

# Compósito cimentício reforçado com fibras de carbono para recuperação de monumentos históricos

## *(Cementitious composites made with steatite residue reinforced with carbon fiber)*

T. H. Panzera<sup>1</sup>, K. Strecker<sup>1</sup>, J. S. Miranda<sup>1</sup>, F. C. Paiva<sup>1</sup>, P. H. R. Borges<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC, Universidade Federal de S. João del-Rei - UFSJ, Campus Sto. Antônio, Praça Frei Orlando 170, S. João del-Rei, MG 36.307-352

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG Av. Amazonas 7565, Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG 30510-000  
panzera@ufsjs.edu.br

### Resumo

O intemperismo, como fenômeno natural, atinge não somente materiais produzidos pelo homem, como também construções feitas de rochas naturais. No entanto, a evolução intempérica geralmente ocorre em ritmo muito lento em relação à duração dos empreendimentos humanos. Contudo, há situações em que este se acelera, afetando as obras de engenharia, sobretudo as obras de arte, monumentos históricos e fachadas de igrejas consideradas patrimônio da humanidade. O presente trabalho investigou o efeito da adição de fibra de carbono em compósitos cimentícios de resíduos de esteatito visando à recuperação de peças confeccionadas com este mineral, popularmente conhecido como “pedra-sabão”. As propriedades físico-mecânicas tais como, densidade volumétrica e resistência mecânica à flexão foram investigadas neste experimento. Concluiu-se que a adição de fibra de carbono aumenta significativamente a resistência mecânica dos compósitos além da redução de seu peso específico, permitindo o reaproveitamento de um maior percentual de resíduos de esteatito no compósito final.

**Palavras-chave:** reaproveitamento de resíduos de esteatito, fibras de carbono, compósitos cimentícios, propriedades mecânicas, planejamento estatístico de experimento.

### Abstract

*Weathering is a natural phenomenon that affects both the engineering materials and natural rocks used for construction. The weathering evolution generally occurs at a slow pace when compared with the overall durability of the construction elements. However, in some cases the weathering may develop much quicker, affecting the engineering constructions and also historical buildings such as monuments and churches. This work investigated the effect of carbon fibre addition into cementitious composites made with residues of steatite, a mineral, also known as soapstone, for restoration of craftwork elements. The material's properties, such as bulk density and flexural strength were investigated. It is possible to conclude that the carbon fibre addition increases the flexural strength of the composites and reduces the specific weight, allowing for the use of a significant percentage of steatite in the formulation of the composites.*

**Keywords:** waste recycling, carbon fibre, cementitious composites, mechanical properties, full design of experiment.

## INTRODUÇÃO

A aplicação do mineral esteatito em artesanato foi observada desde o século XVII. O nome “pedra-sabão” foi conferido à rocha pelos artistas da época barroca, dos quais o mais conhecido é Antônio Francisco Lisboa, o “Aleijadinho”, devido à baixa dureza apresentada. O esteatito é uma rocha metamórfica, compacta, composta, sobretudo de silicato hidratado de magnésio (talco), mas contendo outros minerais tais como magnesita e sílica. É uma rocha muito branda e de baixa dureza, por conter grandes quantidades de talco na sua constituição [1]. Por estas características, o esteatito foi amplamente empregado na confecção de obras de arte esculpidas, monumentos e detalhes de fachadas de igrejas históricas Brasileiras, muito das quais tombadas como patrimônio histórico mundial [3].

Existem muitos termos usados em pesquisas sobre alteração e conservação de rochas em monumentos, tais como degradação, deterioração, danos, desgaste entre outros, todos usados para descrever mudanças superficiais. Alteração é um termo de valor neutro e definido como a modificação do material que não implica necessariamente numa transformação de suas características segundo o perfil conservativo. Intemperismo é o processo de alteração que ocorre naturalmente, enquanto a deterioração é o dano que resulta de fatores naturais somados aos antrópicos e que leva ao desgaste [3]. A deterioração afeta tanto a rocha em seu lugar de origem, como a pedra talhada e sua colocação na obra. Já o termo degradação corresponde à modificação do material que supõe sempre degeneração de características segundo a ótica de conservação. Os mecanismos que causam a alteração e degradação são os

mesmos, com importância significativa no caso específico de um monumento histórico [4].

