

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS À BASE DE
METACALIM REFORÇADOS COM FIBRAS DE RAMI E SISAL**

Maria Clara Avelar e Silva

Uberlândia - MG

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS À BASE DE
METACAILIM REFORÇADOS COM FIBRAS DE RAMI E SISAL**

Maria Clara Avelar e Silva

Orientadora: Profa. Dra. Leila Aparecida de
Castro Motta

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil

Uberlândia - MG

2020

AGRADECIMENTOS

Sabendo que não teria chegado até aqui sozinha, gostaria de começar agradecendo a Deus pelas oportunidades concedidas, por me capacitar a dar meu melhor e por me possibilitar vencer cada desafio encontrado não só na realização deste trabalho, mas também durante os anos de graduação.

Aos meus pais, Jorge e Adriana, e irmão, João Vitor, por todo amor e incentivo, por me apoiarem em toda minha jornada, mas sobretudo por se comprometerem tanto quanto eu com este trabalho, a ponto de efetivamente “colocarem a mão na massa” junto comigo.

À professora Leila, por todos os ensinamentos que contribuíram tanto para minha formação acadêmica e pessoal, pela paciência com a qual me guiou nesta jornada e em especial por me incentivar a sempre ir além do que eu me julgava capaz.

A todos os meus colegas e amigos, mas de maneira especial à Ana Laura, que dividiu comigo não só as alegrias e frustrações da graduação, mas que também foi de fundamental importância para que este trabalho se concretizasse.

Também agradeço à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, na pessoa dos técnicos e professores, que me instruíram e auxiliaram não só com este trabalho, mas em toda minha caminhada. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e crescimento, fazendo com que eu chegasse ao fim desta tão importante etapa de minha vida.

RESUMO

O concreto, à medida que é empregado em larga escala no contexto da construção civil, tem também acarretado graves impactos ambientais devido à emissão de poluentes, principalmente em decorrência da produção do cimento Portland. Dessa forma, tem-se intensificado a busca por materiais que sejam capazes tanto de reduzir o consumo de recursos naturais e energia, quanto diminuir a geração de resíduos e gases prejudiciais ao meio ambiente. Uma das soluções encontradas é a substituição do cimento Portland por novos sistemas ligantes que utilizem aluminossilicatos álcalis-ativados, conhecidos como geopolímeros, os quais tem grande potencial ecológico. É de interesse, ainda, desenvolver misturas que apresentem melhor ductilidade e resistência à tração, sem que isso implique no uso de materiais que gerem impacto ambiental. Nesse contexto as fibras vegetais surgem como boa alternativa. Desta forma, o presente trabalho consiste na análise do desempenho de geopolímeros à base de metacaulim com adição de fibras de rami e sisal, visando aumentar a resistência à flexão do geopolímero, assim como demais propriedades correlatas. Para tanto, a fonte de aluminossilicato utilizada foi o metacaulim, o qual teve como solução ativadora uma associação de silicato de sódio e hidróxido de sódio. Diferentes teores e comprimentos de fibras foram estudados como reforço da matriz geopolimérica, com o objetivo de analisar a influência destes parâmetros nas características físico-mecânicas do material. Além disso, comparou-se os resultados obtidos com as fibras de rami e sisal, a fim de avaliar a diferença de comportamento entre elas quando utilizadas como reforço de compósitos geopolimérico. Como resultado, obteve-se que apenas a variável teor de fibra se mostrou estatisticamente significativa; quanto à diferença de comportamento entre as fibras foi atestado que, para a fibra de sisal, o teor foi diretamente proporcional às propriedades mecânicas, enquanto para a fibra de rami, o teor foi inversamente proporcional.

Palavras-chave: Compósitos geopoliméricos. Reforço. Fibras naturais. Propriedades mecânicas. Superfície de resposta.

ABSTRACT

The concrete, as it is largely used by civil construction industries, has also resulted in serious environmental impacts due to the emission of pollutants, mainly because of the production of Portland cement. In this way, the search for materials that can reduce the consumption of natural resources and energy, as well as reducing the generation of residues and gases harmful to the environment, has been intensified. One of the solutions is the replacement of Portland cement by new binders systems that use alkali-activated aluminosilicates, known as geopolymers, which have great ecological potential. It is also of interest to develop mixtures that have better ductility and tensile strength, without involving the use of materials that generate environmental impact, in this context, natural fibers appear as a good alternative. Thus, this work consists of the performance analysis of metakaolin-based geopolymers with addition of ramie and sisal fibers, aiming to increase the flexural strength of the geopolymer, as well as other related properties. Therefore, the source of aluminosilicate used was metakaolin, which had as an activating solution an association of sodium silicate and sodium hydroxide. Different fiber contents and lengths were studied to reinforce the geopolymeric matrix, in order to analyze the influence of these parameters on the physical-mechanical characteristics of the material. In addition, the results obtained were compared with ramie and sisal fibers, in order to evaluate the difference in behavior between them when used as reinforcement of geopolymeric composites. As a result, it was found that only the fiber content variable proved to be statistically significant; regarding the difference in behavior between the fibers it was attested that, for sisal fiber, the content was directly proportional to the mechanical properties, while, for ramie fiber, the content was inversely proportional.

