

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA PAULA TIAGO FERNANDES

**ESTUDO DO ACETATO DE CELULOSE INCORPORADO EM MATRIZ
GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACAULIM**

UBERLÂNDIA

2021

MARIA PAULA TIAGO FERNANDES

**ESTUDO DO ACETATO DE CELULOSE INCORPORADO EM MATRIZ
GEOPOLIMÉRICA À BASE DE METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta.

UBERLÂNDIA

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que tem me sustentado e abençoado desde sempre, e por ter me permitido cursar essa faculdade, me dando inteligência, sabedoria e forças para concluí-la com êxito.

Agradeço à minha família, por todo o apoio e compreensão durante não só o curso, mas durante a minha vida toda, e especialmente à minha mãe, por me apoiar em todas as minhas decisões e por sempre se preocupar comigo.

Agradeço à minha professora orientadora Leila, por me orientar e auxiliar da melhor forma, acreditando no meu potencial e me impulsionando a fazer o meu melhor.

Agradeço também aos meus colegas e amigos que fiz durante o curso, por todo o apoio e suporte mútuo, pela confiança e responsabilidade nos trabalhos em grupo, e principalmente, à minha colega e melhor amiga Lidiane, que enfrentou comigo essa caminhada tão importante nas nossas vidas, dividindo os sofrimentos e alegrias que passamos, e que sempre me animou e deu forças.

RESUMO

Vários artigos e trabalhos já foram publicados sobre a grande quantidade de lixo produzido pela indústria de cigarros, sendo a maior parte desse problema devido à fibra de acetato de celulose. Essa fibra, utilizada para a fabricação do filtro do cigarro, é um material de grande volume e de difícil decomposição no meio ambiente. A fibra é descartada após a utilização dos cigarros e também durante a sua fabricação, por erros de fabricação que a tornam inadequada para o uso. No presente trabalho, foi proposto o uso dessa fibra, descartada durante a fabricação do cigarro, para que ela não se torne um poluente, já que a fibra leva muito tempo para se decompor no meio ambiente. Foi estudado a adição dessa fibra em matriz geopolimérica. Os geopolímeros vêm sendo empregados em substituição ao cimento Portland por serem mais sustentáveis, visto que a produção da matriz cimentícia gera poluição. Para isso, foi utilizada uma matriz geopolimérica à base de metacaulim ativada com uma solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio. As variáveis independentes estudadas foram os diferentes teores de fibra de acetato de celulose e a idade de ensaio, com o intuito de avaliar a influência dessas duas variáveis nas propriedades analisadas do material, além de determinar o melhor teor de fibra. Os resultados obtidos através dos ensaios foram promissores. A fibra se mostrou adequada para o reforço da matriz, já que todas as propriedades analisadas foram influenciadas positivamente pela adição de fibra, destacando-se dentre elas a tenacidade, cujo maior valor de 48,63 J/m², obtido para o maior teor de fibra (3%), representou um aumento de aproximadamente 796% em relação à matriz.

Palavras-chave: Fibra de Acetato de Celulose. Compósitos Geopoliméricos. Resistência mecânica. Tenacidade. Módulo de Elasticidade.

ABSTRACT

Several articles and works have been published on the large amount of waste produced by the cigarette industry, with most of this problem due to cellulose acetate fiber. This fiber, used to manufacture the cigarette filter, is a material of large volume and difficult to decompose in the environment. The fiber is discarded after the use of cigarettes and also during its manufacture, due to manufacturing errors that make it unsuitable for use. In the present work, it was proposed the use of this fiber, discarded during manufacturing, so that it does not become a pollutant, as the fiber takes a long time to decompose in the environment. The addition of this fiber to a geopolymer matrix was studied. Geopolymers have been used to replace Portland cement because they are more sustainable, since the production of the cement matrix generates pollution. For this, a geopolymer matrix based on metakaolin activated with a solution of sodium hydroxide and sodium silicate was used. The independent variables studied were the different cellulose acetate fiber contents and the test age, to evaluate the influence of these two variables on the analyzed properties of the material, in addition to determining the best fiber content. The results obtained through the trials were promising. The fiber was shown to be suitable for matrix reinforcement, since all properties analyzed were positively influenced by the addition of fiber, highlighting tenacity among them, whose highest value of 48.63 J/m², obtained for the highest fiber content (3%), represented an increase of approximately 796% in relation to the matrix.

Keywords: Cellulose Acetate fiber. Geopolymer composites. Strength. Tenacity. Modulus of Elasticity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Justificativa	6
1.2	Objetivo	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Geopolímero à base de metacaulim ativado	7
2.2	Fibra de Acetato de Celulose	8
3	MATERIAIS E MÉTODOS	9
3.1	Materiais	9
3.1.1	Metacaulim	9
3.1.2	Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio	10
3.1.3	Fibra de Acetato de Celulose	11
3.2	Planejamento Experimental	12
3.3	Produção do Geopolímero	13
3.4	Ensaio	15
3.4.1	Ensaio de Compressão	15
3.4.2	Ensaio de Flexão	16
3.4.3	Ensaio de absorção	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
4.1	Ensaio de Compressão	19
4.1.1	Resistência à Compressão	19
4.2	Ensaio de Flexão	22
4.2.1	Módulo de Ruptura	22
4.2.2	Módulo de Elasticidade	28
4.2.3	Tenacidade	31
4.3	Ensaio de Absorção	333
4.3.1	Índice de vazios	333
4.3.2	Absorção de água	35
5	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Segundo Vassalo (2013) e Silva (2016), o cimento Portland é um dos materiais mais utilizados no setor de Construção Civil. No entanto, sua produção é responsável pela emissão de vários poluentes atmosféricos, tais como material particulado (poeira), gases vinculados à chuva ácida, e principalmente, o dióxido de carbono (CO₂).

As limitações dos concretos de cimento Portland manifestam-se não só quanto aos problemas de caráter ambiental, mas também do ponto de vista de seu comportamento mecânico e desempenho face às condições químicas do meio envolvente. Dessa forma, surge a necessidade de sistemas ligantes alternativos, como os geopolímeros, que são matrizes obtidas por meio de materiais ricos em sílica e alumina, ativados em meio alcalino (PINTO, 2006; GRILLO, 2019).

Além disso, uma alternativa de melhora das propriedades da matriz geopolimérica é a produção de compósitos, ou seja, materiais compostos basicamente por duas fases: a matriz e as fibras. As fibras podem atuar como reforço da matriz em função das propriedades desta e das próprias fibras (FIGUEIREDO, 2000; ALVES, 2018).

Pesquisas e trabalhos já vêm sendo publicados sobre meios de reciclagem para a fibra de acetato de celulose, já que essa fibra não se decompõe rapidamente no meio ambiente. Além do mais, essa fibra já foi estudada como adição em materiais de construção civil, como tijolos, por exemplo (JOLY; COULIS, 2017; MOHAJERANI ET. AL, 2016).

1.2 Objetivo

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo produzir e avaliar matrizes e compósitos geopoliméricos à base de metacaulim ativados por solução de hidróxido de sódio e silicato de sódio, sendo que os compósitos serão produzidos com fibras de acetato de celulose, que são resíduos da indústria de fabricação de cigarros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geopolímero à base de metacaulim ativado

Segundo Silva (2016), as várias pesquisas que levaram à descoberta dos geopolímeros surgiram, principalmente, na tentativa de descobrir o segredo da longevidade das construções antigas. Estruturas construídas com cimento Portland apresentam patologias em um pequeno período de tempo, além de necessitarem de muita manutenção. Porém, materiais encontrados em escavações arqueológicas, cerâmicos e cimentícios, apresentam sua estrutura quase intacta.

Os materiais cimentícios produzidos pela ativação alcalina de aluminossilicatos já vinham sendo estudados pelo cientista Victor Glukhovisky e outros, quando em 1979, o cientista e professor Joseph Davidovits criou o termo “geopolímeros” para designar esses materiais (SANTA, 2012). Grillo (2019, p. 24), define os geopolímeros da seguinte forma:

O termo geopolímero é utilizado para referenciar um material ligante obtido pela reação química entre elementos inorgânicos. São elementos que possuem uma estrutura semicristalina, normalmente seus precursores possuem formas cristalinas bem definidas, que por meio da reação química, são desfeitas para formar a ligação.

A formação de geopolímeros acontece através de uma reação química em meio altamente alcalino. Vassalo (2013) cita que tanto os cimentos álcali-ativados como os geopolímeros são formados por ativação alcalina, sendo que se diferem nos materiais reagentes, na concentração alcalina e nos produtos formados. Os cimentos álcali-ativados são polimerizados em baixa concentração alcalina, e a reação forma o silicato de cálcio hidratado, já que a matéria-prima contém Si e Ca. Enquanto os geopolímeros são ativados em meio médio a altamente alcalino, com material precursor rico em Si e Al, formando a zeólita, que é um mineral de alumino-silicatos hidratados.

Entre os materiais que formam os geopolímeros, contendo Si e Al, tem-se a caulinita calcinada, também conhecida como metacaulim, que é o produto da desidroxilação do caulim (PINTO, 2006). O caulim é um minério composto por silicatos hidratados de alumínio, e são produzidos cerca de 0,8 milhões de toneladas de caulim no Brasil por ano. O processo de desidroxilação é o que torna o caulim mais reativo e pronto para sofrer a ativação alcalina (SANTA, 2012).

A reação de polimerização depende da quantidade de íons de Si e Al disponíveis para reagir, pois a quantidade será diretamente proporcional à resistência mecânica do geopolímero formado. O metacaulim é composto de cerca de 52% de SiO₂ e 40% de Al₂O₃, o que o torna uma ótima fonte de aluminossilicato para sintetizar geopolímeros (SANTA, 2012).

2.2 Fibra de Acetato de Celulose

Segundo Lucena (2003, p. 149), “o acetato de celulose é um dos ésteres orgânicos mais importantes derivados da celulose”. Entre suas várias formas de aplicação, está a fibra do acetato, que Alves (2016, p. 26) afirma ser “o material mais empregado na fabricação de filtros, devido às características de alta eficiência e facilidade de fabricação”.

Os cigarros com filtros só ganharam popularidade após a década de 50 e, passaram a dominar mais o mercado em relação aos cigarros sem filtro, após pesquisas indicarem o tabagismo como causador de câncer de pulmão em homens. (PAULY *et al*, 2002)

O filtro, visto microscopicamente, é composto de mais de 12.000 fibras de acetato de celulose, ligadas entre si por triacetina (triacetato de glicerol), que é um composto aglutinante que age como um plastificante. Essa aglutinação dos filamentos de acetato é o que proporciona firmeza ao filtro e aumenta sua capacidade de filtração (ALVES, 2016; PAULY *et al*, 2002).