A degradação de fachadas de igrejas e monumentos esculpidos em esteatito vêm crescendo significativamente, tornando este assunto muitas vezes polêmico devido à falta de conhecimento técnico para sua restauração. O desenvolvimento de uma argamassa cimentícia contendo o mineral esteatito tem sido investigado na tentativa de obter um material resistente e durável e ao mesmo tempo em que tenha as características físicas similares à pedra-sabão, tornando a restauração imperceptível [5]. Algumas vezes, a degradação de peças de maior porte dificulta o trabalho de restauração devido à ação da gravidade com esforços mecânicos atuantes, principalmente aqueles de flexão. Por este motivo, a adição de fibras de carbono neste compósito (argamassa) de esteatito visa aumentar a resistência à flexão do material, permitindo a sua utilização.

Os principais efeitos da adição de esteatito em compósitos cerâmicos de matriz cimentícia, dentre eles a redução da resistência à flexão dos compósitos com a adição de esteatito, foram identificados [5]. Por este motivo, o presente trabalho visa à investigação do efeito da adição de fibras de carbono unidirecionais em compósitos de esteatito, como também a caracterização mecânica do material por meio do ensaio mecânico de flexão em três pontos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

**Materiais:** os compósitos investigados são constituídos de uma fase matriz cimentícia (cimento Portland), uma fase dispersa do minério esteatito e uma fase laminada de fibras de carbono. O cimento Portland utilizado foi do tipo CP-V ARI PLUS fabricado pela empresa Holcim Brasil S.A. e de acordo com as exigências da norma NBR 11578-ABNT [6]. Sua composição química, bem como finura Blaine, podem ser observadas na Tabela I.

O resíduo de esteatito recebido in natura da cidade de Congonhas (MG) foi seco em estufa a 80 °C por 24 h e posteriormente classificado por peneiramento em duas faixas granulométricas de aberturas US-tyler padrão ASTM: [16/40] e [100/200]. A Tabela II exibe a análise química

Tabela I - Características físico-químicas do cimento Portland CP-V.

[Table I - Chemical analysis of Portland cement (CP-V).]

Componente químico	Resultados (%)
CaO (%)	64,14
SiO <sub>2</sub> (%)	19,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,12
SO <sub>3</sub> (%)	2,85
MgO (%)	0,8
K <sub>2</sub> O (%)	0,66
Na <sub>2</sub> O (%)	0,70
Finura (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	4729

Tabela II - Análise química do esteatito.

[Table II - Chemical analysis of steatite.]

Componente químico	Resultados (%)
SiO <sub>2</sub>	44,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,38
TiO <sub>2</sub>	< 0,001
CaO	2,95
MgO	29,28
Na <sub>2</sub> O	<0,001
KO <sub>2</sub>	< 0,001
MnO	0,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01
Perda ao fogo	10,34

do esteatito obtida pelo método de espectrometria de fluorescência de raios X, identificando um alto teor de óxido de silício (44,73%) e de óxido de magnésio (29,28%):

A fibra de carbono utilizada foi adquirida em loja comercial especializada sendo fornecida em malha tipo fita unidirecional. A fita de carbono de 3 mm de largura e 1 mm de espessura foi cortada e distribuída em duas fileiras posicionadas longitudinalmente no interior do corpo de prova (ver Fig. 2).