Keywords: Geopolymer composites. Reinforcement. Natural fibers. Mechanical properties. Response surface.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: METACAILIM	14
FIGURA 2: HIDRÓXIDO DE SÓDIO	15
FIGURA 3: SILICATO DE SÓDIO.....	15
FIGURA 4: COMPRIMENTO DAS FIBRAS DE RAMI (DA ESQUERDA PARA A DIREITA: 10MM, 15MM E 20MM).....	18
FIGURA 5: COMPRIMENTO DAS FIBRAS DE SISAL (DA ESQUERDA PARA A DIREITA: 10MM, 15MM E 20MM).....	19
FIGURA 6: PROCESSO DE SATURAÇÃO PARA AS FIBRAS DE RAMI	19
FIGURA 7: PROCESSO DE SATURAÇÃO PARA AS FIBRAS DE SISAL	20
FIGURA 8: DA ESQUERDA PARA DIREITA: PASTA GEOPOLIMÉRICA; COMPÓSITO COM REFORÇO DE RAMI; COMPÓSITO COM REFORÇO DE SISAL.	20
FIGURA 9: MOLDE METÁLICO CONTENDO ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA.....	21
FIGURA 10: GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA A REFERÊNCIA	24
FIGURA 11: GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA AS FIBRAS DE RAMI	25
FIGURA 12: GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA AS FIBRAS DE SISAL	26
FIGURA 13: GRÁFICO DE PARETO DO MÓDULO DE RUPTURA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA).....	29
FIGURA 14: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO MÓDULO DE RUPTURA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA).....	29
FIGURA 15: GRÁFICO DE PARETO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA).....	32

FIGURA 16: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA).....	32
FIGURA 17: GRÁFICO DE PARETO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA).....	34
FIGURA 18: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA).....	35
FIGURA 19: GRÁFICO DE PARETO CORRIGIDO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA O SISAL ..	36
FIGURA 20: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRIDA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA O SISAL	36
FIGURA 21: GRÁFICO DE PARETO DA TENACIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)	38
FIGURA 22: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA TENACIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA).....	38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CARACTERIZAÇÃO DO METACaulim	14
TABELA 2: CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE RAMI E SISAL	16
TABELA 3: MATRIZ FATORIAL PARA FIBRA DE RAMI	17
TABELA 4: MATRIZ FATORIAL PARA FIBRA DE SISAL	17
TABELA 5: COMPONENTES DO TRAÇO DO GEOPOLÍMERO	18
TABELA 6: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RUPTURA PARA RAMI	28
TABELA 7: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RUPTURA PARA SISAL	28
TABELA 8: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA RAMI	30
TABELA 9: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA SISAL	31
TABELA 10: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA RAMI	33
TABELA 11: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA SISAL	33
TABELA 12: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA TENACIDADE PARA RAMI	37
TABELA 13: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA TENACIDADE PARA RAMI	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. Justificativa.....	8
1.2. Objetivos.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. Geopolímero à base de metacaulim.....	9
2.2. Materiais vegetais como reforços	10
2.2.1 Fibra de rami.....	11
2.2.2 Fibra de sisal	12
3. METODOLOGIA.....	13
3.1. Caracterização dos materiais.....	13
3.2. Planejamento experimental	16
3.3. Dosagem, preparo e moldagem dos corpos de prova	18
3.4. Ensaios	21
4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	24
4.1. Módulo de Ruptura	27
4.2. Módulo de elasticidade	30
4.3. Módulo de resiliência.....	33
4.4. Tenacidade.....	36
CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

São cada vez mais constantes os debates que evidenciam a dualidade entre a necessidade de se produzir materiais com elevado desempenho e a obrigatoriedade de reduzir o impacto que a produção de tais materiais causa no ambiente. No contexto da construção civil, ao atentar-se para o elevado índice de emissão de gases contribuintes ao efeito estufa que a produção de cimento Portland gera na atmosfera, faz-se necessário estudar alternativas ao cimento tradicional. É ideal, então, que tais alternativas que sejam sustentáveis e apresentem alto desempenho, por isso a importância do estudo do reforço dos geopolímeros com fibras vegetais.