Segundo Root (2019), é estimado que mais de 4,5 trilhões de bitucas de cigarro são descartadas no meio ambiente todo ano, no mundo inteiro. E o grande problema, além das substâncias tóxicas que ficam presas no filtro do cigarro e podem ser lixiviadas para o meio externo, é o filtro em si. A fibra de acetato de celulose não se decompõe biologicamente, o que causa, com o tempo, o acúmulo crescente desse material no meio ambiente (JOLY; COULIS, 2017).

Tendo em vista esse grande problema de poluição, esse material tornou-se alvo de pesquisas para que alternativas de descarte, substituição ou reciclagem sejam encontradas. Algumas dessas pesquisas já utilizam a fibra no setor de construção civil em materiais como tijolos, asfalto, e blocos de concreto para pavimentação, por exemplo. (MOHAJERANI ET. AL, 2016; RAHMAN ET. AL, 2020; WADALKAR ET. AL, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir do proposto no presente trabalho, foram realizadas adições de fibra de acetato de celulose em matriz geopolimérica para análise das propriedades dos compósitos por meio dos ensaios de compressão, flexão e absorção. Para a análise foram variados o teor de fibra e idade de ensaio.

O geopolímero utilizado foi produzido à base de metacaulim ativado com uma solução de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio. Foram moldados 11 corpos de prova para cada experimento. Foram realizados os ensaios de flexão, compressão e absorção, que permitiram a análise da resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, tenacidade, além do índice de vazios e a absorção do compósito.

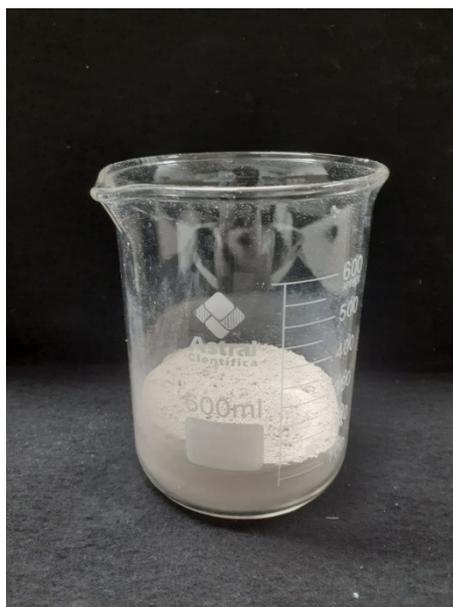
Os ensaios foram analisados comparando os resultados das matrizes e dos compósitos, para uma possível percepção de melhoras nas propriedades pelo uso da fibra na matriz. Além disso, as comparações entre os compósitos permitem analisar o melhor teor de fibra.

3.1 Materiais

3.1.1 Metacaulim

O metacaulim utilizado foi doado pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, e se encontra ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Metacaulim



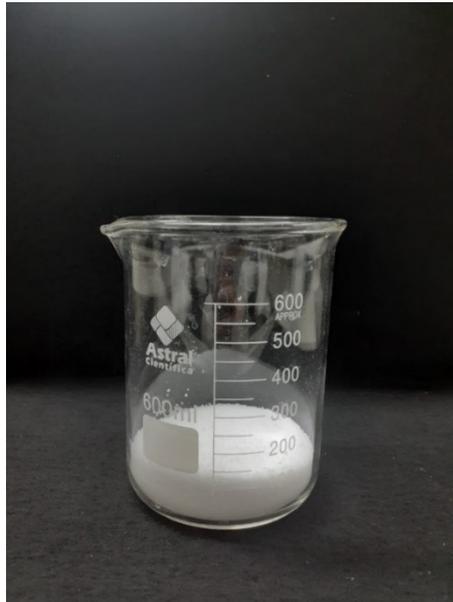
Fonte: Autora.

Com uma massa específica de $2,65 \text{ g/cm}^3$, o metacaulim utilizado tem uma finura superior à dos cimentos Portland nacionais, e possui um diâmetro médio de $12,4 \text{ }\mu\text{m}$. Além disso, sua composição é, principalmente, de sílica e alumina, o que o caracteriza como um material reativo e de características pozolânicas (METACAULIM, 2003).

3.1.2 Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio

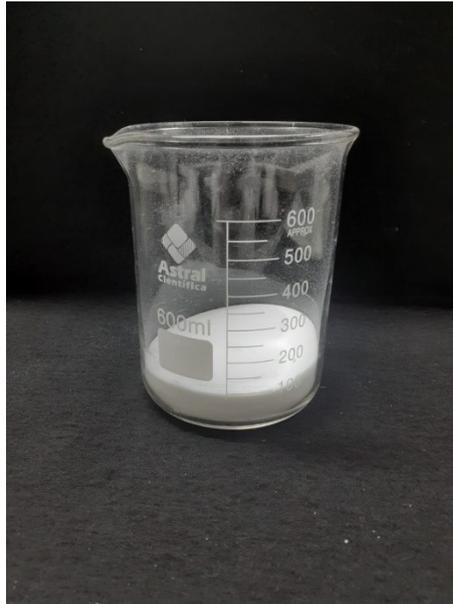
Os materiais da solução ativadora, sendo eles o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, este último com relação entre os óxidos ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) de aproximadamente 2, foram obtidos das empresas Vetec Química Fina Ltda, de Duque de Caxias – Rio de Janeiro, e Unaprosil - Usina Nova América, respectivamente. Os nomes comerciais dos dois componentes são *Hidróxido de Sódio em Micro pérola P.A.* e *Silicato de Sódio Alcalino em Pó 2.0*, os quais estão apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Figura 2: Hidróxido de Sódio em Micro Pérola P. A.



Fonte: Autora.

Figura 3: Silicato de Sódio Alcalino em Pó 2.0.



Fonte: Autora.

Foram utilizadas para o cálculo das formulações dos experimentos, relações otimizadas encontradas por Alves (2018), sendo as molaridades do hidróxido e do silicato de 15 e 12 M, respectivamente, e a proporção mássica entre eles de 1,0: 2,5 (NaOH: Na₂SiO₃).

3.1.3 Fibra de Acetato de Celulose

As fibras de acetato de celulose são resíduos da fabricação de cigarros, especificamente os filtros, doadas pela empresa Souza Cruz, como se observa na Figura 4. Foi necessário, portanto, um espalhamento dessas fibras para sua utilização. Essa dispersão das fibras foi feita com a utilização de um liquidificador industrial Skymesen, e elas foram batidas com parte da água da mistura, para um melhor resultado.

Figura 4: Fibras sem preparo (resíduos de filtros de cigarro)



Fonte: Autora.

A massa específica das fibras foi adotada como a massa específica da fibra de acetato de celulose, de $1,30 \text{ g/cm}^3$, para cálculo das formulações.

3.2 Planejamento Experimental

O planejamento adotado objetiva estudar os efeitos de duas variáveis de influência, analisando as possíveis combinações dos níveis de cada variável investigada. Portanto, foi escolhido o planejamento fatorial, que é o mais indicado dentre os planejamentos experimentais disponíveis na literatura para este tipo de análise (CUNICO, et al., 2008).

As variáveis de influência escolhidas foram o teor de fibra e idade de ensaio, sendo que cada uma delas apresenta um valor mínimo e máximo, respectivamente, de 0% e 3,0% para o teor de fibra e 1 e 14 dias para a idade de ensaio. Além disso, para uma melhor análise, foram estudados também os níveis centrais das variáveis, sendo de 1,5% de fibra e idade de ensaio de 7 dias, com 3 repetições para um resultado mais confiável.

Para o experimento fatorial de 2^k adotado foi utilizado dois níveis (-1 e 1), ponto central (0) e duas variáveis independentes (A e B), já citadas. Na tabela 1 é apresentada a codificação dessas variáveis, e na Tabela 2, a codificação e descodificação delas para cada experimento realizado.

Tabela 1: Codificação das variáveis do planejamento 2^k

Codificação	A	B
	Fibras de acetato de celulose (%)	Idade de ensaio (dias)
-1	0,0	1
0	1,5	7
1	3,0	14

Fonte: Autora.

Tabela 2: Codificação e Descodificação das variáveis para cada experimento.

Experimentos	Codificação		Descodificação	
	A	B	Fibras (%)	Idade (dias)
1	-1,00	-1,00	0,0	1
2	1,00	-1,00	3,0	1
3	-1,00	1,00	0,0	14
4	1,00	1,00	3,0	14
5	0,00	0,00	1,5	7
6	0,00	0,00	1,5	7
7	0,00	0,00	1,5	7

Fonte: Autora.

O planejamento fatorial e o software de análise *Statistica 7.0* utilizados permitiram a análise da influência dos teores de fibra nos resultados dos ensaios. Foi pensando nesta análise que o valor mínimo foi definido em 0% de fibra, para que seja possível a comparação da matriz com o compósito, ao mesmo tempo que também será comparado a influência de diferentes teores entre os compósitos e em relação à matriz geopolimérica.

3.3 Produção do Geopolímero

O cálculo das formulações dos geopolímeros foi feito com embasamento nas relações ótimas encontradas por Alves (2018), como já mencionado. Essas relações se encontram descritas na Tabela 3, e através delas as proporções de cada constituinte foram calculadas, com a inserção de fibras.

Tabela 3: Relações otimizadas de Alves (2018) utilizadas nas formulações.

Ativadores/ Aglomerante	Água/ Metacaulim	Molaridade do NaOH [M]	Molaridade do Na ₂ SiO ₃ [M]	Silicato/ Hidróxido	Proporção mássica [NaOH:Na ₂ SiO ₃]
0,597	0,7	15	12	2,5	2,5 : 1,0

Fonte: Autora.

O processo de produção do geopolímero iniciou-se com a pesagem de todos os materiais a serem utilizados para a formulação. Em seguida, foram dissolvidos em água o hidróxido e o silicato para atingir as molaridades ótimas de 15 e 12 M, respectivamente. Eles foram dissolvidos separadamente e depois misturados para a obtenção da solução ativadora. O tempo de espera entre a dissolução do hidróxido e do silicato e a mistura dos dois foi de cerca de 1 hora, para redução da temperatura das soluções.

O preparo das fibras consistiu em dispersá-las no liquidificador industrial. Elas foram batidas juntamente com parte da água da mistura, para um melhor resultado, por aproximadamente 30 segundos. Testes preliminares com o resíduo mostraram que as fibras não se dispersaram totalmente se fosse usado o resíduo tal como recebido (Figura 4). Portanto, os pedaços de filtro (resíduos) foram cortados apenas com o intuito de se obter uma melhor dispersão. Todo esse processo está apresentado na Figura 5. As fibras dispersas apresentam-se como uma manta, em que não se identifica as fibras com comprimentos bem definidos, como pode ser observado na Figura 5d.

Figura 5: Processo de preparo e dispersão das fibras.



Fonte: Autora.

Após a dispersão das fibras, a solução ativadora foi adicionada ao metacaulim e, após uma espera de 30 minutos para resfriamento foi homogeneizada manualmente por cerca de 2

minutos. Depois disso, as fibras foram acrescentadas à mistura que, novamente, foi homogeneizada manualmente por aproximadamente 2 minutos. Por fim, a mistura incluindo todos os componentes da mistura foi homogeneizada com o uso de um misturador mecânico por cerca de 5 minutos.

