}$) foram expressos em termos de valores característicos. A conversão para valores característicos foi realizada da forma descrita anteriormente, assumindo um coeficiente de variação de 15%. Os valores das propriedades físicas (massa volúmica, nomeadamente) e mecânicas dos provetes, necessários para estimar as cargas de rotura, foram obtidos diretamente dos estudos apresentados ou, quando a informação não estava disponível ou não era suficiente, foram determinados a partir da atribuição de uma classe resistente pela EN 338 (CEN, 2009) no caso de provetes obtidos de madeira maciça, ou pela EN 1194 (CEN, 1999) no caso de provetes obtidos de madeira lamelada colada. Importa referir que a EN 1194 (CEN, 1999) foi revogada pela EN 14080:2013 (CEN, 2013), no entanto por apenas dispor de uma versão *draft* da última, este estudo utilizou a primeira. Contudo, a EN 14080:2013 (CEN, 2013) prevê propriedades físicas e mecânicas superiores para as classes utilizadas neste trabalho e, portanto, os métodos inseguros seriam ainda mais inseguros, pelo que as conclusões do trabalho não são alteradas.

Este estudo incluiu a análise de um total de 99 séries de ensaios, ou seja, foram elaborados 99 gráficos comparativos dos quais, por óbvia limitação de espaço, apenas alguns, aleatoriamente selecionados, serão apresentados neste capítulo (Figura 4.4), remetendo-se os restantes para o anexo D (Figura A.1).





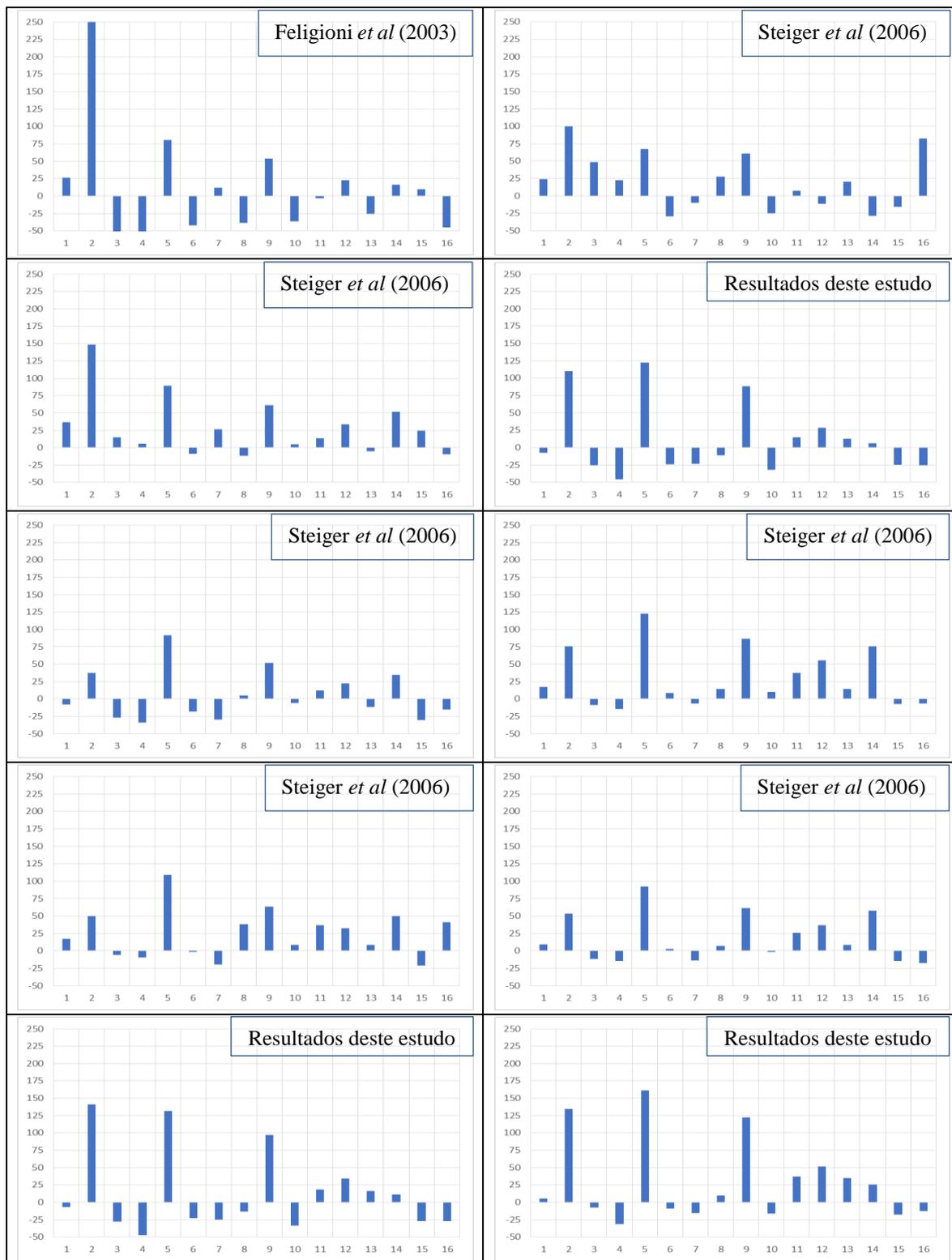


Figura 4.4- Saldo entre resistências ao arranque estimadas pelos métodos de dimensionamento e resultados experimentais de vários estudos.

A síntese da totalidade dos gráficos apresenta-se no Quadro 4.1 e, graficamente, na Figura 4.5. Observando o Quadro 4.1, verifica-se que a totalidade dos resultados fornecidos pelos métodos 2, 5 e 9 (Quadro 2.2 da secção 2.7) se situam do lado da segurança, tal como previsto no estudo comparativo elaborado anteriormente. Contudo, constata-se que são demasiado conservadores para utilização prática, principalmente os métodos 2 (Russo) e 5 (Sueco) uma vez que 72% e 66%, respetivamente, das estimativas fornecidas apresentam diferenças superiores a 100%, ou seja, superiores ao dobro, do valor característico aproximado, obtido do resultado experimental. O método que integrou a versão de 1997 da parte 2 do Eurocódigo 5 (CEN, 1997), representado pelo número 7, aparenta não demonstrar a segurança adequada uma vez que 68% das estimativas por ele fornecidas se situam do lado da insegurança. O método proposto no anexo C do *draft* da EN 1995-2 (CEN, 2003) *apud* (Larsen, 2011), método 11, parece ser o que melhor se ajusta aos resultados experimentais e, por isso, o método mais indicado para o dimensionamento de GiRs. Note-se que somente 7% das previsões por ele fornecidas se situam do lado da insegurança. Os métodos 4, 6 e 15 são aqueles que maior percentagem de estimativas inseguras apresentam.

Quadro 4.1- Percentagens de estimativas seguras e inseguras fornecidas pelos métodos de dimensionamento.

Método (ID):	Estimativas Seguras (%)	Estimativas Inseguras (%)	Total (%)
1	75	25	100
2	100	0	100
3	48	52	100
4	28	72	100
5	100	0	100
6	26	74	100
7	32	68	100
8	63	37	100
9	100	0	100
10	32	68	100
11	93	7	100
12	87	13	100
13	74	26	100
14	70	30	100
15	26	74	100
16	32	68	100

O gráfico da Figura 4.5 ilustra o apresentado no Quadro 4.1 e esclarece que, no geral, a percentagem de estimativas inseguras (a laranja) fornecidas pelos vários métodos é bastante pronunciada.

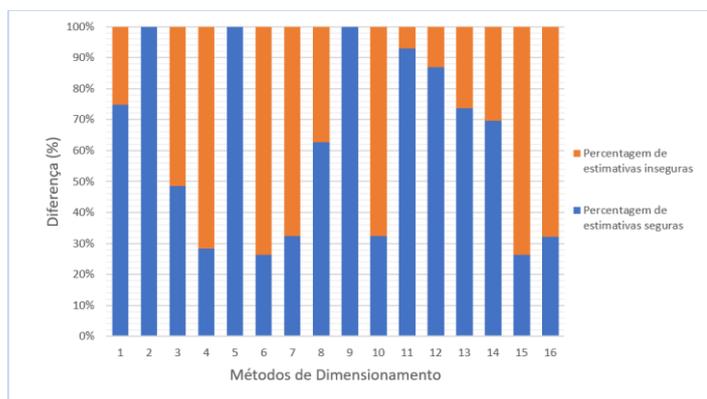


Figura 4.5- Gráfico ilustrativo da presumível segurança oferecida por cada método.

Importa salientar ainda que, dos 7% de previsões inseguras fornecidas pelo método 11, apenas cerca de 29%, ou seja, 2 previsões, representam diferenças superiores a 5% entre o valor estimado pelo método e o resultado experimental observado (Figura 4.6- em cima). O método proposto por Yeboah *et al* (2013), método 12, apresenta também uma parcela de estimativas do lado da segurança considerável, cerca de 87%, mas as que se situam do lado da insegurança diferem significativamente mais dos resultados experimentais (Figura 4.6- em baixo) em comparação com o método anterior.

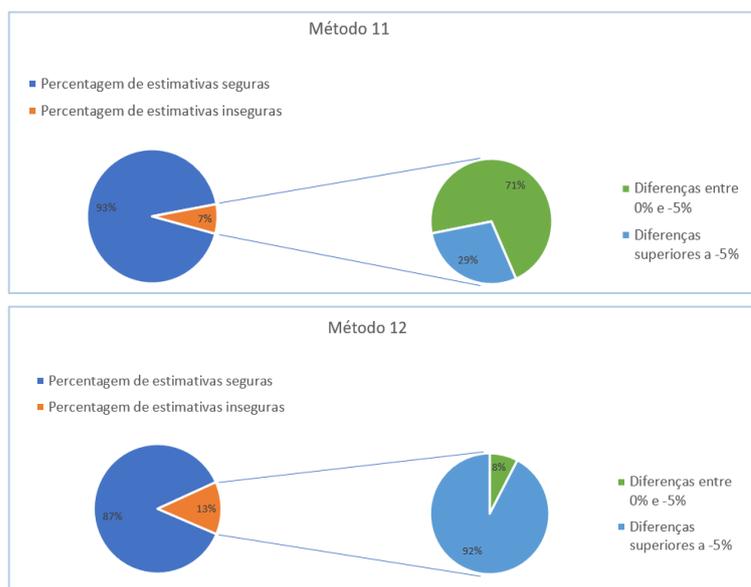


Figura 4.6- Estimativas fornecidas pelos métodos 11 (em cima) e 12 (em baixo).