O baixo impacto ambiental que os geopolímeros apresentam é devido à sua formação, que advém da reação química entre os componentes sílica e alumina, a qual ocorre em temperaturas ordinárias. Devido a essa característica, o volume de CO_2 liberado na obtenção dos geopolímeros apresenta uma queda de aproximadamente 80% se comparado ao que é liberado durante a produção do cimento Portland, o que caracteriza esses novos materiais cimentícios como uma excelente alternativa ao cimento tradicional (PORTELA, 2016).

Quando são introduzidas fibras vegetais à matriz geopolimérica, as vantagens desse compósito só aumentam. Por serem obtidas na natureza, as fibras se caracterizam pelo baixo custo e por serem biodegradáveis, o que corrobora o critério de sustentabilidade. Essas ainda atuam otimizando a resistência à tração e flexão dos geopolímeros, ao mesmo tempo que reduz a fissuração da peça (FIGUEIREDO, 2011), o que caracteriza os compósitos geopoliméricos reforçados com fibras naturais como potenciais materiais estruturais, sem, todavia, requerer um elevado investimento para sua aplicação.

1.2. Objetivos

São objetivos deste Trabalho de Conclusão de Curso estudar os compósitos de matriz geopolimérica, à base de metacaulim reforçados com fibras vegetais de rami e sisal. Após ensaios, espera-se avaliar os resultados obtidos e compará-los a uma matriz de referência e a estudos semelhantes, objetivando sua aplicação. É importante salientar ainda que, havendo um número reduzido de trabalhos que avaliam as fibras citadas adicionadas em compósitos geopoliméricos, espera-se que o trabalho contribua para o avanço de pesquisas envolvendo materiais sustentáveis para construção civil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Geopolímero à base de metacaulim

Tendo origem como uma alternativa ao cimento Portland, o geopolímero teve seu estudo aprofundado a partir da década de 1940, onde pesquisas demonstraram não só seu melhor desempenho ambiental quando comparado ao cimento Portland comum, mas também sua superior durabilidade e resistência a elevadas temperaturas (LI; SUN; LI, 2010). Nesse contexto, à semelhança do cimento Portland, o geopolímero é um sistema ligante que endurece à temperatura ambiente, adquirindo resistência com o tempo e formando uma forte ligação química com os agregados incorporados a ele (DAVIDOVITS, 2013).

A diferenciação entre os dois ligantes, no entanto, está na formação destes. Enquanto o cimento Portland é obtido através da fusão, a elevadas temperaturas, entre calcário e argila, o geopolímero tem sua formação através da combinação de materiais cimentícios suplementares e líquidos alcalinos, os quais reagem entre si formando uma pasta aglomerante que endurece com o passar do tempo (VASSALO, 2013).

Faz-se importante, nesse contexto, descrever o que seriam materiais cimentícios suplementares e líquidos alcalinos. O primeiro diz respeito a adições minerais, geralmente obtidas a partir de resíduos industriais, ricas em sílica e alumina, tendo como exemplo as cinzas volantes e o metacaulim (VASSALO, 2013). Já os líquidos alcalinos são metais solúveis à base de sódio ou potássio, de média a alta alcalinidade, que reagem ao entrar em contato com a sílica e alumina presentes nos materiais cimentícios suplementares, os quais são ativados através do meio alcalino no qual estão inseridos, culminando no processo de endurecimento do ligante, que dará origem a um composto de características poliméricas, denominado geopolímero (ALVES, 2018).

Dentre as propriedades presentes nos compostos geopoliméricos quando comparados ao cimento Portland, está primeiramente o rápido endurecimento acompanhado de elevada resistência inicial, as quais são seguidas da elevada resistência mesmo em condições de serviço severas, como ocorre em ambientes expostos à corrosão ou ao fogo (PALOMO et al., 2014). Além destas, tem-se o já citado desempenho ambiental, proporcionado pela fabricação dos geopolímeros que utiliza materiais naturais minimamente processados, que culminam na diminuição da emissão de gases causadores do efeito estufa (DAVIDOVITS, 2013).