**Fabricação dos corpos de prova:** a preparação do material cerâmico para fabricação dos corpos de prova e procedimentos de cura seguiram as recomendações da norma BS EN12390-2 [10] a fim de garantir pequena variabilidade no processo de fabricação. O método de aleatorização foi adotado na etapa de preparação dos corpos de prova, como também na etapa de realização dos ensaios, permitindo uma ordenação arbitrária das condições experimentais, evitando que efeitos de fatores não-controlados afetassem as variáveis-respostas [7, 8]. Um molde prismático, fabricado em aço-ferramenta, foi utilizado para a compactação dos corpos de prova (Fig. 1a). As dimensões dos corpos de prova prismáticos foram 20,5 x 5 x 70,6 mm<sup>3</sup> (ver Fig. 1b).

Os compósitos com fibra de carbono foram fabricados em duas etapas de prensagem. Primeiramente, a metade da massa cerâmica foi pré-compactada; em seguida duas malhas de fibras de carbono unidirecionais foram posicionadas ao longo da seção longitudinal (ver Fig. 2), adicionando

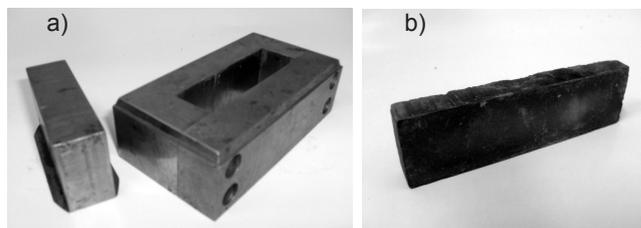


Figura 1: Matriz metálica prismática (a) e corpo de prova cimentício (b).

[Figure 1: Metallic mould (a) and prismatic sample (b).]

o restante do material para prensagem final e obtenção do corpo de prova. Todos os corpos de prova foram vazados e compactados em dois níveis de pressão 10 e 30 MPa durante 30 s; depois foram embalados em sacos plásticos evitando qualquer perda de umidade na etapa de cura.

Seis corpos de prova foram fabricados para cada condição experimental. Considerando a adoção de duas réplicas e 24 condições experimentais, totalizaram 288 corpos de prova. A réplica consiste na repetição da condição experimental, proporcionando a estimativa do erro experimental de uma resposta individual. A extensão desse erro é importante



Figura 2: Adição de fibra de carbono unidirecional.  
[Figure 2: Unidirectional carbon fibres.]

para verificação da existência de efeitos significativos que possam ser atribuídos à ação dos fatores [7, 8].

*Planejamento fatorial completo:* o planejamento fatorial completo do tipo  $n^k$  consiste em investigar todas as possíveis combinações dos fatores experimentais ( $k$ ) e seus respectivos níveis ( $n$ ). O resultado do fatorial  $n^k$  corresponde ao número de condições experimentais analisadas [7, 8]. As variáveis respostas investigadas neste experimento foram: densidade volumétrica e resistência mecânica à flexão em três pontos (norma BS EN 658) [9]. Dentre os fatores experimentais de maior relevância e possíveis de serem controlados, quatro foram escolhidos: fração da fase dispersa de esteatito (5, 20 e 40%), faixas granulométricas do esteatito (16/40 e 100/200 US-tyler), pressão de compactação (10 e 30 MPa), e adição de fibra de carbono (sem e com). Os fatores mantidos constantes no experimento foram: tipo de matriz (cimento Portland), relação água/cimento (0,40), tempo de mistura (~5 min) e temperatura ambiente de fabricação (~20 °C). A Tabela III exhibe os fatores e níveis experimentais investigados neste trabalho, estabelecendo um planejamento fatorial do tipo  $3^1 2^3$ , que fornece 24 combinações experimentais distintas (ver Tabela III).

A técnica estatística DOE (Design of Experiment) somada à ferramenta ANOVA (Analysis of Variance) fornece a significância de cada fator experimental sobre as variáveis respostas investigadas neste trabalho. O programa computacional estatístico Minitab versão 14 foi utilizado

Tabela III - Planejamento fatorial completo.  
[Table III - Full factorial design matrix.]