4.3 Determinação da resistência ao arranque de varões isolados colados

Os resultados obtidos na determinação da resistência ao arranque de varões colados em madeira nova e antiga de castanho, nas configurações de ensaio de tração-tração e tração- compressão, são agora apresentados e analisados. Neste tipo de ensaios é frequente caracterizar as roturas

de cada ensaio não só através da sua carga de rotura, mas também do seu modo de rotura, uma vez que este fornece informações adicionais úteis à análise do comportamento da ligação, como se poderá ver de seguida. A Figuras 4.7 ilustra os diferentes modos de rotura observados nos ensaios realizados em madeira nova e em madeira antiga, a saber:

Modo a): Rotura coesiva por corte na madeira ao longo do comprimento de colagem (Figura 4.7- a) e e));

Modo b): Rotura coesiva por corte na linha de cola ao longo do comprimento de colagem (Figura 4.7- b) e f));

Modo c): Fratura (*splitting*) do elemento de madeira (Figura 4.7- c) e g));

Modo d): Rotura coesiva mista por corte na madeira e na cola ao longo do comprimento de colagem (Figura 4.7- d) e h)).

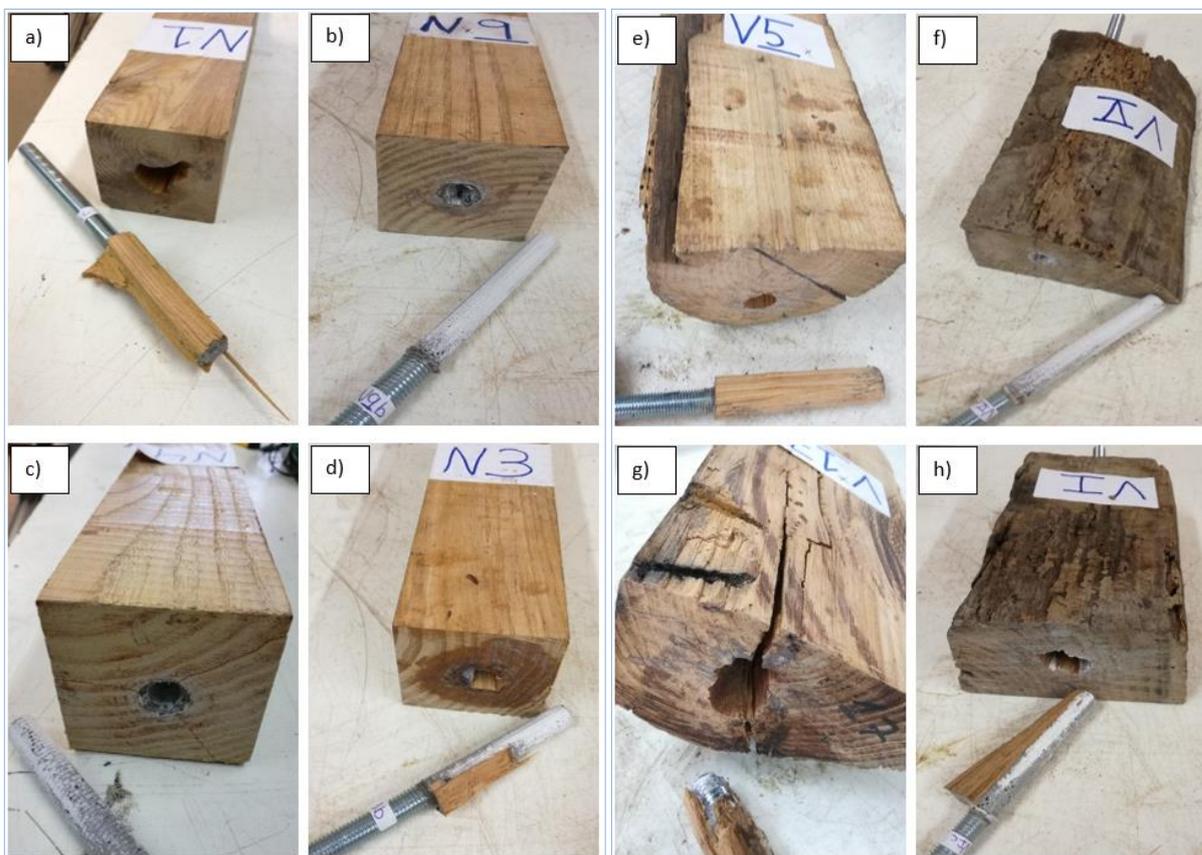


Figura 4.7- Modos de rotura observados nos ensaios de GiRs em madeira nova a)-d) (esq^a.), e em madeira antiga e)-h) (dir^a).

Os gráficos apresentados de seguida (Figura 4.8) pretendem ilustrar a frequência dos diferentes modos de rotura observados consoante o tipo de madeira e a configuração de ensaio utilizada.

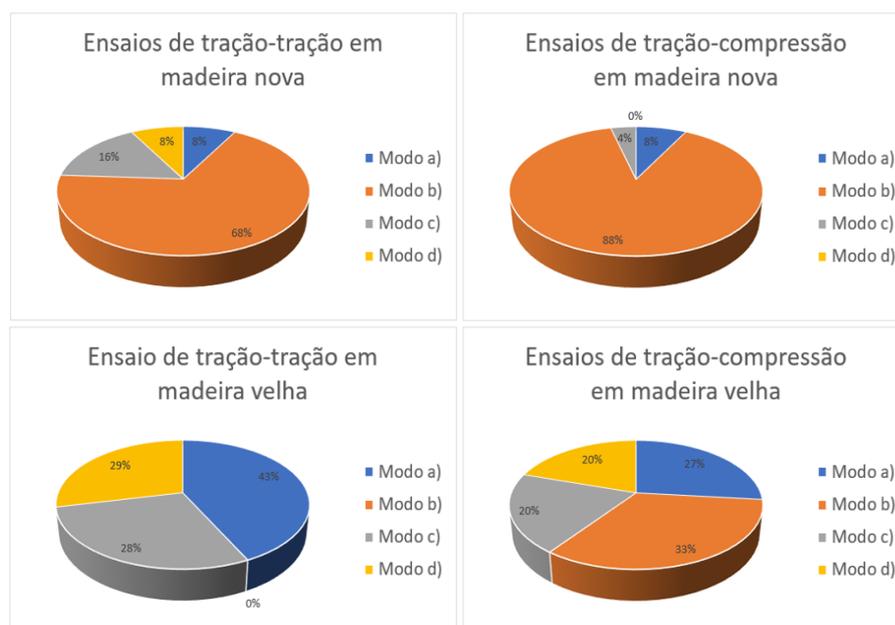


Figura 4.8- Modos de rotura em madeira nova (em cima) e madeira antiga (em baixo), nos ensaios de tração-tração (esq^a.) e de tração-compressão (dir^a.).

É notório que, em ambos os tipos de ensaio, a quantidade de roturas que ocorreram na madeira (Modos a) e c)) é substancialmente superior nos provetes de madeira antiga. Este aspeto é possivelmente explicado por uma resistência inferior da madeira antiga em comparação com a madeira nova. Esta diferença não tem a ver com a idade da madeira, mas antes com a possível ocorrência de degradação de origem biológica em serviço ou, eventualmente, com a menor qualidade original. Os ensaios de caracterização da resistência e rigidez, cujos resultados se discutem mais adiante, tiveram como objetivo principal obter informação adicional para o esclarecimento deste aspeto. Verifica-se que o modo de rotura c), correspondente à fratura (*splitting*) da madeira, ocorreu com menor frequência em ensaios do tipo tração-compressão, tanto nos provetes de madeira nova como nos de antiga. A explicação reside provavelmente na restrição ao movimento transversal devida à mobilização de atrito na interface madeira-chapa de aço, possibilitada pela compressão nesta superfície. Nos ensaios de tração-tração, o modo de rotura coesivo por corte na linha de cola, modo b), foi aquele que registou o maior número de ocorrências em madeira nova, mas já não em madeira antiga, não tendo mesmo registado qualquer ocorrência. Esta observação reforça a hipótese de uma superior qualidade da madeira nova em relação à antiga, resultando numa resistência ao corte local daquela superior à da cola. Importa ainda salientar que em várias roturas foram observadas algumas fissuras superficiais de pequenas dimensões no topo dos elementos de madeira, mas não se conhece a sua interferência no modo de rotura observado.

Os valores observados das cargas de rotura (F) dos varões colados sujeitos ao arranque são agora apresentados por meio de gráficos de dispersão na Figura 4.9, e sumarizados nos Quadros 4.2 e 4.3.

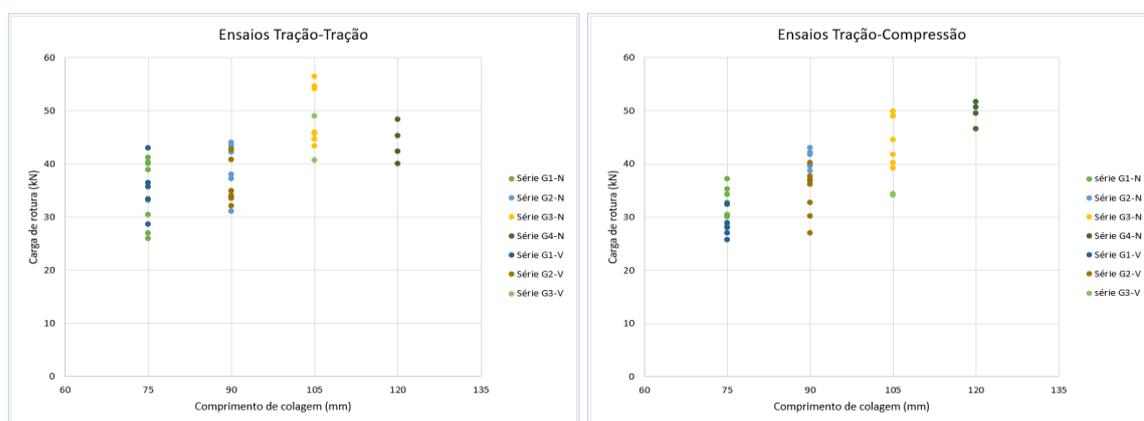


Figura 4.9- Cargas de rotura em tração-tração (esq.^a) e tração-compressão (dir.^a).

Analisando individualmente e através da Figura 4.9 as cargas de rotura de cada ensaio, é perceptível que as resistências ao arranque são semelhantes nos dois tipos de madeira estudados. Verifica-se também, ao contrário do expectável, o decréscimo de resistência nos ensaios de tração-tração de madeira nova quando o comprimento de colagem passa de 105 mm (série G3-N) para 120 mm (série G4-N). Este comportamento não é previsto por nenhum dos métodos de dimensionamento atualmente propostos na bibliografia, à exceção do de Chans *et al* (2013), que registaram tendência semelhante em ensaios de varões colados paralelamente ao fio da madeira.