Entretanto, fatores como o cuidado necessário durante a administração das soluções alcalinas e o conservadorismo da indústria da construção civil, mostram que ainda há um longo percurso até que os compostos geopoliméricos sejam efetivados no mercado, mesmo diante de

avanços tecnológicos que corroboram para a utilização destes materiais (ALVES, 2018). É necessário destacar, porém, os avanços que os geopolímeros já obtiveram em relação à implementação destes no setor da construção civil. Diversos países europeus têm aplicado compostos geopoliméricos na reparação de patrimônios culturais com o fim de promover a segurança contra incêndio. Já países como Japão e EUA têm utilizado a tecnologia como reforço de pontes e edificações sujeitas a severas condições de serviço (VASSALO, 2013). Ademais, um grande avanço para a efetivação dos compostos geopoliméricos foi a criação de normas específicas para regulamentar seu uso em larga escala, como ocorre na Ucrânia, já que estas normas poderão atuar como padrão para outros países (PALOMO ET AL., 2014).

2.2. Materiais vegetais como reforços

Segundo Raju e Shanmugaraja (2020), para um material ser definido como compósito é preciso que haja uma matriz, a qual será a responsável por definir as características do compósito – a exemplo dos geopolímeros – e um material de reforço, como as fibras. Para que uma fibra atue como reforço é preciso que esta apresente uma interação fibra-matriz suficiente para transmitir tensões e garantir um comportamento eficaz após o craqueamento (RANJBAR; ZHANG, 2020). Isso se deve ao fato dos materiais cimentícios, quando submetidos à tração, apresentarem baixa resistência à propagação de fissuras, favorecendo a união entre as fissuras formadas e a consequente ruptura do material.

Para peças contínuas, que não apresentam esforços concentrados em uma área específica da estrutura, o reforço com fibras é mais interessante que a utilização de armaduras, uma vez que as primeiras se distribuírem por todo material, o que favorece sua atuação como ponte de transferência de tensões através das fissuras, diminuindo a velocidade de propagação das mesmas e atenuando o comportamento frágil do material (FIGUEIREDO, 2011).

Apesar de existirem fibras sintéticas, devido a uma crescente preocupação ambiental aliada a uma boa perspectiva monetária, as fibras naturais têm sido preferidas. Conforme Ranjbar e Zhang (2020), entre as vantagens de sua utilização estão a ampla disponibilidade a baixo custo, reduzidas densidade e condutividade térmica e admissíveis propriedades mecânicas.

Segundo Jawaid e Abdul Khalil (2011), as fibras vegetais podem ser retiradas de diferentes partes da planta, o que determinará sua classificação em: fibras de caule (como a juta, linho e rami); fibras de folha (como o sisal, banana e abacaxi) e fibras do fruto (como algodão,

coco e dendê). Desse fato, deriva a diferenciação nas propriedades mecânicas que fibras apresentam, influenciadas sobretudo pela composição química de cada planta.

Os três componentes químicos presentes nas fibras vegetais são a celulose, a qual atua positivamente na resistência, com a desvantagem de influenciar na taxa de absorção de umidade; a hemicelulose, responsável por promover a flexibilidade da fibra; e a lignina, que atua como agente de ligação entre as fibras, sendo assim responsável pela sua dureza e rigidez. A partir deste conhecimento, optou-se por avaliar no presente estudo uma fibra de caule (rami) e uma de folha (sisal), a fim de analisar o comportamento de compósitos geopoliméricos reforçados com tais fibras (JAWAID; ABDUL KHALIL, 2011).

2.2.1 Fibra de rami

Habitualmente empregada na fabricação de tecidos, a fibra de rami é uma planta perene, produzida principalmente no sul e sudeste brasileiros e cuja espécie cultivada no país é a *Boehmeria Nivea Gaud* (FREIRE, MEDEIROS E ANDRADE, 1996). Sua composição química é dada por 68,6% de celulose, 13,1% de hemicelulose e apenas 0,6% de lignina, um dos percentuais mais baixos encontrados entre as fibras (BLEDZKI; REIHMANE; GASSAN, 1996).

Entre suas características físicas, conforme Bledzki, Reihmane e Gassan (1996), se destaca o elevado comprimento, cerca de 154 mm, o que a caracteriza como a mais longa entre as fibras. A fibra apresenta ainda propriedades mecânicas como alongamento percentual até a falha de 1,2 % e taxa de absorção de umidade de 8%.

Em estudos, Matsunaga, Sato e Goda (2018) investigaram a melhoria da resistência à tração e do módulo de elasticidade de compósitos de poliamida reforçados com baixos teores de rami. Para tanto utilizaram fibras curtas, com comprimento de 10 mm, e teores variando de 1 a 5%. Notou-se que, para compósitos com 1% de teor de fibra, tanto a resistência quanto o módulo de elasticidade foram 1,3 vezes maiores que os valores encontrados para compósitos sem reforço. Foi observado também que tais variáveis aumentavam até o teor de 4%, obtendo resistência a tração de 75 MPa e módulo de elasticidade de 5,5 GPa, muito acima dos valores sem reforço de 52 MPa e 2,4 GPa. Após esse teor, no entanto, as propriedades começaram a decrescer. Concluiu-se, ao fim, que a fibra de rami agiu favorecendo tanto a resistência à tração quando o módulo de elasticidade do compósito.