	Faixa granulométrica do esteatito (US-TYLER)	Fração de esteatito (%)	Pressão de compactação (MPa)	Adição de Fibra de Carbono
C1	16-40	5	10	Sem
C2	16-40	5	10	Com
C3	16-40	5	30	Sem
C4	16-40	5	30	Com
C5	16-40	20	10	Sem
C6	16-40	20	10	Com
C7	16-40	20	30	Sem
C8	16-40	20	30	Com
C9	16-40	40	10	Sem
C10	16-40	40	10	Com
C11	16-40	40	30	Sem
C12	16-40	40	30	Com
C13	100-200	5	10	Sem
C14	100-200	5	10	Com
C15	100-200	5	30	Sem
C16	100-200	5	30	Com
C17	100-200	20	10	Sem
C18	100-200	20	10	Com
C19	100-200	20	30	Sem
C20	100-200	20	30	Com
C21	100-200	40	10	Sem
C22	100-200	40	10	Com
C23	100-200	40	30	Sem
C24	100-200	40	30	Com

para o tratamento dos dados e análise dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela IV apresenta os resultados da Análise de Variância para as médias das variáveis respostas investigadas. Os fatores relacionados a um P-valor menor ou igual a 0,05 (95% de confiabilidade) são considerados significativos, estando estes sublinhados. O efeito principal de um fator deve ser interpretado individualmente apenas se não há evidência de que o fator não interage com outros fatores. Quando um ou mais efeitos de interação de ordem superior são significativos, os fatores que interagem devem ser considerados conjuntamente [7, 8]. A fim de facilitar a compreensão e interpretação dos resultados, os fatores experimentais foram identificados na Tabela IV por meio de uma letra maiúscula, da seguinte forma: granulometria da partícula de esteatito (G), fração de esteatito (F), pressão de compactação (P) e adição de fibra de carbono (C).

O valor de  $R^2$  adjunto exibido na ANOVA mede a proporção da variabilidade presente nas observações da variável resposta e que é explicada pelas variáveis preditoras presentes na equação de regressão. Quanto mais próximo de 100% for  $R^2$ , melhor a qualidade da equação ajustada aos dados [7, 8].

**Densidade volumétrica:** Os valores de densidade volumétrica dos compósitos variaram de 1,93 a 2,30 g/cm<sup>3</sup>. Os P-valores sublinhados na Tabela IV mostram que o efeito principal fração de esteatito (F), as interações entre a granulometria do esteatito e adição de fibra de carbono (G\*C) e compactação e adição de fibra de carbono (P\*C) são significativas. Devido as interações de segunda ordem,

Tabela IV - Análise de variância, P-valores.

[Table IV - Analysis of variance, P-values.]

Fatores		P-valor $\leq 0,05$	
		Densidade volumétrica	Resistência à flexão
Efeitos principais	G	0,333	0,001
	F	<u>0,004</u>	0,419
	P	0,000	<u>0,000</u>
	C	0,000	0,000
	G*F	0,080	0,090
	G*P	0,208	0,245
	G*C	<u>0,002</u>	<u>0,011</u>
Interações	F*P	0,695	0,807
	F*C	0,498	0,828
	P*C	<u>0,000</u>	0,205
	G*F*P	0,318	0,787
	G*F*C	0,183	0,154
	G*P*C	0,411	0,616
	F*P*C	0,248	0,749
	G*F*P*C	0,532	0,989
	$R^2$ (adj) %	98,16	82,39

os efeitos principais de pressão de compactação e da adição de fibra de carbono não serão analisados individualmente. O valor do  $R^2$  ajustado foi de 98,16%, indicando que a qualidade de ajuste do modelo foi satisfatória. A Fig. 3 exibe o gráfico de resíduos de distribuição normal para a variável resposta densidade volumétrica, mostrando uma adequada distribuição dos pontos ao longo da reta, validando a análise estatística realizada.