Os Quadros 4.2 e 4.3 apresentam, para as séries de provetes definidas no Quadro 3.1 da secção 3.2.3, os valores máximos ($F_{m\acute{a}x}$), mínimos ($F_{m\acute{i}n}$), médios ($F_{m\acute{e}d}$) e característicos (F_k) das cargas de rotura obtidas experimentalmente, bem como o seu coeficiente de variação (COV) e as tensões de corte médias nas interfaces varão/cola (τ_1) e cola/madeira (τ_2).

Quadro 4.2- Síntese dos resultados experimentais obtidos nos ensaios de tração-tração.

Série	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$F_{m\acute{i}n}$ (kN)	$F_{m\acute{e}d}$ (kN)	COV (%)	F_k (kN)	τ_1 (N/mm ²)	τ_2 (N/mm ²)
G1-N	41,3	26,0	34,6	18,2	22,3	12,2	8,9
G2-N	44,0	31,1	39,3	12,6	28,8	9,9	7,2
G3-N	56,4	43,4	49,3	11,2	37,9	12,5	9,1
G4-N	48,4	40,0	44,0	8,2	34,9	9,7	7,1
G1-V	43,0	28,6	35,4	14,7	24,5	12,5	9,1
G2-V	42,7	32,2	36,0	11,4	28,0	10,6	7,7
G3-V	49,0	40,7	44,9	13,0	-	11,3	8,2

Quadro 4.3- Síntese dos resultados experimentais obtidos nos ensaios de tração-compressão.

Série	F _{máx} (kN)	F _{mín} (kN)	F _{méd} (kN)	COV (%)	F _k (kN)	τ ₁ (N/mm ²)	τ ₂ (N/mm ²)
G1-N	37,2	28,2	32,6	9,1	26,5	11,5	8,4
G2-N	43,1	38,7	40,7	3,8	37,3	12,0	8,7
G3-N	49,8	39,1	44,8	10,1	35,2	11,3	8,2
G4-N	51,6	46,5	49,6	4,5	43,7	11,0	8,0
G1-V	32,5	25,7	28,4	9,0	22,8	10,0	7,3
G2-V	40,2	26,9	34,7	12,7	25,6	10,1	7,4
G3-V	34,4	34,1	34,3	0,6	-	8,7	6,3

Os valores característicos das cargas de rotura (F_k) foram calculados através da norma EN 14358 (CEN, 2006), determinando o valor médio (\bar{y}) e o desvio padrão (S_y) pelas Equações 6 e 7 respetivamente. O símbolo *n* corresponde ao número total de ensaios realizados, e o *m_i* ao valor da carga de rotura do ensaio *i*.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (6)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

Obtido o valor médio e o desvio padrão, o valor característico (*m_k*) foi determinado da seguinte forma (Equação 8):

$$m_k = \exp(\bar{y} - K_s S_y) \quad (8)$$

A atribuição do valor de *K_s* foi realizada de acordo com o Quadro 4.4, retirado da norma supracitada. Quando o número de ensaios não estava discriminado na tabela, o valor de *K_s* foi obtido por interpolação.

Quadro 4.4- Valores de *K_s* indicados pela norma EN 14358 (CEN, 2006).

Número de amostras testadas (<i>n</i>):	Fator <i>K_s</i> :
3	3,15
5	2,46
10	2,10
15	1,99
20	1,93
30	1,87
50	1,81
100	1,76
500	1,71
∞	1,65

As tensões de corte médias nas interfaces varão/cola (τ_1) e cola/madeira (τ_2) foram calculadas dividindo a carga de rotura (F) pela área de colagem, através das Equações 9 e 10 respetivamente, sendo d o diâmetro nominal do varão, D o diâmetro do furo e l_g o comprimento de colagem.

$$\tau_1 = \frac{F}{\pi d l_g} \quad (9)$$

$$\tau_2 = \frac{F}{\pi D l_g} \quad (10)$$

É importante referir que o número de provetes obtidos de madeira antiga foi consideravelmente inferior ao dos de madeira nova, devido ao pequeno número de vigas antigas disponíveis para corte dos provetes, e ao desperdício superior comparativamente aos de madeira nova, causado pelas imperfeições e danos nas peças. Por isso, a confiança nos resultados apresentados é limitada e seriam necessárias campanhas de maior dimensão para confirmação de tendências. A ausência do valor característico da carga de rotura da série G3-V e o reduzido COV (coeficiente de variação) tem que ver com o número de elementos que constitui a série ter sido de apenas 2, abaixo do mínimo de 3 especificado na EN 14358 (CEN, 2006).

Nos ensaios do tipo tração-tração (Quadro 4.2), os valores médios de resistência ao arranque são semelhantes tanto para madeira antiga como para madeira nova, como a análise dos valores individuais da força de rotura permitia antecipar (Figura 4.9). Nos ensaios do tipo tração-compressão (Quadro 4.3), nota-se que em madeira antiga esses valores são ligeiramente inferiores aos da madeira nova, mas a dimensão pequena das amostras torna difícil uma conclusão a esse respeito, até porque a diferença não é muito elevada. Na generalidade dos casos constata-se que o valor característico das cargas de rotura (F_k) é significativamente inferior ao valor médio (F_{med}), tal se devendo à dispersão dos resultados mas, com não menos importância, à pequena dimensão das séries e consequentemente alto valor do k_s , da EN 14358 (CEN, 2006), utilizado na determinação daquele valor. Relativamente às tensões de corte, embora os resultados tenham sido expressos em termos de tensão média, é sabido que a distribuição é não uniforme ao longo do comprimento de colagem. Uma modelação em elementos finitos poderá fornecer informação qualitativa sobre esta distribuição. A expectativa é que, de uma forma geral, o valor médio da resistência ao corte local vá diminuindo com o aumento do comprimento de colagem. Essa tendência é perceptível nos resultados, principalmente nos ensaios de tração-compressão, embora de uma forma ténue e não sistemática, o que também pode dever-se à pequena dimensão das séries.

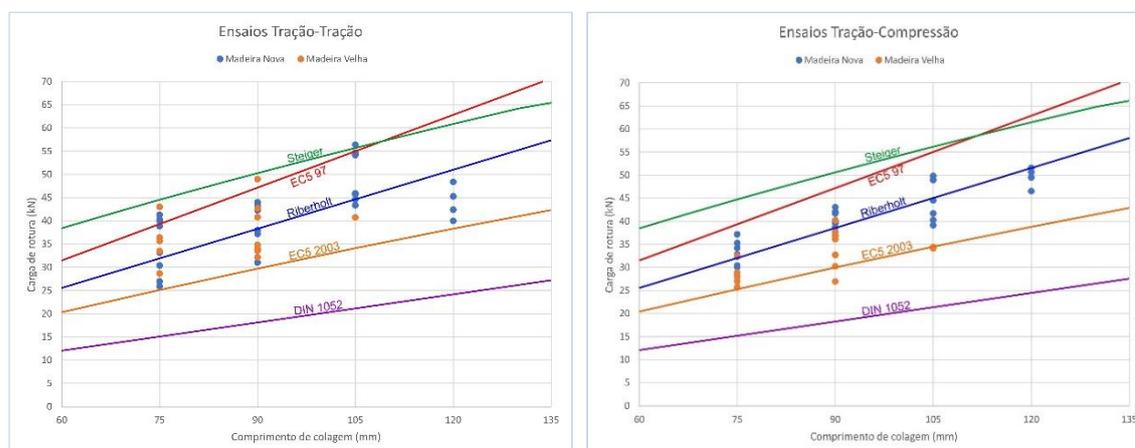


Figura 4.10- Comparação dos resultados individuais dos ensaios de tração-tração (esq.^a) e de tração-compressão (dir.^a) com a previsão de alguns métodos.

Nos gráficos da Figura 4.10 foram sobrepostas as curvas correspondentes às estimativas de alguns dos métodos de cálculo da resistência ao arranque mais relevantes, nomeadamente os propostos por Riberholt (1988), Steiger *et al* (2006), o preconizado nas DIN 1052 (DIN, 2008) e os das versões de 1997 (CEN, 1997) e de 2003 (CEN, 2003) *apud* (Larsen, 2011) (nunca aprovado) do Eurocódigo 5, parte 2. Embora estabelecidos com base em ensaios de provetes de madeiras resinosas, esta representação permite, à falta de métodos específicos para madeiras de folhosas, avaliar em que medida aqueles métodos podem ser usados para estimar a resistência ao arranque em madeiras deste tipo. Para os métodos que fornecem valores característicos da resistência ao arranque, foram utilizados os valores característicos das propriedades físicas relevantes, nomeadamente da massa volúmica de referência da totalidade das amostras, obtidos nos ensaios de caracterização das madeiras utilizadas, descritos mais adiante na secção 4.5 deste Capítulo. Estas resistências foram depois convertidas em valores médios, tornando as curvas coerentes com os resultados experimentais, pelas relações apresentadas na secção 4.2, assumindo uma vez mais um coeficiente de variação de 15% na falta de informação mais precisa. Este procedimento destinou-se a permitir a comparabilidade das estimativas fornecidas por aqueles métodos com os resultados dos ensaios. O método de Steiger *et al* (2006) determina valores médios da resistência ao arranque com base no valor médio da massa volúmica, tendo sido este o valor utilizado.

Os gráficos mostram que o método das normas DIN 1052 (DIN, 2008) é excessivamente conservador, enquanto os métodos do EC5-97 (CEN, 1997) e de Steiger *et al* (2006) sobrestimam a resistência ao arranque. O método de Riberholt (1988) parece ajustar-se de forma bastante próxima aos resultados experimentais, exceto para o maior comprimento de colagem no qual, como já se referiu, se observa uma perda de resistência, mais acentuada

nos provetes de madeira nova. O método proposto no *draft* de 2003 do EC5 (CEN, 2003) *apud* (Larsen, 2011) parece, do ponto de vista de segurança, o que melhor se ajusta aos resultados experimentais obtidos, uma vez que é moderadamente conservador.

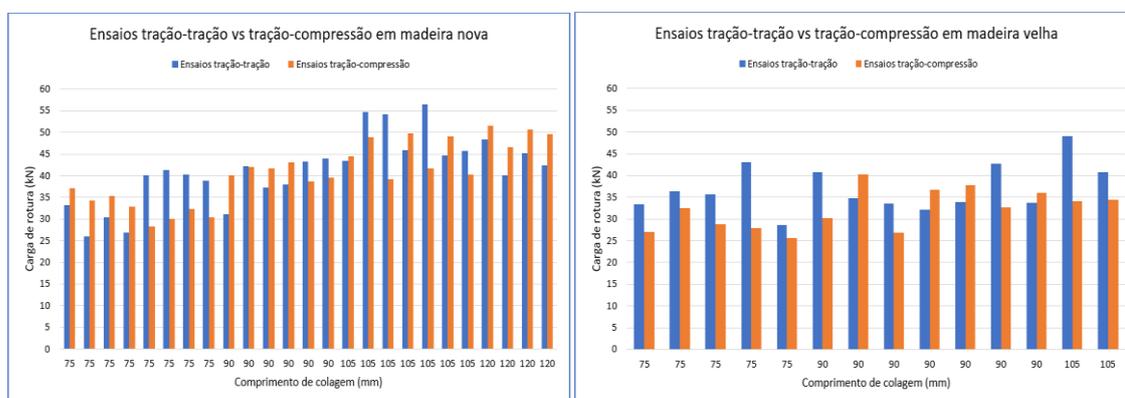


Figura 4.11- Comparação entre os ensaios de tração-tração e de tração-compressão em provetes de madeira nova (esq.^a) e de madeira antiga (dir.^a).