2.2.2 Fibra de sisal

A fibra de sisal é originada da planta *Agave Sisalana*, que tem por característica desenvolver-se em regiões semiáridas, fato que se mostra importante para o contexto social brasileiro (FILHO *et al.*, 2012). Em estudo realizado por Bledzki, Reihmane e Gassan (1996), observou-se que as fibras de sisal tem por composição química 78,0% de celulose, 10,0% de hemicelulose e 8,0% de lignina.

Quanto às características físicas, a fibra de sisal é descrita com um pequeno comprimento, cerca de 2,2 mm e massa específica média de 1,45 g/cm³, além de taxa de absorção de umidade de 11% (BLEDZKI; REIHMANE; GASSAN, 1996).

Filho et al. (2012) analisaram a resistência de compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal. Para tanto, foram realizados testes com comprimentos de fibra variando entre 1 e 2,5 cm a fim de definir o comprimento ideal, sendo o comprimento de 1 cm apontado como mais adequado. Além disso, foram analisados o tempo de cura do compósito e a forma de distribuição das fibras. Após estudos, concluiu-se que o melhor comportamento do compósito se dá a 28 dias e que as fibras alinhadas apresentam melhor resistência que as distribuídas de forma randômica.

Alves (2018) estudou geopolímeros à base de metacaulim com reforço de fibras de sisal. Em seu estudo, ela definiu teores de fibra em relação à matriz variando de 0% a 6%, por serem limitantes em relação ao processo de moldagem, concluindo ao fim do estudo que teores acima de 5,15% não caracterizam melhora expressiva no módulo de elasticidade do compósito. Joseph, Medeiros e Carvalho (1999) investigaram a influência do comprimento das fibras de sisal na resistência de compósitos de matriz poliéster, variando as medidas entre 5 e 45 mm e obtendo um comprimento ótimo de fibras estabelecido entre 35 e 45 mm.

3. METODOLOGIA

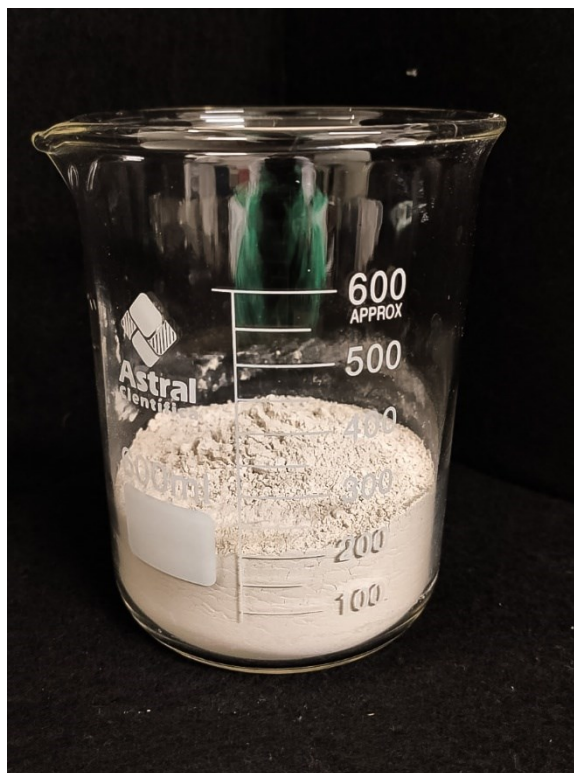
Posto que a ênfase do presente trabalho está no estudo de matrizes geopoliméricas reforçadas com fibras vegetais, será analisada a influência que algumas características das fibras exercem sobre a resistência à flexão do compósito e propriedades correlatas. As características escolhidas foram o teor e comprimento de fibras.

Dentre os materiais selecionados está a matriz geopolimérica à base de metacaulim, ativada com solução associada de hidróxido de sódio e silicato de sódio, e reforço com fibras vegetais de sisal e rami. A avaliação dos compósitos foi feita apenas em estado endurecido. Dessa forma, foram moldados corpos de prova para ensaio à flexão, sendo analisados os módulos de ruptura, elasticidade e resiliência, além da tenacidade. Realizou-se também comparações entre os valores das propriedades obtidas na argamassa geopolimérica de referência e nos compósitos com fibras, verificando, além da viabilidade do reforço com fibras, qual fibra se comporta melhor quando associada à matriz utilizada.