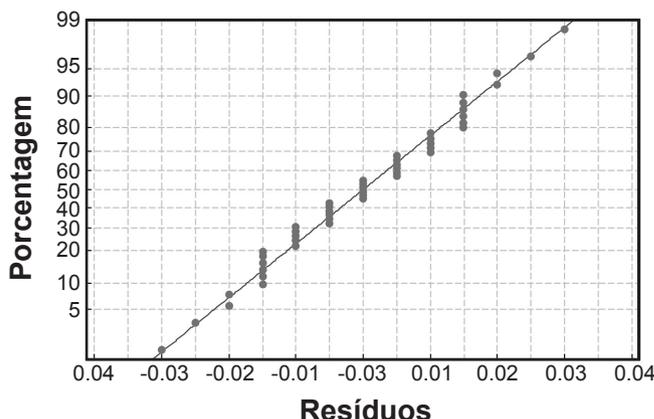


Figura 3: Gráfico de resíduos de distribuição normal para a densidade volumétrica.

[Figure 3: Residual plot of normal probability for bulk density.]

O gráfico de efeito principal apresentado na Fig. 4 mostra que a adição de esteatito promoveu um aumento da densidade volumétrica dos compósitos. Isto se deve ao fato do minério esteatito exibir uma densidade aparente superior à do cimento Portland. Nota-se que a fração de esteatito de 20% exibe uma densidade volumétrica superior aos demais níveis. Este comportamento pode ser explicado pela facilidade de empacotamento exibido pelo percentual de 20% de esteatito adicionado. Percebe-se que embora o aumento da fração de esteatito tenda a aumentar a densidade do compósito, o fator de empacotamento é também relevante, afetando diretamente a densidade de compósitos particulados.

A Fig. 5 exibe o gráfico de interação da granulometria do esteatito com adição de fibra de carbono (G\*C) para a variável resposta densidade volumétrica. Observa-se que a adição de fibra de carbono nos compósitos promoveu a redução da densidade volumétrica dos compósitos, visto que a densidade aparente das fibras de carbono é inferior à matriz cimentícia e às partículas de esteatito. Nota-se uma pequena variação de densidade dos compósitos entre os níveis de granulometria do esteatito, entretanto as partículas mais finas de esteatito (100-200 US-tyler) exibiram uma densidade volumétrica inferior quando a fibra de carbono foi adicionada.

A Fig. 6 apresenta o efeito da interação da pressão de compactação com fibra de carbono (P\*C), mostrando um aumento percentual médio da densidade volumétrica de 5,85% quando o nível de compactação aumenta de 10 MPa para 30 MPa. Verifica-se que a adição de fibra de carbono promove uma redução da densidade volumétrica em ambos os níveis de compactação, sendo esta visualmente mais acentuada para o nível baixo de pressão (10 MPa).

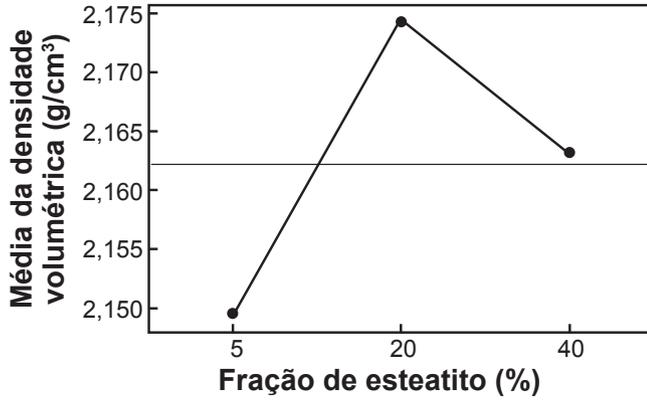


Figura 4: Efeito principal fração de esteatito sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos.  
 [Figure 4: Main effect plot of steatite fraction for bulk density response.]