Na Figura 4.11 são representados, numa base individual, os resultados dos ensaios de tração-tração (a azul) e tração-compressão (a laranja), para melhor comparabilidade. Os gráficos não mostram uma redução sistemática de resistência ao arranque do primeiro para o segundo tipo de ensaio embora, no caso dos provetes de madeira antiga (Figura 4.11- dir.^a), pareça haver uma tendência para uma redução, ainda assim contrariada nalguns ensaios. A conclusão obtida por Rajčić *et al* (2016), que aponta para cargas de rotura inferiores quando obtidas em ensaios de tração-tração não é, portanto, aqui confirmada. A maioria dos resultados obtidos pelas duas modalidades de ensaio parecem bastante próximos, no entanto, por não ser verificada uma tendência clara, não é possível obter uma conclusão inequívoca sobre a possibilidade dos ensaios de tração-compressão.

4.4 Determinação do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão

A determinação do módulo de elasticidade global paralelo ao fio (E_0) e da resistência à flexão (f_m) foram efetuadas conforme o indicado na norma EN 408:2010+A1 (CEN, 2012), utilizando o esquema de ensaio ilustrado na Figura 3.17 da secção 3.3.1 deste documento. Relativamente à primeira propriedade, após recolhidos os valores de ensaio respeitantes à carga aplicada e deslocamento medido, esta foi determinada, para cada provete ensaiado, de acordo com a expressão indicada na norma, e reproduzida na Equação 11, para melhor compreensão. Salienta-se que em nenhum provete ensaiado se verificou esmagamento da madeira nas zonas dos apoios que pudesse influenciar o resultado do módulo de elasticidade.

$$E_0 = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{\omega_2 - \omega_1}{F_1 - F_2} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (11)$$

sendo:

- a : Distância entre a posição de um ponto de carga e o apoio mais próximo (mm);
- l : Distância entre apoios (mm);
- b : Largura real da secção transversal do provete (mm);
- h : Altura real da secção transversal do provete (mm);
- $F_2 - F_1$: Incremento de carga no intervalo considerado (N);
- $w_2 - w_1$: Incremento de deformação correspondente ao incremento de carga $F_2 - F_1$ (mm);
- G : Módulo de distorção (N/mm^2). Neste estudo as deformações devidas ao esforço transversal não foram consideradas e, portanto, de acordo com a norma seguida este parâmetro foi tomado como infinito.

No que diz respeito à resistência à flexão, após recolhida a carga de rotura de cada ensaio, esta foi determinada, para cada provete ensaiado, de acordo com a Equação 12:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^3} \quad (12)$$

sendo:

- f_m : Tensão resistente à flexão do provete (N/mm^2);
- F : Carga máxima registada no atuador (N);
- a : Distância entre a posição de um ponto de carga e o apoio mais próximo (mm);
- b : Largura real da secção transversal do provete (mm);
- h : Altura real da secção transversal do provete (mm).



Figura 4.12- Ilustração das roturas observadas nos ensaios de flexão.

Na totalidade dos ensaios destrutivos, verificou-se que a rotura ocorreu por tração paralela às fibras da madeira na zona mais tracionada (fibras inferiores) a meio vão, correspondente à zona de momento fletor máximo (Figura 4.12). Nos Quadros 4.5 e 4.6 representam-se, respetiva e

sumariamente, os resultados obtidos para o módulo de elasticidade global paralelo ao fio em flexão, E_0 , e para a resistência à flexão, f_m . Para consulta detalhada dos resultados dever-se-á consultar o Anexo E, Quadro A.5. Os valores característicos foram obtidos pela EN 14358 (CEN, 2006) do modo análogo ao apresentado na secção 4.3 deste documento.

Quadro 4.5- Módulo de elasticidade global em flexão paralelo ao fio da madeira.

	Valor médio $E_{0,méd}$ (kN/mm ²)	COV (%)	Valor mínimo $E_{0,mín}$ (kN/mm ²)	Valor máximo $E_{0,máx}$ (kN/mm ²)	Valor característico $E_{0,k}$ (kN/mm ²)
Madeira nova	15,0	15,7	9,8	19,7	10,6
Madeira antiga	13,0	19,1	9,2	17,8	8,6
Totalidade	14,1	18,4	9,2	19,7	9,7

Quadro 4.6- Resistência à flexão da madeira.

	Valor médio $f_{m,méd}$ (N/mm ²)	COV (%)	Valor mínimo $f_{m,mín}$ (N/mm ²)	Valor máximo $f_{m,máx}$ (N/mm ²)	Valor característico $f_{m,k}$ (N/mm ²)
Madeira nova	98,8	21,2	68,0	139,8	62,9
Madeira antiga	91,5	10,2	73,0	107,6	73,3
Totalidade	95,5	17,5	68,0	139,8	68,0

Uma vez que alguns métodos de dimensionamento dependem da massa volúmica da madeira e/ou da sua resistência ao corte, e estas propriedades estão, em certa medida, correlacionadas com a sua classe resistente, estes ensaios destinaram-se também, por via da atribuição aproximada de uma classe resistente da EN 338 (CEN, 2009) à madeira utilizada nos provetes de GiRs, a obter uma estimativa indireta da sua resistência ao corte, dado que não foram realizados ensaios deste tipo. O mesmo raciocínio poderia usar-se para a massa volúmica, mas esta foi objeto de determinação específica neste trabalho. Salienta-se que esta atribuição é apenas indicativa, uma vez que a variedade de Castanho deste estudo (*Castanea sativa* Mill.) não consta ainda da EN 1912 (CEN, 2010) e, por conseguinte, não é possível fazer a comparação direta das propriedades determinadas com as que lhe corresponderiam no sistema de classes de resistência “D” das madeiras folhosas da EN 338 (CEN, 2009).

Em relação à resistência à flexão, e tendo em conta que os ensaios foram obtidos sobre provetes de cerca de 15 mm de espessura, é necessário introduzir a correção redutora relativa ao efeito de volume (k_h) o qual, nos termos da cláusula 3.2(3) da EN 1995-1-1 (CEN, 2004) será de, aproximadamente:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{15} \right)^{0,2}, 1,3 \right\} = 1,3 \quad (13)$$

Assim, e no caso de madeira nova, que se pode considerar não afetada por ataque biológico ou outro efeito redutor da resistência, o valor característico da resistência à flexão ($f_{m,k}$) seria, tomando como representativo o valor do Quadro 4.6, de:

$$f_{m,k} = 62,9 / 1,3 = 48,4 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad (14)$$

Comparando as propriedades determinadas experimentalmente, esta madeira corresponderia aproximadamente a uma D40, no respeitante à resistência à flexão, mas apenas a uma D24, atendendo à massa volúmica (apresentada adiante no Quadro 4.8 da secção 4.5), ou a D50 ou D35, consoante fosse considerado o valor médio ou o valor característico do módulo de elasticidade (provavelmente o primeiro, porque o valor característico foi penalizado pela pequena dimensão da amostra, como estabelecido na EN 14358 (CEN, 2006)). Para qualquer uma destas classes, o valor característico da resistência ao corte atribuído pela EN 338 (CEN, 2009) é de 4 N/mm². Considerando valores usuais de espessuras de cola (entre 0,5 mm e 3 mm) e de diâmetros nominais de varão (entre 10 mm e 24 mm), e adotando o valor característico da massa volúmica de 523 kg/m³, obtida na secção 4.5 (Quadro 4.8), a resistência ao corte local característica da madeira na linha de colagem, calculada pelo método da ENV 1995-2 (CEN, 1997) varia entre cerca de 7,5 N/mm² e 9 N/mm², ou seja, substancialmente superior à resistência ao corte da madeira. O método da prEN 1995-2 (CEN, 2003) *apud* (Larsen, 2011), que melhor se ajusta aos resultados experimentais, apresenta um valor característico da resistência ao corte local da linha de colagem independente da geometria da ligação de 5,5 N/mm², mais próximo do valor da resistência ao corte da madeira, ainda que ligeiramente superior. O método disposto nas normas DIN 1052 (DIN, 2008) indica, para comprimentos de colagem iguais ou inferiores a 250 mm, uma resistência ao corte característica da linha de colagem de 4 N/mm², ou seja, igual à resistência ao corte da madeira. Para comprimentos de colagem superiores, este método prevê reduções desta resistência local passando, assim, a assumir valores inferiores ao da resistência ao corte da madeira. No entanto, como comprovado anteriormente, este aparenta ser um método bastante conservador e, portanto, prevê-se que esta resistência ao corte local assim também o seja.

A comparação dos valores obtidos com os definidos na norma espanhola de classificação de madeira serrada de folhosas para uso estrutural UNE 56546 (AENOR, 2013), permite concluir que a madeira de castanho utilizada neste estudo se enquadraria na classe de qualidade “Castaño MEF”, a melhor das duas previstas naquele documento. Note-se que esta foi a classe utilizada para estimar as cargas de rotura apresentadas do Quadro 3.2, as quais se situaram, em todos os casos, acima dos valores experimentais obtidos.

Curiosamente, a madeira antiga apresentou um valor característico da resistência superior ao da madeira nova, mas um valor médio inferior, devido ao muito menor coeficiente de variação, facto inesperado tendo em conta a grande homogeneidade da amostra de madeira nova. No que respeita à comparação de propriedades mecânicas dos dois tipos de madeira, constata-se que elas são bastante semelhantes e apenas marginalmente superiores (em termos de valores médios) no caso da madeira nova. Por isso, é de concluir que a degradação biológica da madeira antiga será pouco expressiva, embora a consequente pequena redução de massa (Quadro 4.8) e resistência (Quadro 4.6) possa ter causado a alteração dos modos de rotura mais frequentes nos provetes de GiRs, como anteriormente discutido. Relembra-se que as roturas que ocorreram na madeira foram consideravelmente superiores nos provetes de madeira antiga.

4.5 Determinação do teor de água e da massa volúmica

O teor de água foi determinado, em termos percentuais, pela diferença entre a massa das amostras antes e após a sua secagem, de acordo com a norma EN 13813-1 (CEN, 2002), através da aplicação da seguinte equação (Equação 15):

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (15)$$

sendo:

- ω : Teor de água (%);
- m_1 : Massa da amostra antes da secagem (g);
- m_0 : Massa da amostra anidra, após a secagem (g).