3.1. Caracterização dos materiais

Como material cimentício suplementar, optou-se por empregar no presente estudo o metacaulim. Este é um material que tem sua origem a partir da calcinação de argilas cauliniticas, processo que ocorre a temperaturas que variam entre 650°C e 800°C (LI; SUN; LI, 2010), sendo caracterizado como um aluminossilicato ativado termicamente, composto por SiO_2 e Al_2O_3 na fase amorfa (ALVES, 2018). O metacaulim, comercialmente nomeado de *Metacaulim HP ULTRA*, foi fabricado e doado pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda, sendo o mesmo representado na Figura 1. Segue na Tabela 1 a caracterização do material.

FIGURA 1: METACALIM



FONTE: Autora

TABELA 1: CARACTERIZAÇÃO DO METACALIM

SiO₂ (%)	51,57
Al₂O₃ (%)	40,50
Diâmetro médio (µm)	12,4
Massa específica (g/cm³)	2,65
Atividade pozolânica (mg de CaO/g de amostra, a 90 ± 5°C)	771,20

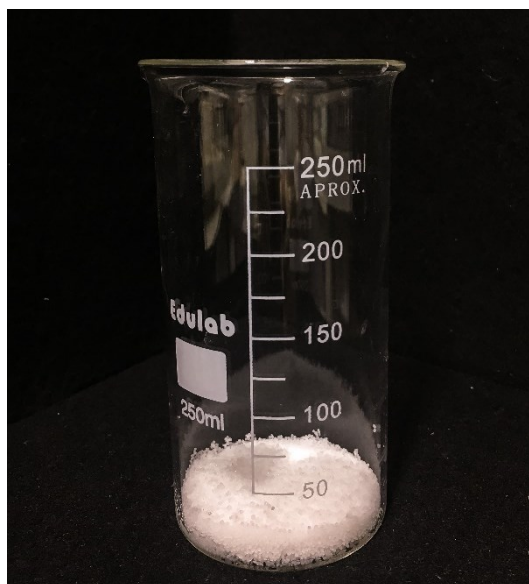
FONTE: Adaptado de Metacaulim (2003).

A partir da Tabela 1 é possível observar que o metacaulim é composto majoritariamente de sílica e alumina. Além disso, uma vez que o índice de consumo mínimo para que um material seja considerado pozolânico é de 330 mg de CaO/g de amostra (LEITE; DAL MOLIN, 2002), ao exceder o mínimo em mais de 200% é possível caracterizar o Metacaulim HP ULTRA como um material caracteristicamente pozolânico.

O hidróxido de sódio, utilizado na solução ativadora, foi adquirido da empresa Vetec Química Fina Ltda, de Duque de Caxias – Rio de Janeiro, e tem por nome *Hidróxido de Sódio P.A. Micropérolas NaOH*. O silicato de sódio, utilizado em associação ao hidróxido, foi obtido

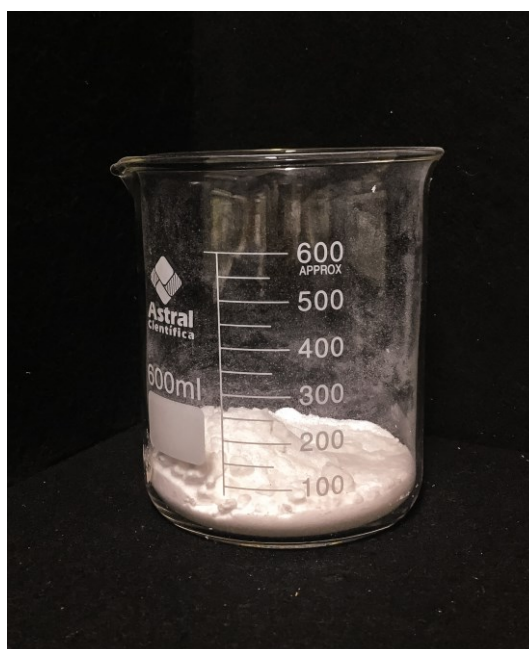
da empresa Unaprosil (Usina Nova América) com nome de *Silicato de Sódio Alcalino em Pó 2.0*, cuja análise química e física fornecida pela empresa atestou: relação de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 1,98; densidade aparente de 570 g/L; pH de 12,10 e total de sólidos correspondente a 78,40% da composição. O hidróxido e silicato de sódio são apresentados, respectivamente, nas Figuras 2 e 3 abaixo.