O traço com teor de 0% de fibra foi feito seguindo os mesmos procedimentos, porém, sem a adição de fibra. Com o compósito pronto, foram moldados os corpos de prova, sendo eles placas e cubos, o primeiro para o ensaio de flexão e o segundo para os ensaios de compressão e absorção.

Foram utilizadas formas metálicas para os cubos. Além disso, eles foram adensados manualmente na mesa de adensamento por queda, onde foram aplicados 30 golpes para uma camada única. As placas foram moldadas em fôrmas de silicone, para um aprimoramento do processo de moldagem (ALVES, 2018).

Na Figura 6 são apresentados os corpos de prova moldados, identificados e embalados com filme plástico, para uma menor perda de umidade para o ambiente. Logo depois, foram colocados na sala de cura, onde ficaram até atingirem a idade de ensaio.

Figura 6: Corpos de prova moldados e embalados.



Fonte: Autora.

3.4 Ensaios

3.4.1 Ensaio de Compressão

O ensaio de compressão foi realizado na Máquina Universal de Ensaio Instron 5982, com célula de carga de 5kN, como se observa na Figura 7, com o eixo central da amostra coincidindo com o eixo central da máquina. Para o ensaio, os corpos de prova foram desmoldados nos seus respectivos dias de ensaio, com exceção dos corpos de prova que foram ensaiados com 14 dias. No caso das amostras com 14 dias de idade, elas foram desmoldadas 4 dias após sua produção e colocadas na sala de cura, embaladas com plástico filme, até o dia do ensaio. Os corpos de prova foram medidos com um parquímetro digital de precisão 0,01 mm. Foram tiradas duas medidas de cada lado do cubo e feita a média dessas medidas.

Figura 7: Amostra posicionada para o Ensaio de Compressão.



Fonte: Autora.

Com o ensaio de compressão determinou-se a tensão de compressão máxima que cada corpo de prova suportou, a média das tensões máximas, por experimento, e os gráficos de tensão x deformação.

3.4.2 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão foi feito utilizando o mesmo método de Alves (2018), recomendado por Rilem (1989), que é o ensaio de flexão a quatro pontos, que consiste em gerar um momento constante entre os pontos de carga por meio da aplicação de carga em dois pontos do corpo de prova. Também foi utilizada a Máquina Universal de Ensaio da marca Instron, modelo 5982, com célula de carga de 5kN.

Através do ensaio, e com a utilização das fórmulas detalhadas a seguir foram calculados o módulo de ruptura dos corpos de prova para cada experimento realizado (Equação 01), além

da tenacidade das amostras (Equação 02) e módulo de elasticidade. As equações utilizadas foram formuladas com base no ensaio de flexão a quatro pontos.

$$M.R = \frac{F_{\text{máx}} \times L}{b \times e^2} \text{ [MPa]} \quad (01)$$

$$E = \frac{23 \cdot L^3}{1296 I} \left(\frac{F}{\delta} \right) \text{ [MPa]} \quad (02)$$

Onde:

M.R é o módulo de ruptura

$F_{\text{máx}}$ é a carga máxima suportada pelos corpos de prova durante o ensaio [N];

L é a distância adotada entre os apoios inferiores, de 150 [mm];

b é a largura do corpo de prova [mm];

e é a espessura do corpo de prova [mm].

E = módulo de elasticidade (MPa);

I = momento de inércia da seção transversal $\rightarrow \frac{be^3}{12}$ (mm⁴);

F/δ = coeficiente angular da reta obtida da curva F x δ (Força x Flecha) no trecho elástico (N/mm).

A tenacidade (energia específica) do compósito foi obtida pela energia de fratura expressa em kJ/m². Determinou-se a energia específica através da integração da área sob a curva Força x Flecha resultante do ensaio de flexão, até o ponto de flecha máxima (final do ensaio), dividida pela área da seção transversal dos corpos-de-prova. A largura e espessura dos corpos de prova foram determinadas com a média de três medidas obtidas com um parquímetro digital de precisão de 0,01mm.

3.4.3 Ensaio de absorção

O ensaio de absorção foi feito seguindo a norma NBR 9778 (ABNT, 2009), a qual padroniza o modo que esse ensaio deve ser executado para determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios. Porém, só os dois últimos serão definidos nesse trabalho.

Para o ensaio, foram utilizados 3 cubos por experimento. Em suma, os corpos de prova que atingiam sua idade de ensaio eram desmoldados e pesados em uma balança hidrostática, a

qual foi utilizada durante todo o ensaio, para determinação da massa da amostra ao ar. Logo depois, as amostras foram mantidas em estufa à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 72 horas. Após esse tempo, eles eram retirados da estufa e sua massa seca era determinada.

Completada a secagem em estufa, as amostras foram imersas em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, durante 72 horas. A pesagem após a imersão foi realizada de duas maneiras distintas, sendo a primeira com as amostras saturadas e imersas em água, e na subsequente, a superfície das amostras eram secas com toalha absorvente anteriormente à pesagem.

Por fim, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio de água que foi progressivamente levado à ebulição, a qual se manteve por 5 horas. O resfriamento ocorreu de forma natural, e após atingir a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, as amostras foram pesadas das duas maneiras explicadas anteriormente (superfície seca e imersas em água).

Realizado o ensaio, foi possível calcular a absorção de água após imersão e fervura e índice de vazios após saturação e fervura, ambos em porcentagem, a partir das equações 03 e 04, respectivamente:

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad [\%] \quad (03)$$

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100 \quad [\%] \quad (04)$$

Onde:

M_{sat} é a massa, em g, da amostra com superfície seca, após saturação e fervura;

M_s é a massa, em g, da amostra seca em estufa;

M_i é a massa, em g, da amostra imersa em água, após saturação e fervura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

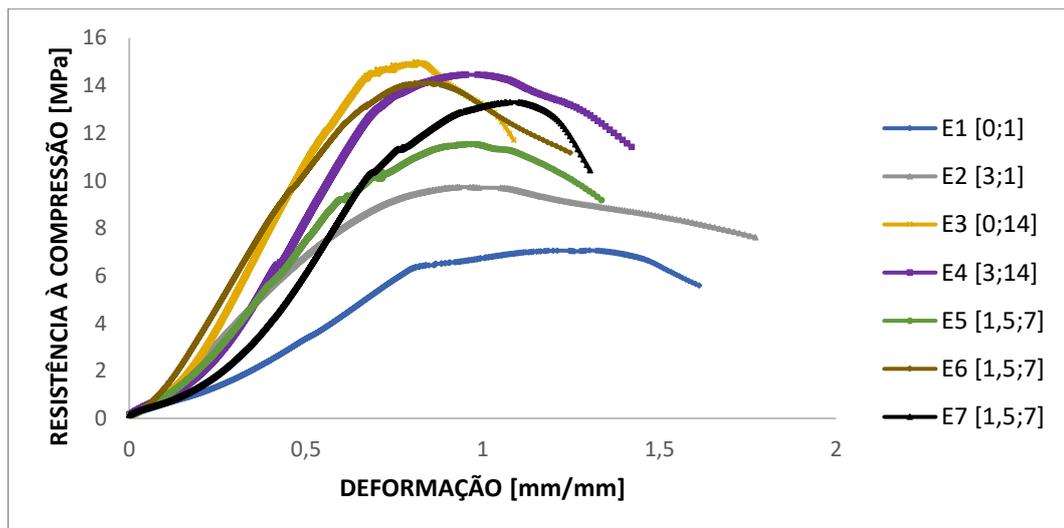
Os resultados e discussões apresentados para cada propriedade analisada são apresentados para cada experimento, identificados como E(N) [t; i], sendo N o número do experimento, t o teor de fibras e i a idade de ensaio.

4.1 Ensaio de Compressão

4.1.1 Resistência à Compressão

Na Figura 8 é possível observar as curvas típicas obtidas nos ensaios de compressão dos corpos de prova, sendo que cada curva corresponde a um experimento.

Figura 8: Curvas típicas dos compósitos obtidas nos ensaios de compressão.



Fonte: Autora.

Pela sobreposição das curvas dos experimentos, pode-se perceber o melhor desempenho do Experimento 2, em reação ao Experimento 1, sendo que ambos foram ensaiados com 1 dia de idade, entretanto, o primeiro experimento se refere à matriz geopolimérica, enquanto o segundo se refere ao compósito, com adição de 3% de fibras.

Ainda observando o gráfico, percebe-se que as curvas dos Experimentos 3 e 4 não apresentam o mesmo comportamento citado anteriormente, mesmo correspondendo à matriz e compósito. Isso se deve à idade de ensaio de 14 dias, ou seja, nessa idade, a matriz ganhou resistência e a fibra não incrementa mais a resistência à compressão do compósito.

Em relação aos Experimentos centrais 5, 6 e 7, com 1,5% de fibra e 7 dias de idade, percebe-se um aumento de resistência em relação às curvas de idade menor. Além disso, as curvas desses experimentos se aproximam bastante das curvas de maior idade (14 dias).

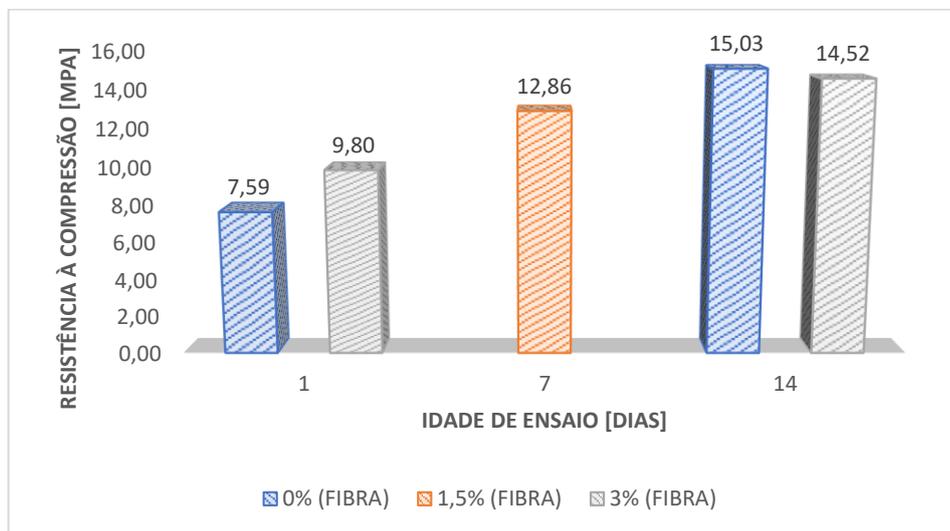
Os resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio se encontram na Tabela 4, que contém as médias e desvios padrão para cada experimento. Além da tabela, na Figura 9, se encontra um gráfico de barras, criado para uma melhor visualização desses resultados.

Tabela 4: Resultados do Ensaio de Compressão.