Relativamente à massa volúmica, conforme indicado pela norma ISO 13061-2 (ISO, 2014), esta foi em primeiro lugar calculada para cada peça, com um teor de água ω , utilizando a seguinte equação (Equação 16):

$$\rho_\omega = \frac{m_\omega}{a_\omega \times b_\omega \times l_\omega} = \frac{m_\omega}{V_\omega} \quad (16)$$

onde:

- ρ_ω : Massa volúmica da peça para um teor de água ω (kg/m³);
- m_ω : Massa da peça com teor de água de ω (kg);
- a_ω ; b_ω ; l_ω : Dimensões da peça com teor de água de ω (m);
- V_ω : Volume da peça com teor de água de ω (m³).

Posteriormente, os valores calculados (ρ_ω) foram ajustados a um teor de água de referência de 12% com recurso à seguinte fórmula (Equação 17):

$$\rho_{12} = \frac{1+0,01(12-\omega)}{1+0,01(12-\omega)\frac{\rho\omega}{\rho_{H_2O}}} \quad (17)$$

em que:

- ρ_{12} : Massa volúmica da peça ajustada ao teor de água de referência (12%) (kg/m^3);
- ω : Teor de água da peça (%);
- ρ_{H_2O} : Massa volúmica da água (considerada de 1000 kg/m^3);

Os valores do teor de água e da massa volúmica dos provetes de madeira nova e antiga encontram-se resumidos nos Quadros 4.7 e 4.8 respetivamente. Para consulta detalhada dos valores obtidos dever-se-á consultar o Anexo F, Quadro A.6.

Quadro 4.7- Valores de teor de água (ω) determinados experimentalmente.

	Valor médio $\omega_{\text{méd.}}$ (%)	Valor mínimo $\omega_{\text{mín.}}$ (%)	Valor máximo $\omega_{\text{máx.}}$ (%)
Madeira nova	12,0	11,1	12,7
Madeira antiga	11,1	10,6	12,8
Totalidade	11,6	10,6	12,8

Quadro 4.8- Valores da massa volúmica de referência (ρ_{12}).

	Valor médio $\rho_{12,\text{méd.}}$ (kg/m^3)	COV (%)	Valor mínimo $\rho_{12,\text{mín.}}$ (kg/m^3)	Valor máximo $\rho_{12,\text{máx.}}$ (kg/m^3)	Valor característico $\rho_{12,k}$ (kg/m^3)
Madeira nova	591	5,7	537	649	527
Madeira antiga	584	7,2	541	676	504
Totalidade	588	6,2	537	676	523

Os valores do teor em água situam-se perto do valor de referência de 12%, para ambas as amostras (madeira nova e antiga), tendo sido muito pequena a variação encontrada entre amostras e dentro de cada uma, o que se justifica pela permanência de ambas em sala climatizada a 20°C e 65% de humidade relativa nos dois meses que antecederam os ensaios e ainda, no caso da madeira nova, por esta ter sido adquirida a uma serração que procedera previamente à secagem da madeira. Assim, pode considerar-se também que os valores obtidos para o módulo de elasticidade e resistência à flexão são também os valores de referência a 12%, pelo que não é necessário proceder a ajustamento dos valores determinados para as propriedades mecânicas.

A determinação da massa volúmica permitiu, além das várias aplicações mencionadas ao longo deste capítulo, comprovar que esta espécie de Castanho (*Castanea Sativa* Mill.) se enquadra

num grupo de madeiras folhosas pouco densas, ao nível de uma D24 segundo a EN 338 (CEN, 2009), como referido na secção 4.4 deste Capítulo.

4.6 Conclusões da Apresentação e Análise de Resultados

A comparação entre os métodos de dimensionamento disponíveis na bibliografia demonstrou que estes apresentam diferenças significativas entre si, as quais resultam numa grande amplitude de valores de resistência ao arranque por eles estimados. Apenas o comprimento de colagem e o diâmetro do varão são tidos em conta na generalidade dos métodos mas, ainda assim, o seu grau de influência na resistência ao arranque não é consensual. Existem métodos demasiadamente conservadores para utilização prática e métodos bastante inseguros para o mesmo fim. A comparação de cerca de 100 resultados experimentais de diversos estudos disponíveis na literatura com as estimativas fornecidas por alguns métodos, comprovou que a grande maioria é moderada ou muito insegura para dimensionamento de GiRs. O método Alemão incluído nas normas DIN 1052 e, em particular, os métodos Russo (Turkovsky, 1989) e Sueco (Carling, 1992) *apud* (Tlustochowicz *et al*, 2011) demonstraram total segurança face aos resultados experimentais comparados, mas são demasiadamente conservadores para a utilização prática. O método proposto no anexo C do *draft* de 2003 do Eurocódigo 5, parte 2, parece ser o que melhor se ajusta aos resultados experimentais de diversos estudos, prevendo-se o mais adequado para o dimensionamento de varões colados.

No trabalho experimental conduzido sobre provetes de madeira de Castanho nova e antiga, observou-se que as resistências ao arranque dos varões isolados são semelhantes para os dois tipos de madeira. No geral, embora se assista a uma redução ligeira desta resistência em provetes de madeira antiga, ela é insignificante para efeitos práticos. No referente ao comprimento de colagem, à exceção de uma situação inesperada, verificou-se um acréscimo da resistência ao arranque com o aumento deste parâmetro, porém não se observou qualquer relação linear entre eles. Como referido, contrariamente ao esperado, nos ensaios de tração-tração de madeira nova verificou-se o decréscimo de resistência quando o comprimento de colagem passou de 105 mm para 120 mm. Excluindo o estudo de Chans *et al* (2013), não são conhecidos trabalhos experimentais que tenham observado o mesmo fenómeno.

A quantidade de roturas que ocorreram na madeira foi consideravelmente superior nos provetes de madeira antiga. Este aspeto é provavelmente explicado pela degradação biológica da madeira antiga que, por sua vez, motivou uma pequena redução da sua massa e resistência resultando, por isso, em roturas mais frequentes na madeira. Sobre o modo de rotura por fratura da madeira, este foi bastante frequente em provetes de madeira antiga, indicando que, para um eventual dimensionamento de GiRs em contextos de reforço e/ou reparação estrutural, a distância ao

bordo livre de 2,5 vezes o diâmetro nominal do varão, recomendada pela maioria dos métodos de dimensionamento, não é suficiente.

Concretamente nos ensaios de tração-tração, os modos de rotura dominantes foram a rotura coesiva por corte na cola ao longo da linha de colagem, no caso de madeira nova, e a rotura coesiva por corte na madeira ao longo da linha de colagem, no caso de madeira antiga. Sugerindo, uma vez mais, que o enfraquecimento marginal da última, por ataque biológico ou outro, possa ser a causa desta alteração. Nos ensaios de tração-compressão, para ambos os tipos de provetes (madeira nova e antiga), o modo de rotura coesiva por corte na linha de cola torna-se mais prevalente, possivelmente devido ao efeito benéfico do atrito chapa/madeira no respeitante ao modo de rotura por fratura da madeira. Sobre a comparação das modalidades de ensaio de tração-tração e de tração-compressão, não foram observadas diferenças sistemáticas entre os resultados no referente à carga última, o que impede uma conclusão clara sobre a possibilidade de aplicação da segunda.

A caracterização mecânica da madeira de Castanho nova utilizada (*Castanea Sativa* Mill.), demonstrou que esta possui propriedades mecânicas bastante elevadas, correspondentes às classes resistentes D40 ou D50 de madeiras folhosas da EN 338 (CEN, 2009), contudo, observando as propriedades físicas determinadas, esta enquadra-se num grupo de folhosas pouco densas, ao nível de uma D24. Comparativamente às determinadas para a madeira antiga, as propriedades mecânicas da madeira nova revelaram-se apenas ligeiramente superiores, ainda assim, essa pequena diferença influenciou o comportamento ao arranque dos varões colados.

A determinação experimental da massa volúmica foi igualmente útil para estimar a resistência ao arranque, através de vários métodos de dimensionamento, das configurações dos provetes de GiRs utilizados no trabalho experimental. Da comparação entre as estimativas fornecidas pelos métodos, concebidos com base em estudos conduzidos sobre espécies resinosas, e os valores das cargas de rotura obtidos verificou-se que, não obstante revelarem concordância razoável, alguns deles não apresentam total segurança face aos resultados experimentais, nomeadamente aqueles que entram em conta com a influência da massa volúmica para estimar a resistência ao arranque.

5 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

As ligações com varões colados no interior de elementos de madeira ou *glued-in rods* (GiRs), como são conhecidos internacionalmente, são hoje extensivamente utilizadas por grandes empresas europeias de construção em madeira. O primeiro passo para o entendimento deste sistema de ligação é o do conhecimento do comportamento do ligador individual, pelo que este tem sido o âmbito da maior parte da investigação realizada. A resistência ao arranque de um varão isolado é condicionada por diversos fatores, cuja importância não é unanimemente reconhecida por todos os investigadores na área. Este apeto em particular tem motivado alguma discordância entre os especialistas, a qual se reflete numa ainda ausência de regulamentação comum aos países-membros do Comité Europeu de Normalização (CEN). Por este motivo, a investigação sobre GiRs tem-se intensificado e, conseqüentemente, têm surgido vários métodos de dimensionamento propostos por diversos autores. Este estudo reuniu e comparou alguns dos mais relevantes disponíveis na literatura de forma a contribuir para a definição de um método comum. Desta análise, verificou-se que existem alguns métodos demasiadamente conservadores para utilização prática e outros bastante inseguros para o mesmo fim. O método proposto no anexo C do *draft* de 2003 do EC5, parte 2, parece ser o que melhor se ajusta aos resultados experimentais comparados, sugerindo ser o mais adequado para o dimensionamento deste tipo de ligações. Possivelmente, o método que vai integrar a nova versão do Eurocódigo 5 de 2021, assemelhar-se-á a este, um método seguro, simples para a utilização prática e com o detalhe adequado.

Atualmente é escasso o trabalho publicado sobre a aplicação de GiRs em trabalhos de reabilitação de estruturas de madeira antigas e/ou degradadas, nas quais são frequentemente usadas madeiras de folhosas e, em particular e em Portugal, de Castanho. Por este motivo, realizou-se um estudo experimental sobre o comportamento de GiRs em provetes de madeira nova (proveniente diretamente de serração) e antiga (proveniente de obras de reabilitação e/ou demolição) de Castanho. Em suma, concluiu-se que a madeira antiga apresenta propriedades mecânicas semelhantes às da nova resultando, assim, em cargas de rotura ao arranque idênticas, o que comprova a viabilidade desta solução em trabalhos de reabilitação. No entanto, atualmente, o seu dimensionamento para madeiras folhosas deverá ser efetuado com prudência, pois alguns métodos de dimensionamento, concebidos com base em espécies resinosas, não revelaram total segurança face aos resultados experimentais comparados.