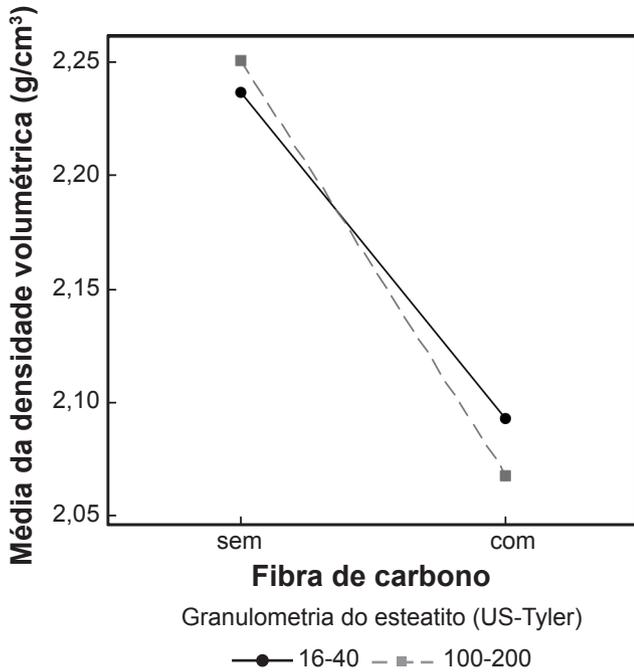


Figura 5: Efeito da interação granulometria de esteatito e adição de fibra de carbono sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos.  
 [Figure 5: Interaction effect plot of steatite fraction and carbon fibre addition for bulk density response.]

**Resistência à flexão em três pontos:** os valores de resistência à flexão dos compósitos variaram de 8,02 MPa a 18,22 MPa. O efeito principal pressão de compactação (P) e a interação de segunda ordem granulometria de esteatito e adição de fibra de carbono (G\*C) apresentaram P-valores inferiores a 0,05 sendo estes significativos sobre a variável resposta resistência a flexão. O valor de R<sup>2</sup> de 82,39% indica que o modelo se ajustou adequadamente aos resultados de resistência à flexão. Os pontos distribuídos ao longo da reta do gráfico de resíduos validam as condições de normalidade dos dados investigados de resistência mecânica (Fig. 7).

A Fig. 8 exibe o gráfico de efeito principal do fator

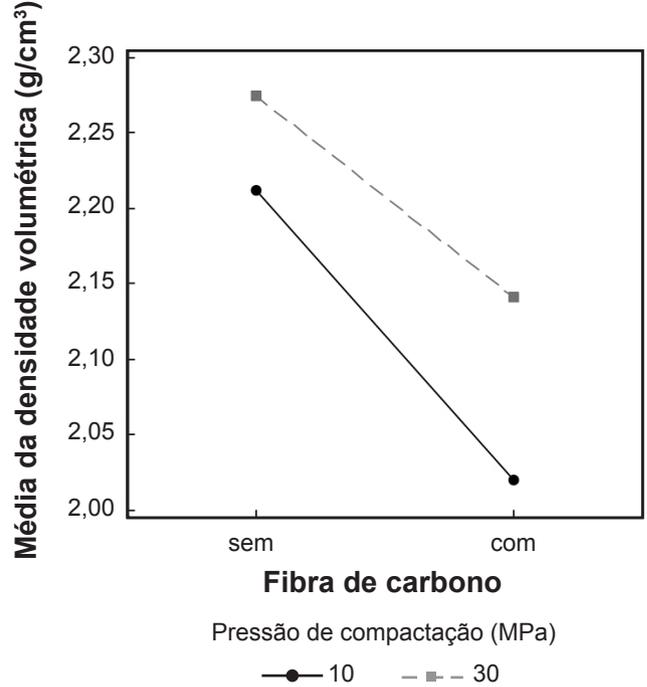


Figura 6: Efeito da interação pressão de compactação e adição de fibra de carbono sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos.  
 [Figure 6: Interaction effect plot of compaction and carbon fibre addition for bulk density response.]