Experimentos	Teor de Fibras (%)	Idade de Ensaio (dias)	Tensão de Compressão [MPa]	
			Média	Desvio Padrão
1	0,0	1	7,59	1,32
2	3,0	1	9,80	0,48
3	0,0	14	15,03	1,07
4	3,0	14	14,52	0,82
5	1,5	7	11,00	1,63
6	1,5	7	14,80	1,11
7	1,5	7	12,79	0,51

Fonte: Autora.

Figura 9: Resistência à Compressão dos compósitos estudados.



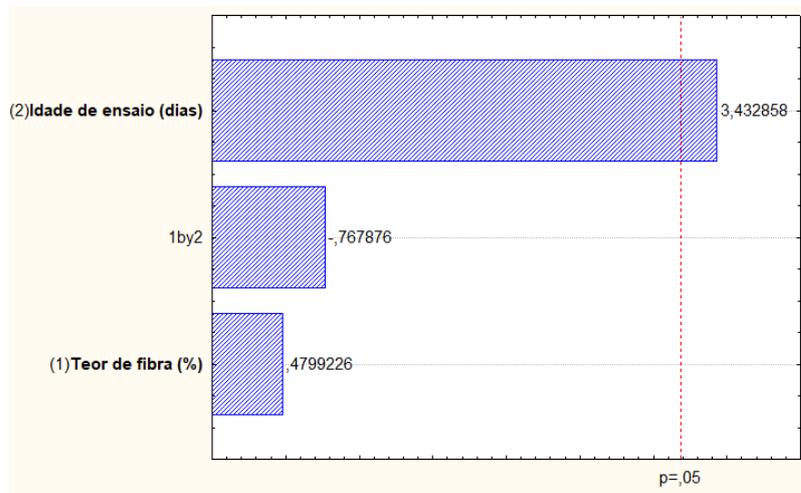
Fonte: Autora.

Pelos resultados da Tabela 4 e a visualização dos mesmos no gráfico de barra da Figura 9, percebe-se o mesmo comportamento visto no gráfico de tensão x deformação. Notou-se o aumento da resistência à compressão do segundo experimento (3% de fibra e 1 dia de ensaio)

em relação ao primeiro, ou seja, com a inserção das fibras, e dos compósitos centrais em relação à matriz. E nos experimentos ensaiados com 14 dias, não se percebe variação entre as médias.

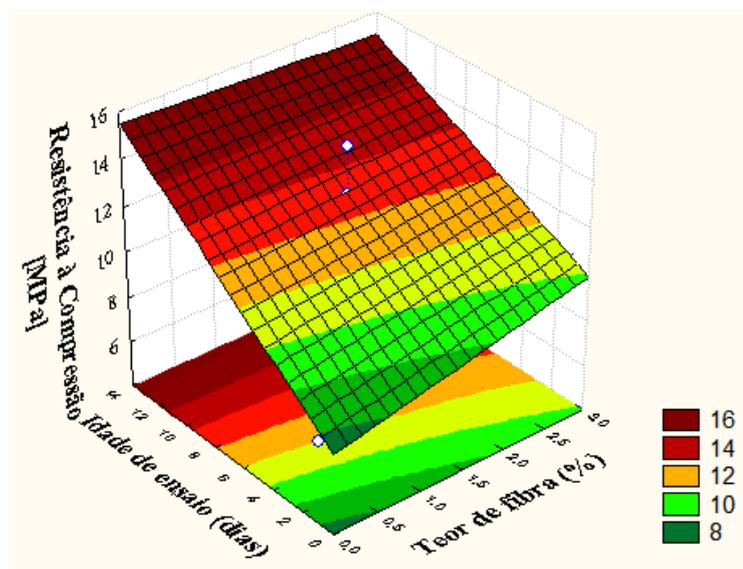
Uma análise de influência das variáveis foi feita com a utilização do software *Statistica 7.0*, que através de regressão linear e da distribuição t de Student, fornece o gráfico de Pareto (Figura 10), que mostra a significância das variáveis independentes analisadas, e a superfície de resposta (Figura 11), que relaciona a influência dessas variáveis com o resultado analisado, nesse caso, a tensão máxima de compressão. O coeficiente de determinação da regressão determinado pelo software foi de 0,81.

Figura 10: Gráfico de Pareto da Resistência à Compressão.



Fonte: Autora.

Figura 11: Superfície de Resposta da Resistência à Compressão.



Fonte: Autora.

Pelo gráfico de Pareto, pode-se analisar que a idade de ensaio é a única variável significativa para a resistência à compressão, enquanto o teor de fibra não se mostra tão significativo, isso ocorre pelo fato da fibra não incrementar a resistência à compressão da matriz com idades superiores. Porém, nas primeiras idades a matriz tem menor resistência, portanto, os teores de fibra estudados e as propriedades das fibras incrementam a resistência à compressão. A interação teor de fibra/idade de ensaio inclusive se mostra mais significativa do que a variável teor, já que os experimentos centrais tiveram resultados de resistência próximos dos experimentos com maior idade de ensaio.

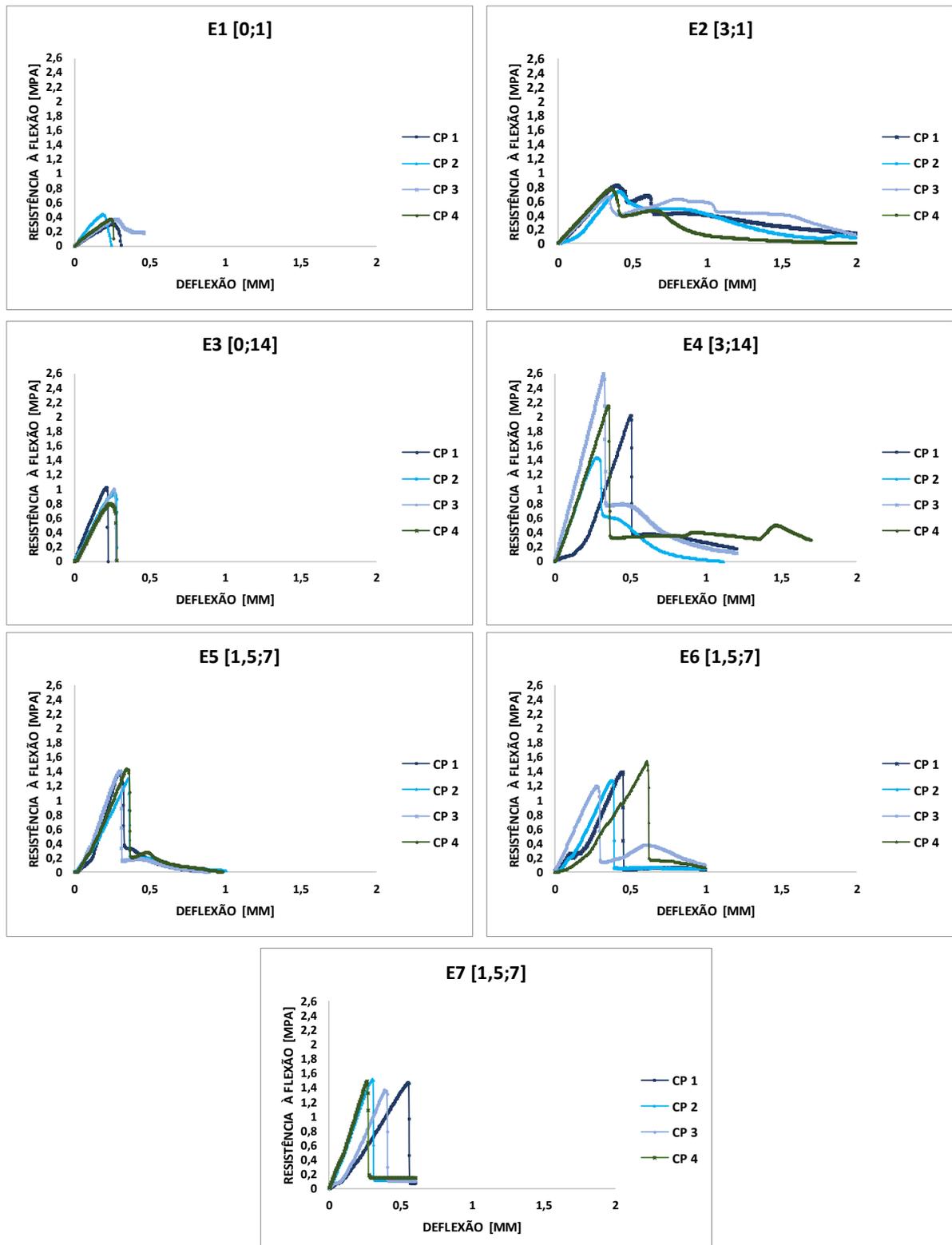
A superfície de resposta permite visualizar a influência das variáveis teor de fibras e idade na resistência à compressão das amostras analisadas. Percebe-se, como já apontado pelo gráfico de Pareto, a influência bem maior da idade de ensaio em comparação com o teor de fibras. Além disso, também fica claro que o teor de fibra tem influência na resistência à compressão, embora pouca, nas menores idades de ensaio.

4.2 Ensaio de Flexão

4.2.1 Módulo de Ruptura

O ensaio de flexão forneceu os valores de carga e deflexão das amostras de cada experimento. Dessa forma, foram calculadas as tensões em cada intervalo de tempo do ensaio, através das cargas e da Equação 01, formulada de acordo com o ensaio de flexão a quatro pontos. Com as tensões calculadas, foram elaborados os gráficos de tensão x deformação apresentados na Figura 12.

Figura 12: Gráficos Resistência x Deflexão do Ensaio de Flexão.



Fonte: Autora.

Através da observação dos gráficos, é possível perceber o aumento do módulo de ruptura à medida que se aumenta a idade de ensaio. Além disso, percebe-se um aumento desse

módulo nos compósitos, em comparação com a matriz (Experimento 1), nos mesmos dias de ensaio.

Ademais, pode-se observar que os gráficos dos compósitos apresentam uma continuação maior após o primeiro pico do gráfico, por conta das fibras que, mesmo após a ruptura da matriz, continuam absorvendo tensão. Isso acontece porque após a ruptura da matriz (primeiro pico) as tensões são transferidas da matriz para as fibras. Como os teores estudados foram baixos, observa-se uma queda da tensão, mas mesmo assim as fibras continuam absorvendo deformação, dando maior tenacidade ao compósito.

Pelos gráficos é possível perceber também que os teores de fibras foram baixos, não sendo suficientes para causar a manutenção da resistência após a ruptura da matriz, observando-se, na verdade, a queda brusca da tensão na região pós-pico.