Relativamente aos trabalhos futuros, aconselham-se, para confirmação de tendências, estudos experimentais de maior dimensão que promovam a comparação entre madeiras novas e antigas desta e/ou outras espécies de, sobretudo, folhosas, uma vez que o número de provetes obtidos de madeira antiga foi consideravelmente inferior aos de madeira nova, o que limita a confiança nos resultados apresentados.

Nos ensaios de tração-tração de madeira nova, contrariamente ao esperado, verificou-se o decréscimo de resistência quando o comprimento de colagem passou de 105 mm para 120 mm. Excluindo o estudo de Chans *et al* (2013), não são conhecidos trabalhos experimentais que tenham observado o mesmo fenómeno. Neste sentido, sugere-se a realização de mais estudos com comprimentos de colagem superiores a cerca de 100 mm, tanto em madeiras de folhosas como de resinosas, para que seja possível confirmar a veracidade deste acontecimento. Adicionalmente propõe-se a elaboração da curva que melhor se ajuste aos resultados experimentais obtidos, para que se estime com algum rigor a influência do comprimento de colagem na resistência ao arranque.

Analisando os modos de rotura observados, verifica-se que a resistência ao arranque pode ser condicionada pela resistência ao corte da cola. No entanto, as fichas técnicas das colas epoxídicas não referem se as propriedades mecânicas nelas especificadas representam valores médios ou característicos, não sendo também facultadas as suas resistências ao corte. Por este motivo, recomendam-se estudos comparativos entre as resistências ao corte de algumas colas epoxídicas determinadas experimentalmente e as resistências ao arranque, em termos de tensões de corte, de provetes de GiRs obtidos por aplicação dessas colas.

Conforme a EN 338 (CEN, 2009), a resistência ao corte de madeiras folhosas assume igual valor para classes de resistência compreendidas entre a D24 e a D50, por sinal, o mesmo das resinosas que integram as classes de resistência de C24 a C50, 4 kN/mm². Deste modo, parece razoável considerar que para madeiras incluídas em certos intervalos de classes de resistência, a massa volúmica não apresenta correlações significativas com a resistência ao corte. Embora a resistência ao corte local da madeira ao longo da linha de colagem seja diferente da sua resistência ao corte, a comparação entre as estimativas fornecidas por alguns métodos de dimensionamento e os resultados experimentais obtidos, sugere que a consideração efetuada seja também válida para a resistência ao corte local da madeira ao longo da linha de colagem. Ainda assim, é apenas uma suposição, visto que a interferência da massa volúmica na resistência ao arranque não foi abordada e, portanto, sugerem-se estudos futuros sobre a influência deste parâmetro, para clarificação deste aspeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AENOR (2013). “UNE 56546- Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural- Madera de frondosas”. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- Bengtsson, C., Johansson, C. (2002). “GIROD – Glued-in Rods for Timber Structures”. Final Report, Borås.
- Bengtsson, C., Johansson C. (2000) “Test methods for glued-in rods for timber structures”. Proceedings of 33rd conference of CIB-W18, Delft, Netherlands, Paper 33-7-8.
- Bernasconi, A. (2001). “Behaviour of axially loaded glued-in rods- Requirements and resistance, especially for spruce timber perpendicular to the grain direction”. Proceedings of 34th conference of CIB-W18, Venice, Italy, Paper 34-7-6.
- Blaß, H., Laskewitz B. (1999) “Effect of spacing and edge distance on the axial strength of glued-in rods”. Proceedings of 32nd conference of CIB-W18, Graz, Austria, Paper 32-7-12.
- Broughton, J., Hutchinson, A. (2001a). “Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber”. *Materials and Structures*, Vol. 34, pp. 100-109.
- Broughton, J., Hutchinson, A. (2001b). “Effect of timber moisture content on bonded-in rods”. *Construction and Building Materials*, Vol. 15, Issue 1, pp. 17-25.
- Broughton, J., Hutchinson, A. (2001c). “Adhesive systems for structural connections in timber”. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 21, Issue 3, pp. 177-186.
- Carling, O. (1992). “Dimensionering av träkonstruktioner”. AB Svensk Byggtjänst och Träteknik, Stockholm, Sweden.
- CEN (2013). “FprEN 14080 – Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber- Requirements”. European Committee for Standardization, Brussels.

- CEN (2012). “EN 408:2010+A1 – Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties”. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2009). “EN 338 – Structural timber – Strength classes”. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2004). “EN 1995-1-1 - Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2003). “PrEN 1995-2 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 2: Bridges”. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2002). “EN 13183-1 – Moisture content of a piece of sawn timber- Part 1: Determination by oven dry method”. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (1999). “EN 1194 – Timber structures- Glued laminated timber- Strength classes and determination of characteristic values”. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (1997). “ENV 1995-2 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 2: Bridges”. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (1991). “EN 26891 – Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – General principles for the determination of strength and deformation characteristics”. European Committee for Standardization, Brussels.
- Chans, D., Cimadevila, J., Gutiérrez, E. (2013). “Withdrawal strength of threaded steel rods glued with epoxy in wood”. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 44, pp. 115-121.
- Chans, D., Cimadevila, J., Gutiérrez, E. (2010a). “Model for predicting the axial strength of joints made with glued-in rods in sawn timber”. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 9, pp. 1773-1778.
- Chans, D., Cimadevila, J., Gutiérrez, E., Rodríguez J. (2010b). “Influence of timber density on the axial strength of joints made with glued-in steel rods: An experimental approach”. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, Issue 5, pp. 380-385.
-

- Chans, D., Cimadevila, J., Gutiérrez, E. (2009). "Influence of the geometric and material characteristics on the strength of glued joints made in chestnut timber". *Materials & Design*, Vol. 30, Issue 4, pp. 1325-1332.
- Chans, D., Cimadevila, J., Gutiérrez, E. (2008). "Glued joints in hardwood timber". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 28, Issue 8, pp. 457-463.
- Cimadevila, J., Rodríguez, J., Chans, M. (2007). "Experimental behaviour of threaded steel rods glued into high-density hardwood". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, Issue 2, pp. 136-144.
- Cruz, H., Custódio, J. (2006). "Thermal performance of epoxy adhesives in timber structural repair". *Proceedings of 9th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2006)*, Portland, USA.
- Custódio, J., Broughton, J., Cruz, H. (2009). "A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 29, Issue 2, pp. 173-185.
- Dietsch, P., Kreuzinger, H., Winter, S. (2013). "French data concerning glued-in rods". *Proceedings of 46th conference of CIB-W18*, Vancouver, Canada, Paper 46-7-9.
- DIN (2008). "DIN 1052:2008-12 - Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken". Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Faye, C., Magorou, L., Morlier, P., Surleau, J. (2004). "French data concerning glued-in rods". *Proceedings of 37th conference of CIB-W18*, Edinburgh, Scotland, Paper 33-7-10.
- Feligioni, L., Lavischi, P., Duchanois, G., Ciechi, M., Spinelli, P. (2003). "Influence of glue rheology and joint thickness on the strength of bonded-in rods". *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 61, Issue 4, pp. 281-287
- Fragiacomo, M., Batchelar, M. (2011). "Timber Frame Moment Joints with Glued-In Steel Rods. I: Design". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 138, Issue 6, pp. 789-801.
- Gardelle, V., Morlier, P. (2006). "Geometric parameters which affect the short term resistance of na axially loaded glued-in rod". *Materials and Structures*, Vol. 40, Issue 1, pp. 127-138.
-

- Gonzalez, E., Avez, C., Tannert, T. (2016). “Timber Joints with Multiple Glued-in Steel Rods”. *The Journal of Adhesion*, Vol. 92, Issue 7-9, pp. 635-651.
- Gustafsson, P., Serrano, E. (2001). “Glued-in rods for timber structures- development of a calculation model”. Report TVSM-3056, Lund.
- Harvey, K., Ansell, M., Mettem, C., Bainbridhe, R., Alexandre, N. (2000). “Bonded-In Pultrusions for Moment-Resisting Timber Connections”. Proceedings of 33rd conference of CIB-W18, Delft, Netherlands, Paper 33-7-11.
- ISO (2014). “ISO 13061-2 – Physical and mechanical properties of wood- Test methods for small clear wood specimens- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests”. International Organization for Standardization, Geneva.
- Larsen, H. (2011). “CIB-W18 Timber Structures- A review of meetings 1-43”. Danish Timber Information.
- Ling, Z., Yang, H., Liu, W., Lu, W., Zhou, D., Wang, L. (2014). “Pull-out strength and bond behaviour of axially loaded rebar glued-in glulam”. *Construction and Building Materials*, Vol. 65, pp. 440-449.
- Lorenzis, L., Scialpi, V., Tegola, A. (2005). “Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber”. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, pp. 279-289.
- Machado, J., Cruz, H., Palma, P., Custódio, J., Dias, A. (2009). “Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira”. Verlag Dashöfer, Lisboa.
- Madhoushi, M., Ansell, M. (2004). “Experimental study of static and fatigue strengths of pultruded GFRP rods bonded into LVL and glulam”. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 24, Issue 4, pp. 319-325
- Maria, V., D’Andria, L., Muciaccia, G., Ianakiev, A. (2017). “Influence of elevated temperature on glued-in steel rods for timber elements”. *Construction and Building Materials*, Vol. 147, pp. 457-465
- Negrão, J. (2016). “Preliminary study on wire prestressing methods for timber pieces reinforcement”. *Construction and Building Materials*, Vol. 102-Part 2, pp. 1093-1100.
-