FIGURA 2: HIDRÓXIDO DE SÓDIO



FONTE: Autora

FIGURA 3: SILICATO DE SÓDIO



FONTE: Autora

O reforço dos compósitos com rami foi feito utilizando-se a fibra obtida da empresa Sisalsul Indústria e Comércio Ltda., localizada em São Paulo. Já os compósitos reforçados com sisal foram moldados utilizando fibras do tipo 2, doadas pela empresa Salgadalia Ind. Com. Exportação LTDA., localizada na Bahia. Uma vez que este estudo dá continuidade a trabalhos anteriores, a caracterização das fibras de rami e de sisal já havia sido realizada por Soares (2012) e Alves (2018), respectivamente, e tem os resultados expressos na Tabela 2.

TABELA 2: CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE RAMI E SISAL

	Massa específica (g/cm ³)	Deformação (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Rami	1,59	2,52	241,87	14,25
Sisal	1,51	3,94	371,61	11,47

FONTE: Adaptado de Alves (2018) e Soares (2012).

3.2. Planejamento experimental

O planejamento experimental foi fundamentado na consulta à literatura existente e tendo por base as características das fibras escolhidas para análise, sendo escolhidos como parâmetros de estudo o teor (em relação ao volume aparente do compósito) e comprimento. Optou-se por variar os teores em 2%, 4% e 6% para ambas as fibras; quanto ao comprimento, definiu-se que seriam utilizadas fibras curtas, da ordem de 10 mm, 15 mm e 20 mm.

A fim de entender como cada variável influencia no comportamento do compósito, definiu-se experimentos com delineamento fatorial 2^k , utilizando dois níveis, ponto central e duas variáveis independentes, definidas como teor e comprimento das fibras. Segundo Bortolini (2012), o experimento fatorial 2^k tem por vantagens a análise tanto dos efeitos principais como dos efeitos de interação dos fatores. Além disso, ele se mostra útil à medida que permite analisar de forma simples o nível de influência que cada variável exerce no resultado do experimento, bem como seu nível de significância.

Dessa forma, o planejamento dos experimentos foi executado conforme mostrado nas Tabelas 3 e 4, as quais descrevem as matrizes de planejamento fatorial para as fibras de rami e sisal, respectivamente. O primeiro fator analisado foi o teor de fibras, o qual teve como mínimo o valor de 2% e como máximo, 6%, dessa forma, definiu-se o ponto central como 4%. Para o segundo fator, comprimento da fibra, escolheu-se como pontos mínimos e máximos, 10mm e 20mm, respectivamente, de modo que o ponto central nesse caso foi o valor de 15 mm.

Ademais, foram adotadas quatro repetições no nível central – a fim de obter uma maior confiabilidade no resultado final – além de serem definidos três corpos de prova por plano experimental e ensaio a ser realizado.

TABELA 3: MATRIZ FATORIAL PARA FIBRA DE RAMI

EXPERIMENTO/ NOMENCLATURA	Codificação		Decodificação	
	A	B	Teor de fibras de rami (%)	Comp. das fibras (mm)
EXP.1 / R 2-10	-1	-1	2	10
EXP.2 / R 2-20	-1	1	2	20
EXP.3 / R 6-10	1	-1	6	10
EXP.4 / R 6-20	1	1	6	20
EXP.5 / R 4-15 (C)	0	0	4	15
EXP.6 / R 4-15 (C)	0	0	4	15
EXP.7 / R 4-15 (C)	0	0	4	15
EXP.8 / R 4-15 (C)	0	0	4	15

FONTE: Autora.

TABELA 4: MATRIZ FATORIAL PARA FIBRA DE SISAL

EXPERIMENTO / NOMENCLATURA	Codificação		Decodificação	
	A	B	Teor de fibras de sisal (%)	Comp. das fibras (mm)
EXP.1 / S 2-10	-1	-1	2	10
EXP.2 / S 2-20	-1	1	2	20
EXP.3 / S 6-10	1	-1	6	10
EXP.4 / S 6-20	1	1	6	20
EXP.5 / S 4-15 (C)	0	0	4	15
EXP.6 / S 4-15 (C)	0	0	4	15
EXP.7 / S 4-15 (C)	0	0	4	15
EXP.8 / S 4-15 (C)	0	0	4	15

FONTE: Autora

A análise dos dados experimentais foi realizada em duas etapas. Primeiro aplicou-se o critério de Chauvenet com o fim de determinar a aceitabilidade dos resultados obtidos com cada corpo de prova. Após esta, prosseguiu-se com a análise fatorial 2^k , dessa vez utilizando o *software Statistica 7.0*. Foi então analisada a influência de cada variável, bem como o efeito de

interação entre variáveis, para posterior ajuste do modelo, sendo adotado nível de significância para ajuste de 5%.