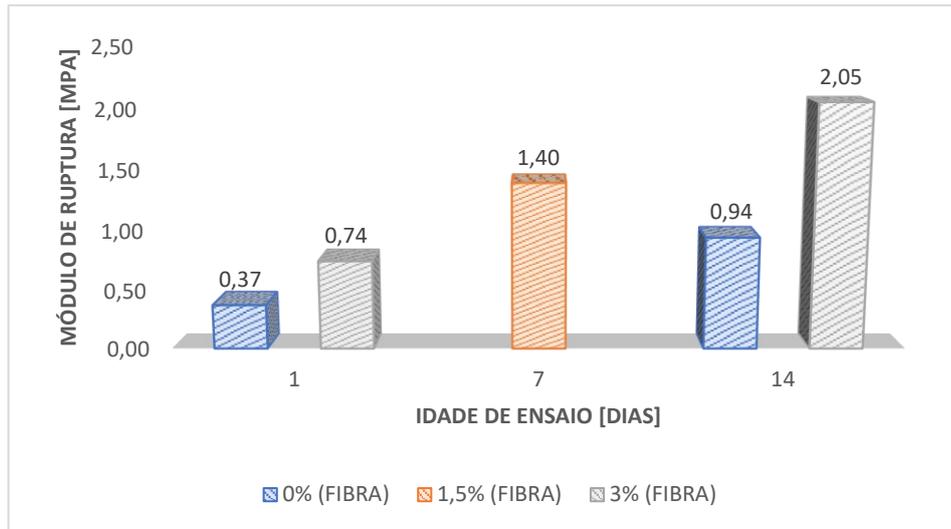
Na Tabela 5 encontram-se os valores médios calculados do módulo de ruptura para cada experimento, além de seus respectivos desvios padrão. E na Figura 13 pode-se visualizar de uma forma mais clara o comportamento desses valores, pelo gráfico de barras desses módulos.

Tabela 5: Resultados do Módulo de Ruptura do Ensaio de Flexão.

Experimentos	Teor de Fibras (%)	Idade de Ensaio (dias)	Módulo de Ruptura [MPa]	
			Média	Desvio Padrão
1	0,0	1	0,37	0,05
2	3,0	1	0,74	0,06
3	0,0	14	0,94	0,09
4	3,0	14	2,05	0,41
5	1,5	7	1,38	0,05
6	1,5	7	1,35	0,13
7	1,5	7	1,46	0,06

Fonte: Autora.

Figura 13: Gráfico de barras do Módulo de Ruptura.

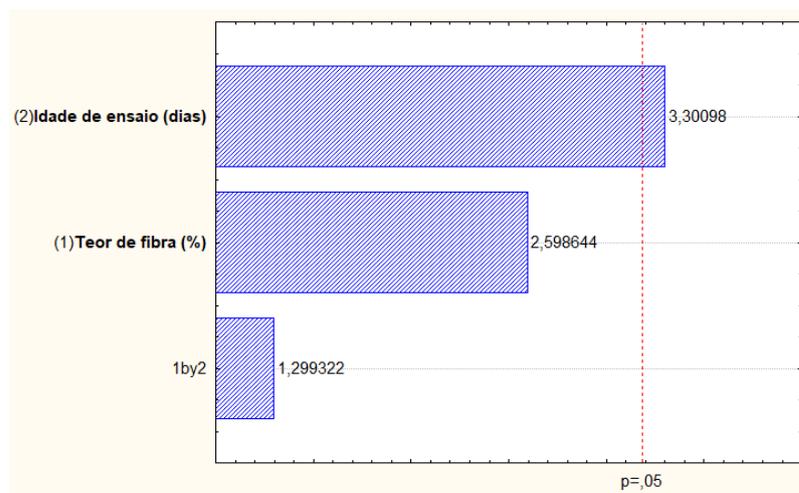


Fonte: Autora.

A tabela e o gráfico de barras mostram de forma mais visível o que os gráficos de tensão x deflexão já haviam apontado, de que a idade de ensaio tem grande influência no aumento do módulo de ruptura, e a adição de fibra também influencia quando comparam-se os compósitos com a matriz. Observa-se também que quando a comparação é entre compósitos (1,5% e 3,0%), considerando os teores e idades, tem-se um aumento do módulo, mesmo que menor do que o da comparação com a matriz.

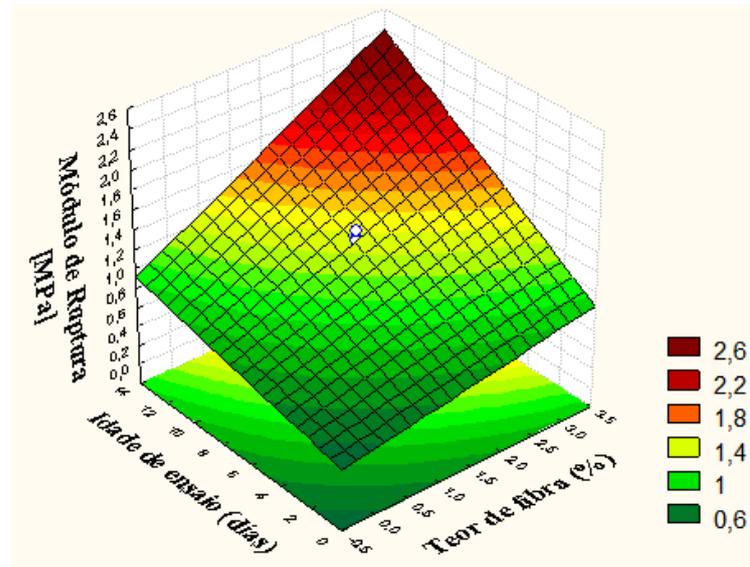
Para uma análise mais confiável da influência dessas variáveis no resultado, assim como seu comportamento, é apresentado o gráfico de Pareto do módulo de ruptura, e a superfície de resposta nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14: Gráfico de Pareto do Módulo de Ruptura.



Fonte: Autora.

Figura 15: Superfície de resposta do Módulo de Ruptura.



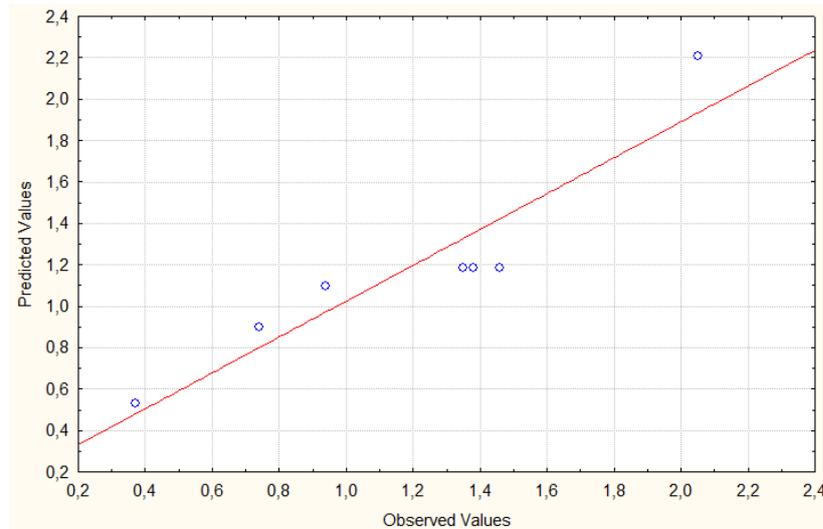
Fonte: Autora.

Pelo gráfico de Pareto percebe-se que a única variável que tem influência significativa é a idade de ensaio. Porém, a variável de teor de fibra chega bem próxima da linha do nível de significância (linha pontilhada vermelha). Além disso, verifica-se pela superfície de resposta que o crescimento de ambas variáveis resultam em aumento do módulo de ruptura.

Observa-se, pela superfície de resposta, que houve um aumento considerável do módulo de ruptura para altos teores de fibra, de 3%, e idade de ensaio elevada, de 14 dias. Mas quando a superfície é analisada em relação às variáveis separadamente, seu acentuamento é nitidamente menor.

Para confirmar a confiabilidade do modelo de regressão linear gerado pelo *software*, foi gerado o gráfico de valores preditos versus observados, que se encontra na Figura 16. Além do gráfico, o valor do coeficiente de determinação da regressão gerada (R^2), também obtido pelo programa, é de 0,87.

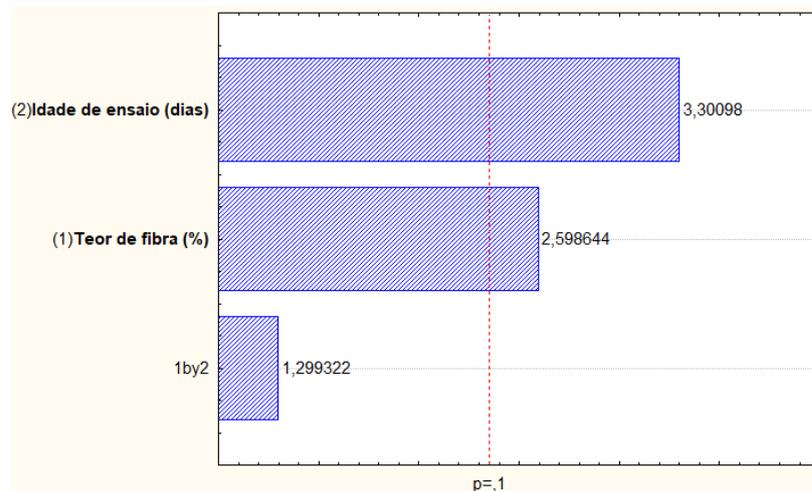
Figura 16: Gráfico de Valores Preditos x Observados do Módulo de Ruptura.



Fonte: Autora.

Dessa forma, compreende-se que o modelo pode ser considerado confiável, já que os valores observados estão próximos da linha de regressão. Porém, o modelo apenas explica 87% dos dados de resposta ao redor da sua média. Por isso, uma segunda análise foi feita, alterando-se o nível de significância de 5% para 10%, que foi o nível de significância utilizado no trabalho de Alves (2018), que também analisou a matriz geopolimérica com inserção de fibras.

Figura 17: Gráfico de Pareto do Módulo de Ruptura com nível de significância de 10%.



Fonte: Autora.

A Figura 17 mostra o gráfico de Pareto modificado dessa segunda análise. Alterando o nível de significância, tem-se que ambas as variáveis são significativas, já que as duas têm influência no resultado. A alteração foi feita com o intuito de mostrar que a influência da variável de teor só não foi considerada significativa na primeira análise por conta do nível de

significância analisado. Não foi gerada a superfície de resposta novamente pois ela não muda com a alteração do nível de significância.