- Negrão, J., Brito, L., Dias, A., Junior, C., Lahr, F. (2016). “Numerical and experimental study of small-scale moment-resistant reinforced concrete joints for timber frames”. *Construction and Building Materials*, Vol. 118, pp. 89-103.
- Negrão, J., Faria, A. (2009). “Projecto de Estruturas de Madeira”. Publinústria, Porto.
- NZTIF (2007). “New Zealand Design Guide”. NZW14085 SC, New Zealand Timber Industry Federation, New Zealand.
- Rajčić, V., Stepinac, M., Koščak, J., Damjanović, D. (2016). “Assessment of the pull-out strength of glued-in rods with different test methods”. *Proceedings of World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016)*, Vienna, Austria, WCTE 2016 e-book, pp. 3763-3770.
- Riberholt, H. (1988). “Glued bolts in glulam—proposals for CIB code”. *Proceedings of the 21st conference of CIB-W18*, Parksville, Canada, Paper 21-7-2.
- Riberholt, H. (1986). “Glued bolts in glulam”. *Proceedings of the 19th conference of CIB-W18*, Florence, Italy, Paper 19-7-2.
- Rosignon, A., Espion, B. (2008). “Experimental assessment of the pull-out strength of single rods bonded in glulam parallel to the grain”. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 66, Issue 6, pp. 419-432.
- Rotafix@ (2017). <http://rotafix.co.uk/products/rotafix-catalogue/>. Consultado no dia 13/11/2017. Rotafix Ltd, Swansea.
- Rotafix@ (2017b). <http://rotafix.co.uk/case-studies/mtib-glulam-frame/>. Consultado no dia 13/11/2017. Rotafix Ltd, Swansea.
- Senno, M., Piazza, M., Tomasi, R. (2004). “Axial glued-in steel timber joints- experimental and numerical analysis”. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 62, Issue 2, pp. 137-146.
- Serrano, E. (2001). “Glued-in rods for timber structures- An experimental study of softening behaviour”. *Materials and Structures*, Vol. 34, Issue 4, pp. 228-234.
- Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O’Neill, C., McPolin, D., Widmann, R. (2015). “Strengthening of timber structures with glued-in rods”. *Construction and Building Materials*, Vol. 97, pp. 90-105
-

- Steiger, R., Gehri, E., Widmann, R. (2006). "Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain". *Materials and Structures*, Vol. 40, Issue 1, pp. 69-78.
- Stepinac, M., Rajčić, V., Hunger, F., Kuilen, J., Tomasi, R., Serrano, E. (2013). "Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards". *Proceedings of 46th conference of CIB-W18, Vancouver, Canada, Paper 46-7-10*.
- Tlustochowicz, G., Serrano, E., Steiger, R. (2011). "State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods". *Materials and Structures*, Vol. 44, Issue 5, pp. 997-1020.
- Townsend, k. (1990). "Steel Dowels Adhesive Bonded in Glue Laminated Timber". *Research Report 90/11, Christchurch, New Zealand*.
- Turkovsky, S. (1989). "Designing of glued wood structures joints on glued-in bars". *Proceedings of 22nd conference of CIB-W18, Berlin, German Democratic Republic, Paper 22-7-13*.
- Vallée, T., Bletz-Mühldorfer, O., Myslickt, S., Grunwald, C., Walther, F., Bathon, L. (2016). "Glued-in rods in hardwood and hardwood laminated veneer lumber- Report on a large experimental campaign". *Proceedings of World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), Vienna, Austria, WCTE 2016 e-book, pp. 643-651*.
- Wheeler, A., Hutchinson, A. (1998). "Resin repairs to timber structures". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 18, Issue 1, pp. 1-13.
- Widmann, R., Steiger, R., Gehri, E. (2007). "Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain". *Materials and Structures*, Vol. 40, Issue 8, pp. 827-838.
- Yeboah, D., Taylor, S., McPolin, D., Gilfillan, R. (2013). "Pull-out behaviour of axially loaded Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) rods bonded perpendicular to the grain of glulam elements". *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 962-969.
-

ANEXOS

Anexo A – Repartição e Nomenclatura dos provetes de varões colados

Quadro A.1- Repartição e nomenclatura dos provetes de madeira nova.

Madeira:	Viga:	Provete:	Comprimento de Colagem (mm):
Madeira Nova	Viga 4	N 22	90
		N 23	90
		N 24	75
	Viga 8	N 17	75
		N 18	90
	Viga 5	N 6	75
		N 7	90
		N 8	75
	Viga 2	N 3	75
		N 4	75
		N 5	75
	Viga 1	N 1	75
	Viga 9	N 13	105
		N 14	120
		N 15	105
		N 16	105
	Viga 3	N 25	120
		N 26	105
		N 28	120
	Viga 6	N 20	120
		N 21	105
		N 27	105
	Viga 7	N 9	90
		N 10	90
N 11		105	
N 12		90	

Quadro A.2- Repartição e nomenclatura dos provetes de madeira antiga.

Madeira	Viga:	Peça:	Provete:	Comprimento de Colagem (mm):
Madeira Antiga	Viga 2	F	V 2	75
			V 3	75
		H	V 5	105
	Viga 1	A	V 8	105
			V 9	90
		B	V 18	90
			V 17	90
		D	V 11	90
	C	V 6	90	
	Viga 3	-	V I	90
			V II	90
			V III	75
			V IV	75
			V V	90

Anexo B– Dimensões das peças de ensaio à flexão

Quadro A.3- Dimensões dos provetes de ensaio para determinação do módulo de elasticidade global e da resistência à flexão.

Provete:	Largura (mm):				Altura (mm):				Comprimento (cm):	Massa (g):
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média		
V II-1	34,84	34,72	34,77	34,78	13,97	13,82	14,03	13,94	22,80	73,0
V II-2	46,57	46,13	45,73	46,14	16,52	16,80	17,05	16,79	23,40	102,0
V I-1	63,35	63,58	64,67	63,87	13,31	14,01	14,64	13,99	22,10	104,0
V 11-1	51,43	51,75	53,16	52,11	15,48	15,72	16,28	15,83	27,70	125,0
V 8-1	49,57	51,05	53,42	51,35	12,85	12,03	11,22	12,03	28,10	104,0
V 8 -2	50,11	51,47	53,42	51,67	15,51	15,18	14,86	15,18	28,10	130,0
V 5-1	52,83	51,49	51,23	51,85	13,85	13,98	14,18	14,00	29,10	108,0
V 17-1	53,81	53,43	54,49	53,91	14,31	15,29	16,19	15,26	29,35	136,0
V 2-1	57,78	56,67	54,26	56,24	16,62	15,89	14,76	15,76	21,60	102,0
V 6-1	37,75	37,28	37,98	37,67	14,71	13,78	13,24	13,91	28,90	84,0
V 6-2	54,16	53,79	54,57	54,17	14,04	13,96	13,76	13,92	28,80	119,0
N 16-1	69,31	69,65	69,30	69,42	14,02	14,11	14,24	14,12	29,90	172,0
N 6-1	69,21	69,24	68,83	69,09	13,66	13,89	13,82	13,79	30,00	156,0
N 22-1	69,80	69,69	69,66	69,72	14,12	14,22	13,53	13,96	30,20	186,0
N 21-1	69,63	69,76	69,94	69,78	13,48	13,51	13,09	13,36	30,30	161,0
N 13-1	68,96	68,99	68,74	68,90	14,18	14,62	13,98	14,26	30,00	174,0
N 17-1	70,07	69,87	70,29	70,08	13,90	13,96	13,92	13,93	30,30	164,0
N 9-1	68,98	69,16	68,99	69,04	14,39	14,77	14,63	14,60	30,10	180,0
N 4-1	69,42	69,48	69,58	69,49	15,18	15,48	15,31	15,32	30,00	190,0
N 3-1	69,56	69,88	69,72	69,72	15,64	15,73	15,57	15,65	29,70	194,0
N 8-1	69,20	69,32	69,36	69,29	16,58	16,50	16,06	16,38	29,50	181,0
N 15-1	69,38	69,37	69,34	69,36	14,95	15,51	15,78	15,41	30,10	194,0
N 10-1	69,77	69,87	69,52	69,72	14,65	14,96	14,45	14,69	30,00	180,0
N 28-1	69,36	69,72	69,53	69,54	15,38	15,32	15,15	15,28	30,00	185,0

Nota: A cada provete está atribuída uma designação do tipo X- Y, sendo X equivalente ao provete de GiRs do qual foi extraído, e Y referente ao número do provete extraído.

Anexo C– Dimensões das peças para determinação do teor de água

Quadro A.4- Dimensões das peças utilizadas na determinação do teor de água.

