6 - Propriedades físico-mecânicas dos compósitos

Vinicius Gomes de Castro

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

CASTRO, V. G. Propriedades físico-mecânicas dos compósitos. In: *Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro* [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 93-100. ISBN: 978-65-87108-26-1. <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0007>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia [Creative Commons Reconocimiento 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

6

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

6.1 Módulo de Elasticidade

Elasticidade é quando a deformação produzida por um estresse abaixo do limite proporcional é totalmente recuperada após a remoção da carga. Quando a carga gera um estresse maior do que o limite proporcional, ocorre deformação plástica ou rompimento. Geralmente a curva de carga por deformação é linear abaixo do limite proporcional. A inclinação da curva linear é o módulo de elasticidade (MOE). Para testes de compressão e tração, esta inclinação pode ser chamada de módulo de Young para ser diferenciada do MOE do teste de flexão. O MOE de flexão é a medida da resistência à flexão, que é relacionada a rigidez.

Para compósitos madeira-cimento, existe uma correlação linear entre valores de MOE e a relação madeira/cimento aplicada na mistura (MOSLEMI; PFISTER, 1987). Na tabela 3, são apresentados alguns valores encontrados na literatura para compósitos de diferentes espécies, relações madeira/cimento e massa específica, produzidos pelo método *BISON*.

Tabela 3 - Valores de MOE encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de CaCl₂

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm ³)	MOE (MPa)	REFERÊNCIA
<i>PINUS</i>				
<i>P. caribaea</i>	1:2	1,79	7.813	Erakhrumen et al. (2008)
<i>P. pinaster</i> *	1:3	1,14	4.870	Semple e Evans (2004)
<i>P. radiata</i> *	1:3	1,21	4.990	Semple e Evans (2004)
<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	4.290	Iwakiri e Prata (2008)
<i>EUCALYPTUS</i>				
<i>E. bicostata</i>	1:3	1,14	2.634	Semple e Evans (2004)
<i>E. dunnii</i>	1:2,75	1,13	980	Iwakiri e Prata (2008)
<i>E. grandis</i>	1:2,75	1,12	4.780	Iwakiri e Prata (2008)
<i>E. saligna</i>	1:2,75	1,06	2.522	Castro et al. (2015)
<i>E. urophylla</i> **	1:2,75	1,09	1.659	Latorraca e Iwakiri (2001)
<i>OUTRAS ESPÉCIES</i>				
<i>Cecropia hololeuca</i>	1:2,75	1,04	3.232	Iwakiri et al. (2012)
<i>Cedrela odorata</i> ***	1:3	1,33	7.730	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
<i>Hymenaea courbaril</i> ***	1:3	1,56	5.220	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
<i>Leucaena leucocephala</i>	1:2,5	1,27	4.002	Marzuki et al. (2011)
<i>Schizolobium amazonicum</i>	1:2,75	1,13	3.203	Iwakiri et al. (2012)
<i>Terminalia superba</i>	1:2,3	1,20	3.104	Fuwape e Oyagade (1993)
<i>Toona ciliata</i> **	1:2,75	1,16	4.697	Sá et al. (2010)
<i>Vochysia maxima</i>	1:3	1,43	5.340	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Legenda: Em que: M:C, relação madeira:cimento; ME, massa específica do compósito; MOE, módulo de elasticidade; * uso de 2% de CaCl₂; ** uso de 4% de CaCl₂; *** uso de 5% de CaCl₂

Atualmente uma das tendências para determinação de propriedades mecânicas, especialmente o MOE são as técnicas não-destrutivas. Bejo, Takats e Vass (2005) determinaram o MOE estático e dinâmico de vigas produzidas com madeira- cimento para quatro diferentes espécies. Para todos os tratamentos, o MOE dinâmico foi aproximadamente duas vezes maior do que o estático. Isso ocorre devido à natureza viscoelástica da madeira. Embora os valores brutos sejam discrepantes, foi determinado uma correlação razoavelmente alta para os diferentes tipos de medição.

A propriedade MOE também é afetada pelo método de produção, comportamento este que também se repete para as demais propriedades mecânicas. Compósitos adensados por vibração apresentam menores valores médios do que os produzidos pelo método *BISON* quando as demais variáveis (espécie, aditivos, relação madeira/cimento) foram mantidas (CASTRO et al., 2015).

6.2 Módulo de Ruptura

O módulo de ruptura (MOR) indica a resistência à flexão de um corpo causado por uma carga. É uma propriedade muito importante para se determinar a aplicabilidade de um compósito para fins estruturais.