4.2.2 Módulo de Elasticidade

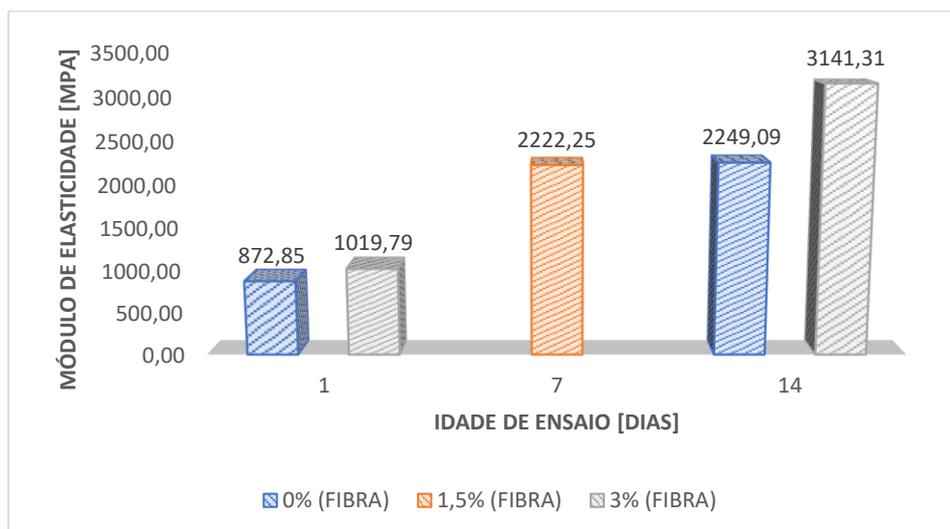
Os módulos de elasticidade médios para cada experimento, e o desvio padrão de cada um, encontram-se na Tabela 6, enquanto que, na Figura 18, encontra-se o gráfico de barras para uma observação mais clara dos resultados.

Tabela 6: Resultados do Módulo de Elasticidade.

Experimentos	Teor de Fibras (%)	Idade de Ensaio (dias)	Módulo de Elasticidade [MPa]	
			Média	Desvio Padrão
1	0,0	1	872,85	187,04
2	3,0	1	1019,79	89,47
3	0,0	14	2249,09	299,75
4	3,0	14	3141,31	503,61
5	1,5	7	2112,49	498,55
6	1,5	7	2124,74	210,23
7	1,5	7	2429,54	524,47

Fonte: Autora.

Figura 18: Gráfico de barra do Módulo de Elasticidade.

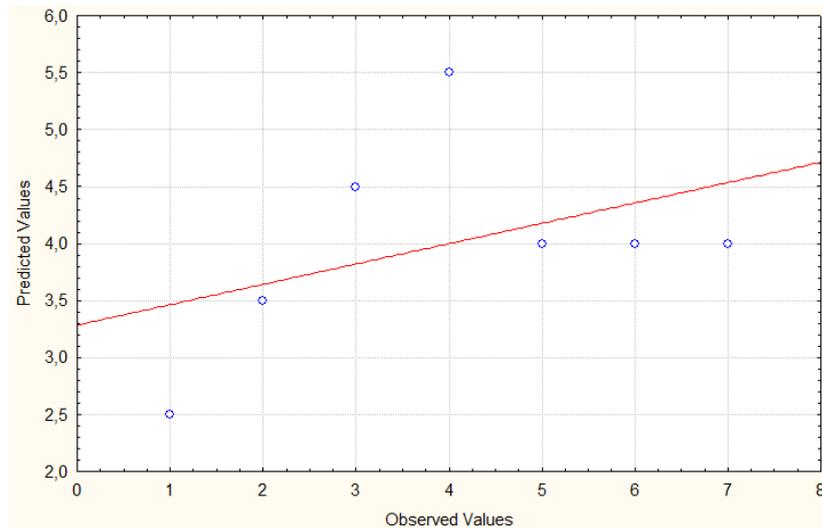


Fonte: Autora.

Infere-se da tabela e do gráfico que o módulo de elasticidade aumenta com a idade de ensaio e com o teor de fibras. Para uma análise mais confiável da influência de cada uma das variáveis foi feita a análise por regressão linear no *software Statistica*. Entretanto, o coeficiente

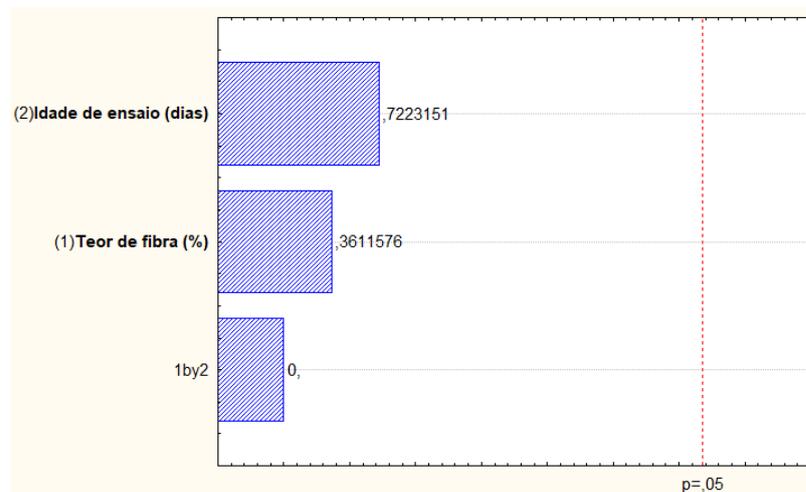
de determinação da regressão linear gerada (R^2) foi de 0,18. O gráfico de valores preditos e observados se encontra na Figura 19, e o gráfico de Pareto na Figura 20.

Figura 19: Gráfico de valores preditos versus observados do Módulo de Elasticidade.



Fonte: Autora.

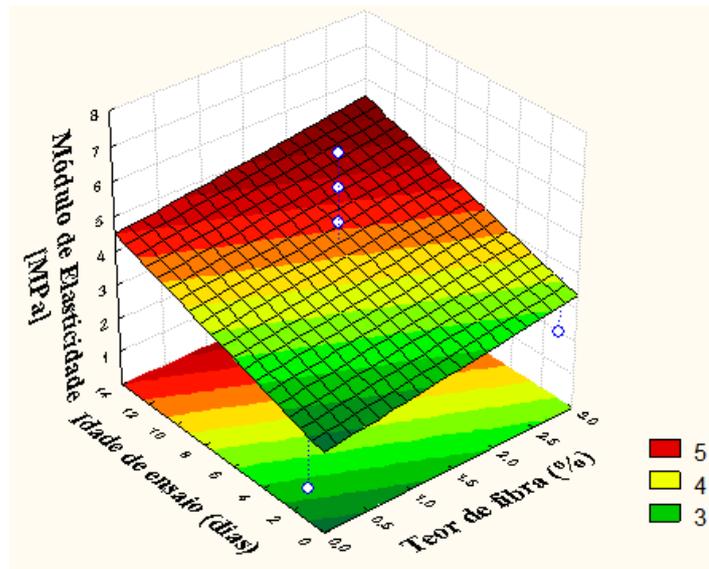
Figura 20: Gráfico de Pareto do Módulo de Elasticidade.



Fonte: Autora.

Portanto, observando os gráficos e levando em conta que a regressão gerada explica apenas 18% dos dados em relação à média, não foi considerada confiável a análise do gráfico de Pareto de que nenhuma das variáveis seja significativa. Porém, a superfície de resposta, mostrada na Figura 21, foi considerada já que ela apenas mostra a influência das variáveis nos resultados, a qual coincide com a análise dos dados da tabela e gráfico de barras.

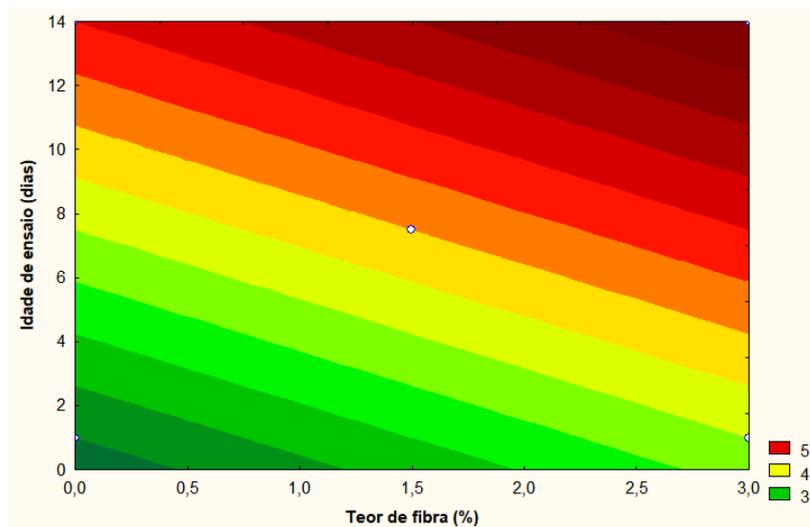
Figura 21: Superfície de Resposta do Módulo de Elasticidade.



Fonte: Autora.

Dito isso, a análise do módulo de elasticidade se deu apenas à análise visual dos dados, pela tabela, gráfico de barras e superfície de resposta, através dos quais vê-se o aumento desse módulo com o aumento das duas variáveis. Para uma melhor noção da influência de cada variável foi gerada a curva de contorno, que se encontra na Figura 22.

Figura 22: Curva de Contorno do Módulo de Elasticidade.



Fonte: Autora.

Pela observação da curva de contorno, pode-se dizer que a variável de idade de ensaio influencia mais o módulo quando comparada ao teor de fibra, como também se percebe no gráfico de Pareto, embora ele não tenha sido considerado confiável.

4.2.3 Tenacidade

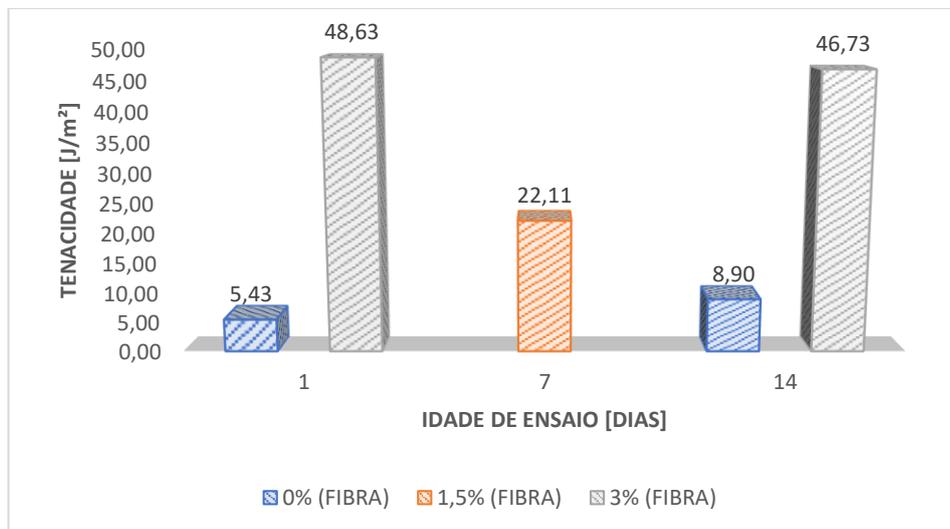
Os valores médios da tenacidade para cada experimento encontram-se na Tabela 7. O gráfico de barras desses resultados encontra-se na Figura 23.

Tabela 7: Resultados de Tenacidade pelo Ensaio de Flexão.