pressão de compactação (P) para a variável resposta resistência à flexão. O aumento da pressão de compactação de 10 MPa para 30 MPa fornece um aumento percentual médio da resistência à flexão de 19,86%, confirmando os estudos realizados [11], que mostram que o acréscimo na pressão de compactação tende a aumentar a densidade, diminuindo o raio dos poros, e conseqüentemente gerando produtos cimentícios de alta resistência.

A Fig. 9 exibe o efeito da interação dos fatores granulometria do esteatito e adição de fibra de carbono (G\*C), observando um aumento da resistência mecânica para

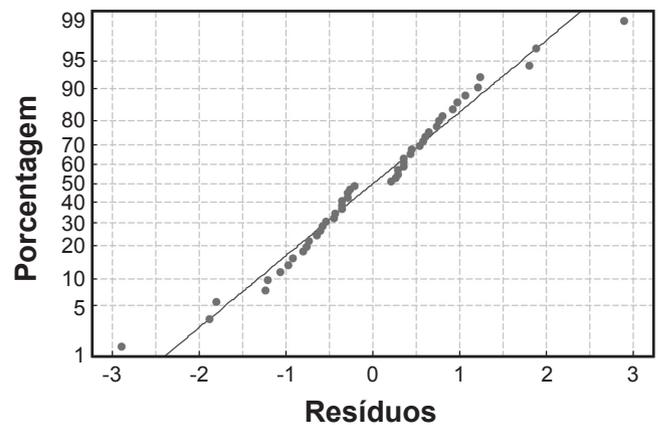


Figura 7: Gráfico de resíduos de distribuição normal para a resistência à flexão.  
 [Figure 7: Residual plot of normal probability for the flexural strength.]

os compósitos fabricados com granulometria de esteatito 16-40 US-tyler e adição de fibra de carbono. As partículas de esteatito 16-40 US-tyler exibem uma menor área superficial em comparação as partículas mais finas 100-200 US-tyler, favorecendo à otimização do empacotamento de partículas do sistema, reduzindo a quantidade de poros e por sua vez aumentando a resistência mecânica dos compósitos.

Cabe ressaltar que a adição de fibra de carbono nos compósitos cimentícios de esteatito não somente reduziu a densidade volumétrica como também aumentou sua resistência mecânica, aumentando a relação de desempenho resistência/peso, favorecendo assim o reaproveitamento deste material na recuperação de peças fabricadas em pedrasabão. Novos estudos já estão sendo realizados para avaliar

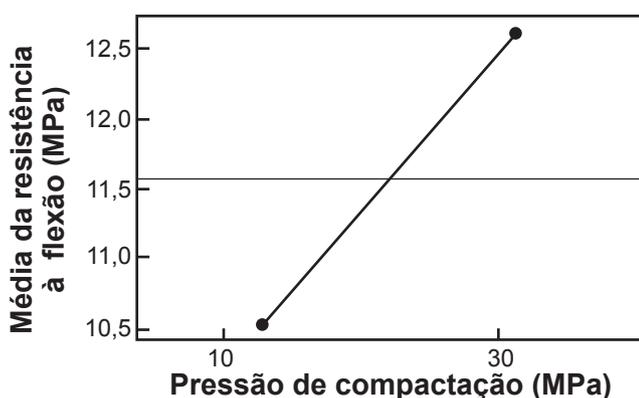


Figura 8: Efeito principal da pressão de compactação sobre a média da resistência à flexão dos compósitos.

[Figure 8: Main effect plot of compaction for flexural strength response.]