Diferente da relação com o MOE, o MOR apresenta uma correlação diferente com a proporção de cimento-madeira. Valores destas propriedades para compósitos produzidos com uma relação de 2 de cimento para 1 de madeira (baseado no peso seco) foram superiores àqueles apresentados por compósitos com proporção 3:1 (MOSLEMI; PFISTER, 1987). Também há uma relação positiva entre a massa específica do compósito e as propriedades mecânicas como um todo e especificamente com o MOR. Uma maior massa específica, alcançada por uma maior pressão durante o processo de produção, resulta na densificação da madeira, eliminação de vãos e melhora a conectividade entre o cimento e a madeira (BEJO; TAKATS; VASS, 2005).

Alguns exemplos de valores médios de MOR apresentados na literatura são relatados na tabela 4 para madeiras de florestas plantadas (*Pinus* e *Eucalyptus*) e de florestas nativas considerando a relação madeira/cimento usada e a massa específica final do compósito investigado.

Tabela 4 - Valores de MOR encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de CaCl₂(continua)

(Continua)

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm ³)	MOR (MPa)	REFERÊNCIA
<i>PINUS</i>				
<i>P. caribaea</i>	1:2	1,79	46,90	Erakhrumen et al. (2008)
<i>P. pinaster</i> *	1:3	1,14	13,80	Semple e Evans (2004)
<i>P. radiata</i> *	1:3	1,21	11,90	Semple e Evans (2004)
<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	9,41	Iwakiri e Prata (2008)
<i>EUCALYPTUS</i>				
<i>E. bicostata</i>	1:3	1,14	7,20	Semple e Evans (2004)
<i>E. dunnii</i>	1:2,75	1,13	3,92	Iwakiri e Prata (2008)
<i>E. grandis</i>	1:2,75	1,12	9,90	Iwakiri e Prata (2008)
<i>E. saligna</i>	1:2,75	1,06	4,02	Castro et al. (2015)
<i>OUTRAS ESPÉCIES</i>				
<i>Alnus subordata</i>	1:3	1,20	11,98	Nazerian et al. (2011)
<i>Cecropia hololeuca</i>	1:2,75	1,04	9,17	Iwakiri et al. (2012)
<i>Cedrela odorata</i> ***	1:3	1,33	9,24	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
<i>Hymenaea courbaril</i> ***	1:3	1,56	4,21	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Tabela 4 - Valores de MOR encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de CaCl₂(continua)
(Conclusão)

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm ³)	MOR (MPa)	REFERÊNCIA
<i>Leucaena leucocephala</i>	1:2,5	1,27	8,95	Marzuki et al. (2011)
<i>Populus deltoides</i>	1:3	1,25	11,45	Nazerian, Ghalehno e Gozali (2011)
<i>Schizolobium amazonicum</i>	1:2,75	1,13	6,80	Iwakiri et al. (2012)
<i>Terminalia superba</i>	1:2,3	1,20	9,00	Fuwape e Oyagade (1993)
<i>Toona ciliata</i> **	1:2,75	1,16	9,19	Sá et al. (2010)
<i>Vochysia maxima</i>	1:3	1,43	7,66	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Legenda: Em que: M:C, relação madeira: cimento; ME, massa específica do compósito; MOR, módulo de ruptura; * uso de 2% de CaCl₂; ** uso de 4% de CaCl₂; *** uso de 5% de CaCl₂

Outra variável no processo que afeta diretamente a propriedade MOR é a orientação das partículas. Cabangon et al. (2002) analisaram o efeito da orientação na produção de painéis madeira-cimento com partículas *Excelsior* de *Pinus radiata* e *Populus deltoides* na proporção cimento:madeira de 1:0,8. Para painéis com partículas orientadas, foi apresentado aproximadamente o dobro de valores de MOR do que painéis aleatórios para testes realizados paralelos à orientação. Comportamento similar também foi observado por Del Menezzi, Castro e Souza (2007) ao usarem partículas tipo *Strand* de *Pinus taeda* na relação de 1:1 em relação ao cimento.