Experimentos	Teor de Fibras (%)	Idade de Ensaio (dias)	Tenacidade [J/m^2]	
			Média	Desvio Padrão
1	0,0	1	5,43	1,05
2	3,0	1	48,63	11,82
3	0,0	14	8,90	0,82
4	3,0	14	46,73	9,66
5	1,5	7	24,88	2,91
6	1,5	7	22,35	3,59
7	1,5	7	19,09	3,01

Fonte: Autora.

Figura 23: Gráfico de barra da Tenacidade.

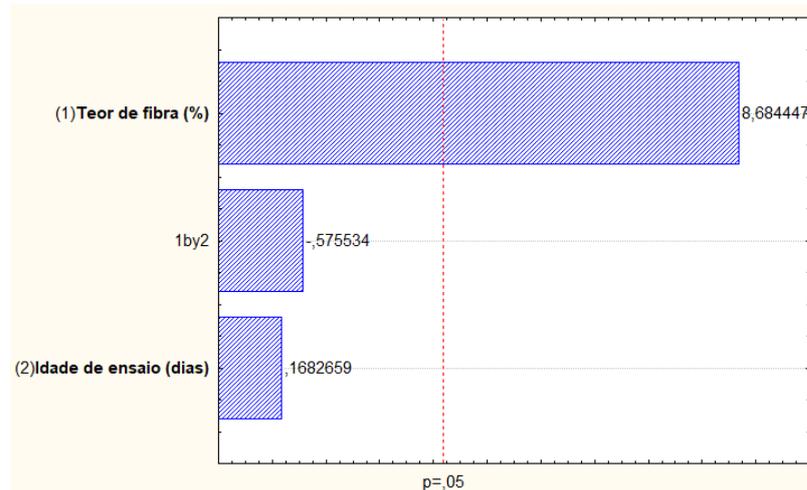


Fonte: Autora.

Pelo gráfico de barras e a tabela com os resultados percebe-se a grande influência do teor de fibras na tenacidade, como já esperado, por conta dos gráficos de flexão dos compósitos, que têm uma “cauda”, aumentando assim, a área sob a curva. Na comparação entre matrizes vê-se um aumento em relação à idade de ensaio, embora seja pequeno.

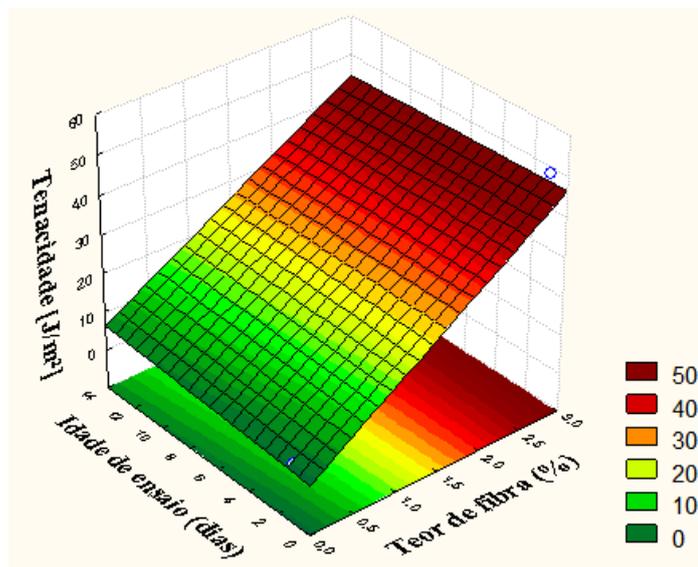
Na análise pelo *software*, o coeficiente de determinação da regressão (R^2) foi de 0,96, portanto, o modelo se ajusta bem aos dados. O gráfico de Pareto e a superfície de resposta gerados se encontram nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

Figura 24: Gráfico de Pareto da Tenacidade.



Fonte: Autora.

Figura 25: Superfície de Resposta da Tenacidade.



Fonte: Autora.

Como esperado, a variável significante foi a de teor de fibra, com um valor de t acima do tabelado, como se observa no gráfico de Pareto, e a que mais influenciou a tenacidade também, como se vê na superfície de resposta. Enquanto isso, a variável de idade de ensaio não se mostrou significativa ou tão influente para os valores de tenacidade.

4.3 Ensaio de Absorção

4.3.1 Índice de vazios

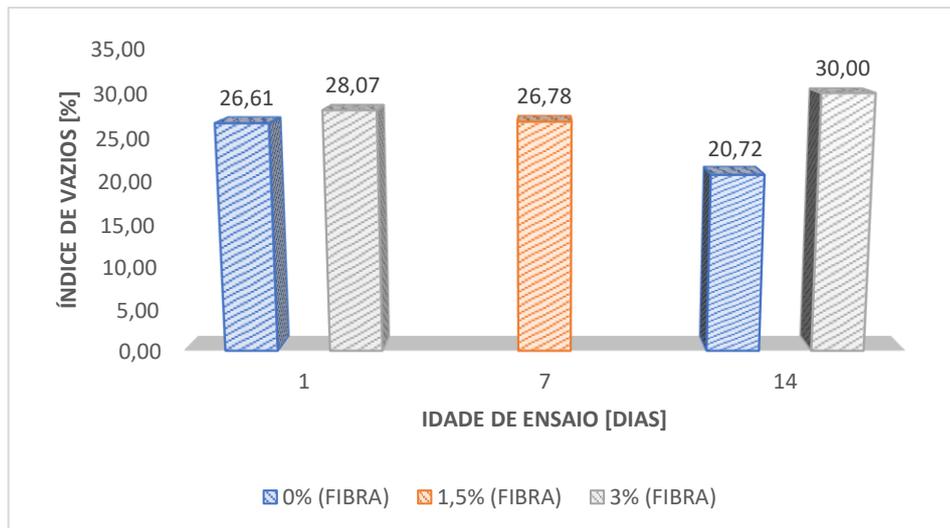
Por meio do ensaio de absorção foi calculado o índice de vazios, que relaciona o volume de poros permeáveis com o volume total, calculado pela Equação 04. O resultado médio de cada experimento, assim como o desvio padrão, encontram-se na Tabela 8. Para uma melhor e mais clara visualização dos resultados foi elaborado um gráfico de barras, que se encontra na Figura 26.

Tabela 8: Resultados do Índice de Vazios do Ensaio de Absorção.

Experimentos	Teor de Fibras (%)	Idade de Ensaio (dias)	Índice de Vazios [%]	
			Média	Desvio Padrão
1	0,0	1	26,61	0,31
2	3,0	1	28,07	0,55
3	0,0	14	20,72	0,36
4	3,0	14	30,00	0,31
5	1,5	7	26,79	0,25
6	1,5	7	26,47	0,08
7	1,5	7	27,07	0,70

Fonte: Autora.

Figura 26: Gráfico de barras do Índice de Vazios.



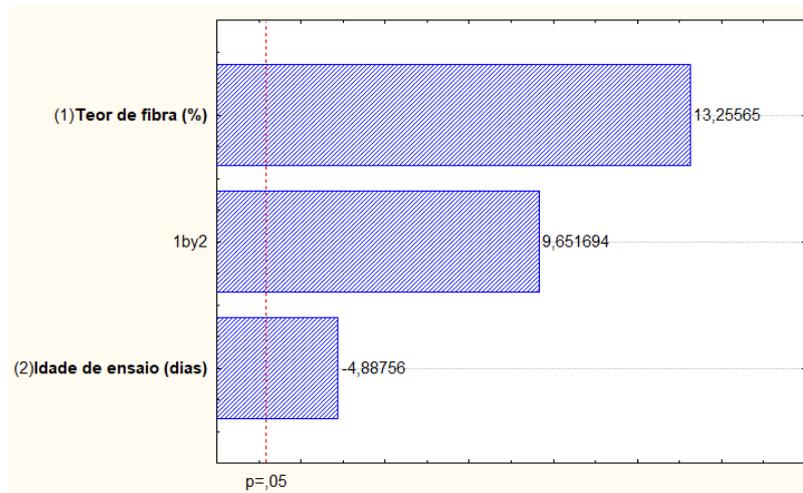
Fonte: Autora.

Pela tabela e gráficos de barras, nota-se que o índice de vazios dos compósitos aumenta em comparação com a matriz geopolimérica. Além disso, quando analisam-se as matrizes com diferentes idades de ensaio, vê-se que o índice de vazios se comporta de maneira decrescente,

enquanto para os compósitos, esse comportamento não varia significativamente com a idade de ensaio.

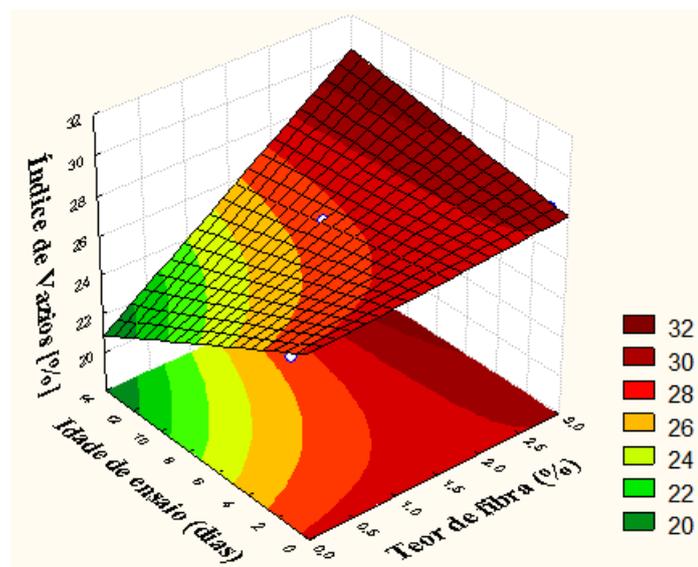
Para uma melhor compreensão da influência e significância de cada variável no índice de vazios, foi feita uma análise por regressão linear com o *software* utilizado. O coeficiente de determinação da regressão obtido foi de 0,99. O gráfico de Pareto e a Superfície de Resposta gerados encontram-se nas Figuras 27 e 28.

Figura 27: Gráfico de Pareto do Índice de Vazios.



Fonte: Autora.

Figura 28: Superfície de Resposta do Índice de Vazios.



Fonte: Autora.

Pelo gráfico de Pareto é possível afirmar que ambas as variáveis são significativas para o índice de vazios, assim como a interação entre teor/idade que se mostrou mais significativa

do que a idade de ensaio em si, o que é confirmado pela análise da superfície de resposta, na qual pode-se observar a influência positiva do teor de fibra, e da interação teor/idade, enquanto a idade de ensaio influencia de maneira decrescente o índice de vazios, o que também se percebe pelo gráfico de Pareto, pois o valor de t é negativo para esta variável.