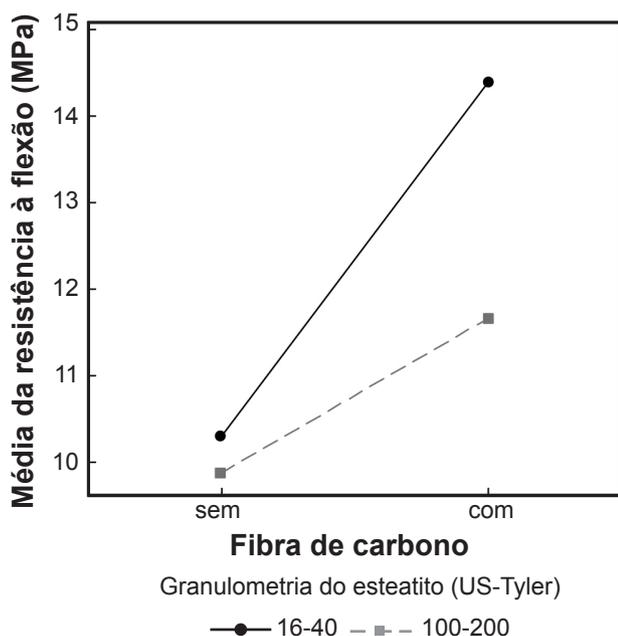


Figura 9: Efeito da interação granulometria do esteatito e adição de fibra de carbono sobre a média da resistência a flexão dos compósitos.

[Figure 9: Interaction effect plot of steatite particle size and carbon fibre addition for flexural strength response.]

a porosidade e a resistência mecânica ao cisalhamento dos compósitos, com intuito de reduzir a penetração da água e melhorar a adesão entre as superfícies, a fim de prolongar a durabilidade do material restaurado.

## CONCLUSÕES

Foram estudados os fatores granulometria e fração do esteatito, pressão de compactação e adição de fibra de carbono nas propriedades físico mecânicas de compósitos cimentícios. Concluiu-se que a condição experimental mais adequada para a restauração e manutenção de peças pré-moldadas em esteatito é aquela fabricada com 40% de esteatito 16-40US-tyler, com nível de compactação de 30 MPa e adição de fibra de carbono (condição experimental C12). A adição de fibra de carbono permitiu a reutilização de um maior percentual de esteatito nos compósitos cimentícios exibindo uma resistência mecânica satisfatória além de reduzir a densidade volumétrica do produto final.

## AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pela concessão de bolsa de Pós-doutorado Jr. (CEX 00221/06) e ao CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS

- [1] W. Mielcarek, D. N. Wozny, K. Prociow, J. Eur. Ceram. Soc. **24** (2004) 3817.
- [2] J. S. White, J. Am. Ceram. Soc. **27**, 11 (1944) 320.
- [3] M. E. Silva, H. M. P. Roeser, Rev. Bras. Geociências **33**, 4 (2003) 331.
- [4] A. M. S. Oliveira, S. N. A. Brito, Geologia de Engenharia **13** (1998) 573.
- [5] K. Strecker, T. H. Panzera, A. L. R. Sabariz, J. S. Miranda, "Investigação do efeito da incorporação de resíduos de esteatito nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios", Anais 52º Cong. Bras. Cerâmica, Florianópolis, SC (2008).
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11578: Cimento Portland Cimento Portland Composto, Rio de Janeiro, RJ (1991).
- [7] M. C. C. Werkema, S. Aguiar, "Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo", Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG (1996) 30.
- [8] D. C. Montgomery, Introduction to statistical quality control, John Wiley & Sons, New York, EUA (1997) 210.
- [9] British Standard BS EN 658-3: Advanced technical ceramics. Mechanical properties of ceramic composites at room temperature. Determination of flexural strength (2002).
- [10] British Standard BS EN 12390-2: Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests (2000).
- [11] A. Bajza, Cem. Concr. Res. **13** (1983) 239. (Rec. 20/03/2010, Rev. 08/04/2010, Ac. 07/05/2010)