6.3 Ligação Interna

Ligação interna ou resistência à tração perpendicular à superfície é resistência máxima suportada por um corpo de prova em um teste em que forças perpendiculares à sua superfície são aplicadas. Sotande et al. (2012) indicaram que o tipo de partícula e a relação madeira:cimento influenciaram significativamente os resultados médios de ligação interna de compósitos madeira-cimento produzidos com partículas de *Azalia africana*. Os autores obtiveram maiores médias em compósitos quando partículas de madeira foram misturadas com a madeira em pó do que compósitos produzidos exclusivamente de partículas ou em pó. A mistura de diferentes granulometrias leva a um compósito com menos espaços vazios e, conseqüentemente, melhor ligação. A propriedade também melhorou com o aumento da quantidade de cimento em relação à madeira.

A ligação interna é uma propriedade importante quando os compósitos são utilizados na forma de painéis, por isso é importante ressaltar também algumas variáveis que a literatura afirma não afetar esta propriedade para oferecer à indústria deste tipo de produto alternativas de matéria-prima. Por exemplo, Santos et al. (2008) estudaram a produção de painéis madeira-cimento produzidos com a mistura de 3 espécies (*Eremanthus erythropappus*, *Eucalyptus* spp e *Pinus* spp) em diferentes proporções. Nenhuma combinação de material estudada afetou a propriedade de ligação interna. Também não foi encontrado efeito significativo para painéis produzidos com madeira de *Toona ciliata* de diferentes idades e procedências (BEJO; TAKATS; VASS, 2005).

Na tabela 5, pode ser observado um conjunto de valores médios para a propriedade de ligação interna encontrada na literatura para compósitos madeira-cimento produzidos com partículas de diversas espécies e adição de 3% de CaCl₂,

Tabela 5 - Valores de ligação interna encontrados na literatura para painéis madeira-cimento de diversas espécies com adição de 3% de CaCl₂

ESPÉCIE	M:C	ME (g/cm ³)	LI (MPa)	REFERÊNCIA
<i>PINUS</i>				
<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	0,46	Iwakiri e Prata (2008)
<i>EUCALYPTUS</i>				
<i>E. dunnei</i>	1:2,75	1,13	0,26	Iwakiri e Prata (2008)
<i>E. grandis</i>	1:2,75	1,12	0,47	Iwakiri e Prata (2008)
OUTRAS ESPÉCIES				
<i>Alnus subcordata</i>	1:3	1,20	0,39	Nazerian, Ghalehno e Gozali (2011)
<i>Cedrela odorata**</i>	1:3	1,33	1,60	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
<i>Cecropia hololeuca</i>	1:2,75	1,04	0,80	Iwakiri et al. (2012)
<i>Hymenaea courbaril**</i>	1:3	1,56	1,53	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)
<i>Leucaena leucocephala</i>	1:2,5	1,27	0,59	Marzuki et al. (2011)
<i>Populus deltoides</i>	1:3	1,25	0,30	Nazerian, Ghalehno e Gozali (2011)
<i>Schizolobium amazonicum</i>	1:2,75	1,131	0,67	Iwakiri et al. (2012)
<i>Toona ciliata*</i>	1:2,75	1,16	0,99	Sá et al. (2010)
<i>Vochysia maxima</i>	1:3	1,43	1,35	Macêdo, Souza e Pompeu Neto (2012)

Legenda: Em que: M:C, relação madeira:cimento; ME, massa específica do compósito; LI, ligação interna; * uso de 2% de CaCl₂; ** uso de 4% de CaCl₂; *** uso de 5% de CaCl₂

6.4 Propriedades Físicas

Em geral, as características que tornam os compósitos madeira-cimento desejáveis são a baixa absorção de água e boa estabilidade dimensional. Porém, quando comparados com produtos totalmente minerais, não são

materiais inertes. A variação dimensional em compósitos madeira-cimento ocorre basicamente por quatro processos. O primeiro é devido à alcalinidade do cimento que pode degradar a madeira da mistura. O segundo processo é a carbonatação, processo de conversão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para o cristal CaCO_3 , que pode causar um estresse entre as partículas de madeira e a pasta de cimento tanto na fase úmida da mistura quanto na secagem. O terceiro processo é a movimentação da umidade para dentro e para fora das partículas e do cimento. E, por último, o quarto processo é a o resultado dos estresses internos durante o processo de fabricação do painel (FAN et al., 2004).

A quantidade de madeira na mistura também é responsável pelo aumento de valores de absorção de água. Quanto maior a quantidade de madeira, menor a massa específica dos compósitos e, consequentemente, maior a porosidade do material. O aumento de espaços vazios também pode estar relacionado à compactação inadequada do material (ASHORI; TABARSA; SEPAHVAND, 2012).