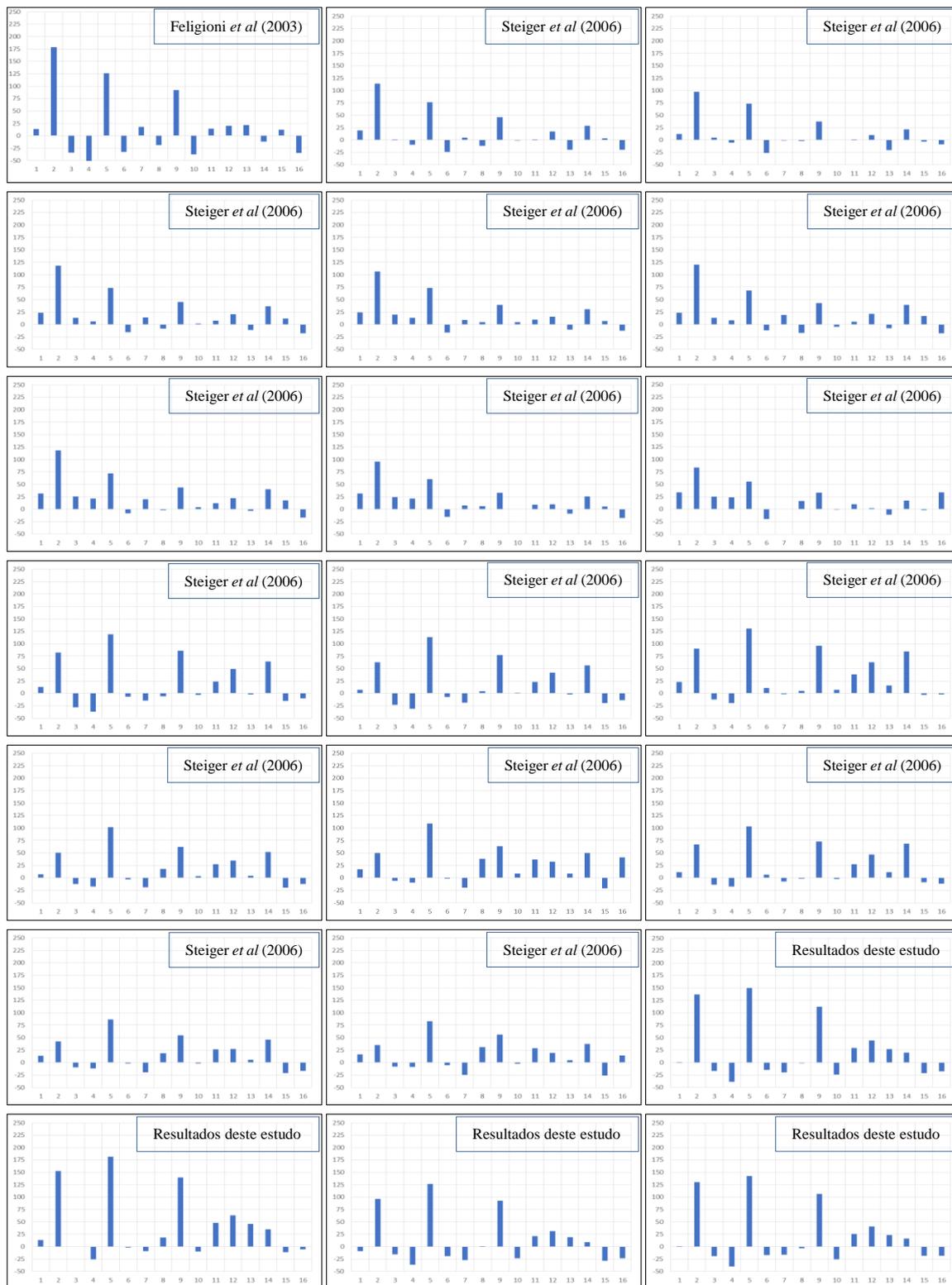
Peça:	Largura (mm):			Altura (mm):			Comprimento (mm):			Massa (g):
	Ponto 1	Ponto 2	Média	Ponto 1	Ponto 2	Média	Ponto 1	Ponto 2	Média	
V II-1	35,23	34,99	35,11	13,93	13,83	13,88	39,78	40,09	39,94	13,11
V II-2	46,66	47,31	46,99	16,44	16,62	16,53	55,52	55,85	55,69	24,21
V I-1	58,76	58,56	58,66	14,39	14,27	14,33	64,27	64,90	64,59	29,66
V 11-1	53,07	53,65	53,36	15,26	15,13	15,20	63,47	63,71	63,59	30,61
V 8-1	49,66	49,31	49,49	13,30	12,86	13,08	55,89	55,94	55,92	23,08
V 8 -2	53,21	53,93	53,57	14,90	14,67	14,79	71,69	70,78	71,24	31,68
V 5-1	52,01	51,92	51,97	13,84	12,80	13,32	52,94	52,69	52,82	20,24
V 17-1	55,03	54,53	54,78	15,85	16,09	15,97	70,64	70,15	70,40	35,89
V 2-1	47,92	47,91	47,92	13,92	14,41	14,17	53,63	54,60	54,12	19,73
V 6-1	38,32	38,06	38,19	13,38	13,12	13,25	52,42	52,46	52,44	15,67
V 6-2	46,75	46,30	46,53	13,84	13,54	13,69	54,08	54,12	54,10	19,26
N 16-1	52,38	53,02	52,70	14,17	13,35	13,76	69,13	69,30	69,22	32,04
N 1-1P	48,16	47,78	47,97	12,53	12,26	12,40	69,72	69,63	69,68	22,22
N 6-1	62,91	63,13	63,02	13,19	14,27	13,73	69,02	68,78	68,90	32,55
N 22-1	60,78	60,80	60,79	13,66	13,72	13,69	69,64	69,47	69,56	37,42
N 21-1	51,40	51,37	51,39	14,05	13,35	13,70	69,44	69,70	69,57	27,55
N 13-1	51,66	51,67	51,67	14,82	13,80	14,31	69,16	68,98	69,07	30,65
N 17-1	50,94	50,92	50,93	13,78	13,51	13,65	70,03	69,87	69,95	28,64
N 9-1	52,15	52,11	52,13	14,21	13,49	13,85	68,90	68,73	68,82	29,99
N 4-1	65,34	65,23	65,29	14,58	13,72	14,15	69,75	69,71	69,73	39,68
N 25-1	52,43	52,22	52,33	14,41	13,03	13,72	68,84	68,70	68,77	31,03
N 14-1P	65,22	63,93	64,58	13,18	13,76	13,47	69,05	69,04	69,05	35,03
N 3-1	51,82	52,06	51,94	15,87	15,28	15,58	69,57	69,64	69,61	32,90
N12-1P	65,52	66,54	66,03	17,46	16,32	16,89	69,33	69,57	69,45	48,27
N 8-1	51,62	51,50	51,56	15,62	15,80	15,71	69,36	69,42	69,39	30,15
N 10-1	56,35	56,38	56,37	15,19	14,30	14,75	69,59	69,67	69,63	33,46
N 15-1	58,54	58,55	58,55	15,71	14,66	15,19	69,38	69,37	69,38	37,34
N 28-1	62,06	62,21	62,14	14,80	15,26	15,03	69,29	69,43	69,36	36,52

Nota: As linhas sombreadas a verde dizem respeito às peças extraídas dos provetes de teste dos ensaios de flexão.

Anexo D– Comparação entre métodos de dimensionamento de GiRs.







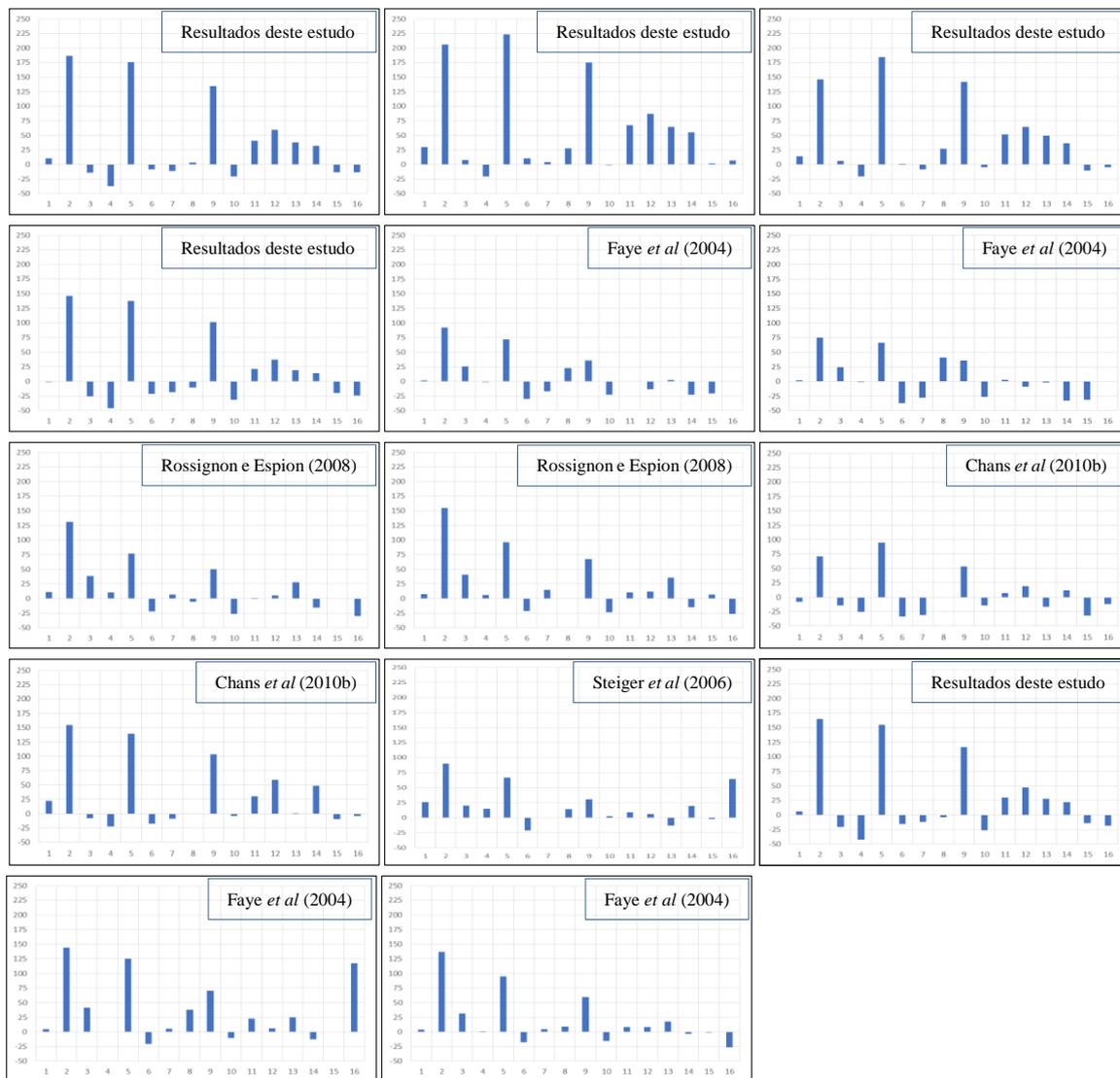


Figura A.1- Saldo entre resistências ao arranque estimadas pelos métodos de dimensionamento e resultados experimentais de vários estudos.

Anexo E– Resultados experimentais da determinação do módulo de elasticidade e da resistência à flexão

Quadro A.5- Resultados experimentais da determinação do módulo de elasticidade global paralelo ao fio (E_0) e da tensão resistente à flexão (f_m).

Provete:	E_0 (MPa):	f_m (MPa):
V II-1	17805,3	97,6
V II-2	11428,2	96,9
V I-1	9204,3	87,3
V 11-1	12941,0	107,6
V 8-1	16487,3	91,4
V 8 -2	12827,6	87,0
V 5-1	10775,6	93,4
V 17-1	13093,3	87,9
V 2-1	11193,5	83,5
V 6-1	13866,4	100,5
V 6-2	12809,8	73,0
N 16-1	15161,7	75,2
N 6-1	14843,3	107,3
N 22-1	17816,5	139,8
N 21-1	9781,1	86,5
N 13-1	19698,7	122,3
N 17-1	13886,9	97,9
N 9-1	15189,9	115,1
N 4-1	14238,5	97,5
N 3-1	15625,7	117,9
N 8-1	13900,8	76,1
N 15-1	16960,6	68,0
N 10-1	14728,7	90,7
N 28-1	13616,7	90,4

Anexo F– Resultados experimentais da determinação do teor de água e massa volúmica.

Quadro A.6- Resultados experimentais da determinação do teor de água (ω), da massa volúmica para o teor de água ω (ρ_{ω}), e da massa volúmica de referência (ρ_{12}).

Peça:	ω (%):	ρ_{ω} (kg/m ³):	ρ_{12} (kg/m ³):
V II-1	11,4%	674	676
V II-2	12,4%	560	559
V I-1	12,7%	546	544
V 11-1	10,6%	594	598
V 8-1	10,6%	638	642
V 8 -2	10,8%	561	565
V 5-1	10,6%	554	557
V 17-1	10,6%	583	587
V 2-1	10,7%	537	541
V 6-1	10,6%	591	595
V 6-2	10,7%	559	563
N 16-1	12,3%	638	638
N 1-1P	11,5%	536	538
N 6-1	11,4%	546	548
N 22-1	11,1%	646	649
N 21-1	11,3%	563	564
N 13-1	11,9%	600	600
N 17-1	12,7%	589	587
N 9-1	12,1%	604	603
N 4-1	12,5%	616	614
N 25-1	12,6%	629	627
N 14-1P	11,8%	583	584
N 3-1	12,6%	584	583
N 12-1P	12,1%	623	623
N 8-1	11,8%	536	537
N 10-1	11,7%	578	579
N 15-1	11,8%	605	606
N 28-1	11,8%	564	564