4.3.2 Absorção de água

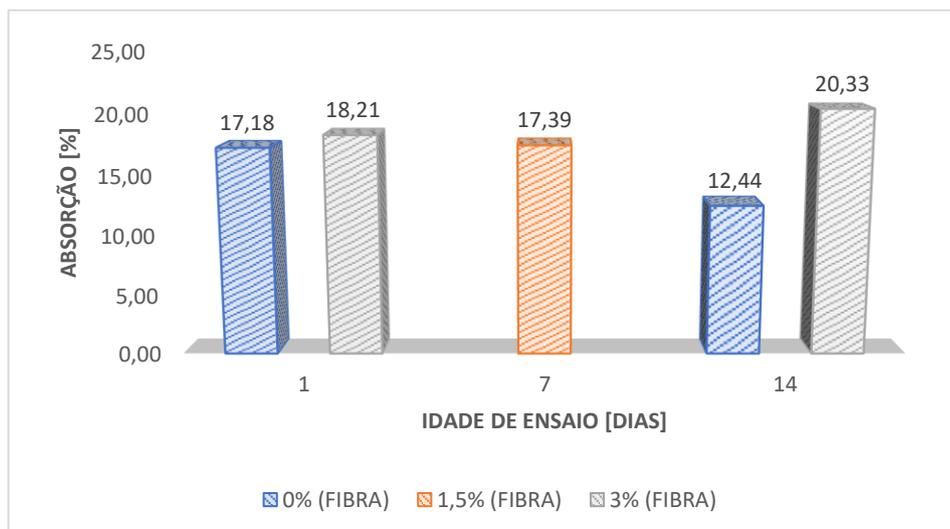
Na Tabela 9, observa-se o resultado médio da absorção de cada experimento, assim como o desvio padrão, enquanto na Figura 29 se encontra o gráfico de barras desses resultados.

Tabela 9: Resultados da Absorção de água.

Experimentos	Teor de Fibras (%)	Idade de Ensaio (dias)	Absorção [%]	
			Média	Desvio Padrão
1	0,0	1	17,18	0,09
2	3,0	1	18,21	0,50
3	0,0	14	12,44	0,12
4	3,0	14	20,33	0,27
5	1,5	7	17,48	0,34
6	1,5	7	17,11	0,09
7	1,5	7	17,58	0,24

Fonte: Autora.

Figura 29: Gráfico de barras da Absorção.



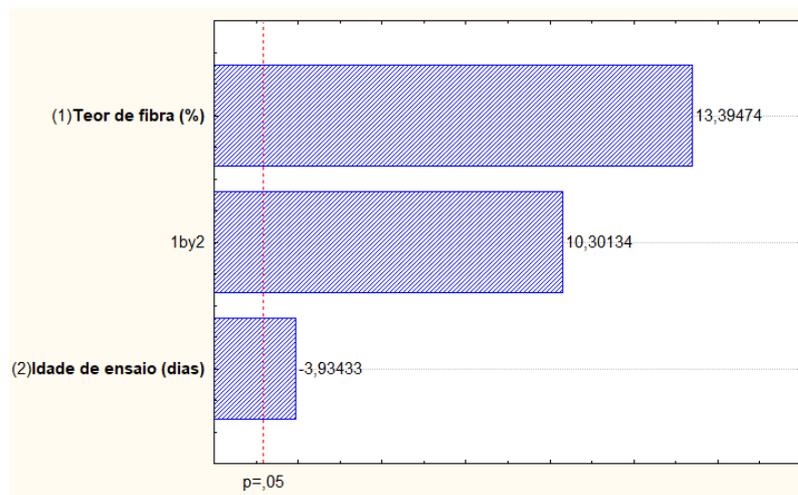
Fonte: Autora.

Pelos resultados e o gráfico de barras observa-se um aumento da absorção de água dos compósitos, quando comparados à matriz, o que é esperado pela adição de fibras. A absorção

das matrizes decresce com o aumento da idade, o que também era esperado. Em relação aos teores de fibra, o teor médio de fibra apresenta menor absorção em relação ao teor máximo, mesmo com uma idade de ensaio menor, confirmando que o aumento do teor de fibras aumenta a porosidade dos compósitos, elevando também a absorção de água.

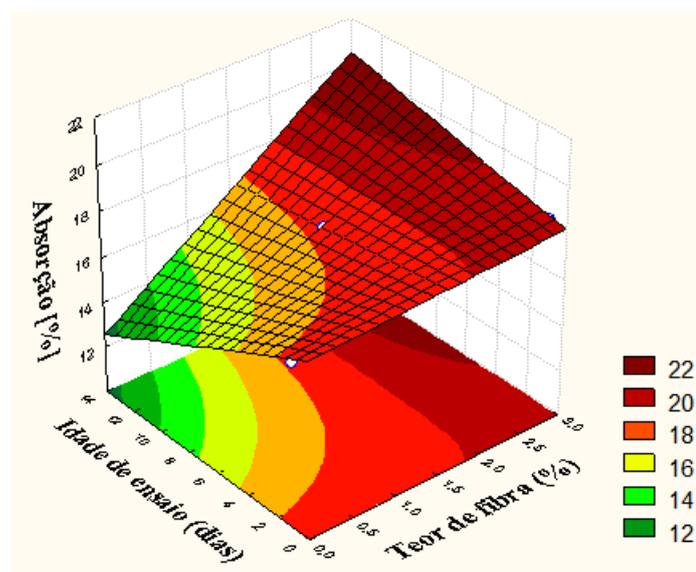
Para melhor avaliação da absorção em relação às variáveis, o gráfico de Pareto e a superfície de resposta, gerados pela análise estatística do *software*, encontram-se nas Figuras 30 e 31, respectivamente. O coeficiente de determinação da regressão gerada para a absorção foi de 0,99.

Figura 30: Gráfico de Pareto da Absorção de Água.



Fonte: Autora.

Figura 31: Superfície de Resposta da Absorção de Água.



Fonte: Autora.

Infere-se pelo gráfico de Pareto que ambas as variáveis são significativas, assim como a interação entre elas (teor/idade). Também se observa que, embora a variável idade de ensaio seja significativa, sua influência se dá de maneira decrescente (valor negativo), o que se confirma na superfície de resposta. Pela superfície, percebe-se o grande crescimento da absorção quando o teor de fibra aumenta e essa elevação é maior para idades maiores. Isto porque em idades menores a matriz está ainda em formação, mas após 14 dias, a maior influência na porosidade/absorção é devido ao aumento do teor de fibras.

5 CONCLUSÃO

Em suma, para os experimentos feitos com matriz de geopolímero à base de metacaulim com solução ativadora de hidróxido e silicato de sódio, e os compósitos com fibra de acetato de celulose, os resultados obtidos foram satisfatórios de acordo com o esperado, pois houve melhoras das propriedades analisadas.

Primeiramente, com relação à resistência à compressão, as fibras aumentam a resistência à compressão nas primeiras idades dos compósitos, enquanto a fibra não se mostrou significativa nas maiores idades analisadas, o que se deve à maior resistência da matriz com maiores idades.

Para o ensaio de flexão, os resultados do módulo de ruptura, do módulo de elasticidade e da tenacidade se mostraram promissores. Foi observado um aumento da resistência à flexão com a utilização das fibras e com o aumento da idade de ensaio, sendo que o maior aumento ocorreu para a maior idade, de 14 dias, e maior teor de fibras, de 3,0%. O módulo de elasticidade, embora tenha tido uma análise menos confiável, também aumentou com a adição das fibras, e com o aumento da idade de ensaio.

Entre as propriedades obtidas pelo ensaio de flexão, pode-se concluir que a propriedade analisada com os melhores resultados foi a tenacidade. Ela foi a propriedade mais influenciada positivamente pelo teor de fibras, em que os maiores valores de tenacidade foram encontrados para o maior teor, de 3%.

Por fim, o ensaio de absorção teve resultados já esperados, com o índice de vazios e absorção decrescendo à medida que a idade de ensaio cresce, e ambas as propriedades crescem de forma significativa com a adição de fibras.

É importante salientar que esses resultados são influenciados por diversos parâmetros do processo de moldagem e cura, sendo possível melhorá-los com modificações nesse processo. Além disso, os experimentos foram poucos (7), assim como a variação de teores (2). Portanto, seriam interessantes estudos experimentais mais aprofundados, abrangendo uma maior variação de teores da fibra e idades de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L. C. S. **Geopolímero à Base de Metacaulim com Adição de Fibras de Sisal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 122. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22804>>. Acesso em: 10 mar. 2021.
- ALVES, V. B. **A influência da densidade do filtro de cigarro nos teores da fumaça**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, p. 80. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- CUNICO, M. W. M, *et al.* Planejamento Fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. **Visão Acadêmica**, Curitiba, v.9, n.1, Jan – Jun/2008.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. 2000. 69 p. Boletim Técnico, Série BT/PCC/260– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- GRILLO, F. **Caracterização de geopolímeros a partir de resíduos de vidro e lodo de anodização do alumínio da região metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Curitiba, p. 107. 2019.
- JOLY, F-X; COULIS, M. Comparison of cellulose vs. plastic cigarette filter decomposition under distinct disposal environments. **Elsevier – Waste Management** 72, p. 349 – 353, November, 2017.
- LUCENA, M. C. C, *et al.* The effect of additives on the thermal degradation of cellulose acetate. **Elsevier – Polymer Degradation and Stability** 80, p. 149 – 155, September, 2002.
- METACAULIM DO BRASIL. **Estudo da influência do Metacaulim HP como adição de alta 44 eficiência em concretos de cimento Portland [2003]**. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/pdf/metacaulim-hp-usp.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2021.
- MOHAJERANI, A, *et al.* A practical proposal for solving the world’s cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. **Elsevier – Waste Management** 52, p. 228 – 244, March, 2016.
- PALOMO, A. et al. A review on alkaline activation: New analytical perspectives. **Materiales de Construccion**, v. 64, n. 315, 2014.

PAULY, J. L; MEPANI, A. B; LESSES, J. D, *et al.* Cigarettes with defective filters marketed for 40 years: what Philip Morris never told smokers. **Tobacco Control**, San Francisco, Vol 11, Issue suppl 1, p. i51 – i61, March, 2002.

PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, p.88. 2006.

RAHMAN, M. T, *et al.* Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt. **Elsevier – Construction and Building Materials** 261, August, 2020.

RILEM. Technical Committee 49 TRF - Test for determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement section – **Matériaux et Constructions**, v.17, n.102, p.441-443, 1989.

ROOT, T. **Cigarette butts are toxic plastic pollution. Should they be banned?**. National Geographic, United States, August, 2019. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/cigarettes-story-of-plastic>>. Acesso em: 26 fev. 2021.

SANTA, R. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 135. 2012.

SILVA, C. **Fabricação e Caracterização de Compósito de Matriz Geopolimérica a base de Metacaulim com incorporação de argila expandida como fase dispersa**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei. São João del Rei, p. 84. 2016.

VASSALO, E. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, p. 103. 2013.

WADALKAR, S, *et al.* Design of precast concrete blocks for paving with the use of cigarette butts (Cellulose Acetate). **IJRASET – International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, Vol 6, Issue V, p. 2958 – 2965, May, 2018.