3.3. Dosagem, preparo e moldagem dos corpos de prova

Para preparo do compósito, utilizou-se como base o estudo anterior (Alves, 2018) que teve por objetivo definir o traço ideal de argamassa geopolimérica que garantisse boa trabalhabilidade e resistência. Este encontra-se descrito na Tabela 5.

TABELA 5: COMPONENTES DO TRAÇO DO GEOPOLÍMERO

Metacaulim / Areia	Água / Metacaulim	Na_2SiO_3 / $NaOH$
0,5	0,6	2,5

FONTE: Adaptado de Alves (2018)

O hidróxido de sódio e o silicato de sódio foram dissolvidos em água até obter as concentrações de 15 M e 12 M, respectivamente, definidas por Alves (2018). A fim de se otimizar o uso dos materiais e assim evitar desperdícios, as quantidades de materiais utilizados para produção do geopolímero foram reduzidos em função do volume de fibras introduzidas no compósito.

As fibras utilizadas não receberam nenhum tipo de tratamento prévio, uma vez que é de interesse deste estudo utilizar materiais em seu estado natural, com o menor número de alterações possíveis. Dessa forma, o preparo das fibras consistiu, primeiramente, no corte das mesmas de acordo com os comprimentos definidos no planejamento experimental, como pode ser visto nas Figuras 4 e 5.

FIGURA 4: COMPRIMENTO DAS FIBRAS DE RAMI (DA ESQUERDA PARA A DIREITA: 10MM, 15MM E 20MM)



FONTE: Autora

FIGURA 5: COMPRIMENTO DAS FIBRAS DE SISAL (DA ESQUERDA PARA A DIREITA: 10MM, 15MM E 20MM)



FONTE: Autora

Em seguida, com o objetivo de evitar que as fibras reduzissem a água presente na mistura, optou-se por manter as mesmas submersas em água por aproximadamente 15 minutos. Após esse período, o excesso de água foi retirado manualmente, de modo a evitar que a relação água/metacaulim da argamassa se modificasse. A Figura 6 mostra o processo de saturação para as fibras de rami, enquanto a Figura 7 mostra o mesmo processo para a fibra sisal.

FIGURA 6: PROCESSO DE SATURAÇÃO PARA AS FIBRAS DE RAMI



FONTE: Autora

FIGURA 7: PROCESSO DE SATURAÇÃO PARA AS FIBRAS DE SISAL

FONTE: Autora

Para preparo do geopolímero, primeiramente dissolveu-se separadamente o hidróxido de sódio e o silicato de sódio em água, a fim de se obter duas soluções diferentes. Essas foram então misturadas entre si, para, em seguida, serem acrescentadas ao metacaulim e homogeneizadas manualmente, pelo tempo de aproximadamente 3 minutos. O próximo passo consistiu no acréscimo da areia, sendo a mistura agora homogeneizada mecanicamente através de um misturador de argamassa, por aproximadamente 3 minutos. Por fim, acrescentou-se aos poucos as fibras, e ainda com uso do misturador, homogeneizou-se a argamassa por mais 5 minutos. A Figura 8 mostra primeiro a pasta geopolimérica, sem adição de areia e fibras, seguida pelo compósito em estado fresco com reforço de fibras de rami e, posteriormente, o compósito reforçado com sisal.

FIGURA 8: DA ESQUERDA PARA DIREITA: PASTA GEOPOLIMÉRICA; COMPÓSITO COM REFORÇO DE RAMI; COMPÓSITO COM REFORÇO DE SISAL.

FONTE: Autora

A moldagem dos corpos de prova ocorreu utilizando-se formas metálicas nas dimensões 16 x 4 x 4 (cm), a fim de realizar o ensaio à flexão. Após acomodada no molde, a argamassa geopolimérica foi adensada mecanicamente, com uso da mesa de adensamento por queda, sendo aplicada uma camada única a qual foi adensada com 30 golpes. Por fim, após adensados, os corpos de prova foram envoltos em filme plástico e permaneceram em câmara úmida até a data dos ensaios. A Figura 9 mostra o corpo de prova com o compósito geopolimérico, devidamente embalada e identificada.

FIGURA 9: MOLDE METÁLICO CONTENDO ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA



FONTE: Autora

3.4. Ensaios

Os compósitos foram estudados no estado endurecido, com 7 dias de cura, quanto à resistência à tração na flexão. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13279 (ABNT,

2005). Os corpos de prova, após os sete dias de cura em câmara úmida, foram submetidos a carregamento de 50 N/s até que os mesmos atingissem 10% de deformação. A máquina universal de ensaios utilizada foi a Instron 5982, com célula de carga de 5kN. A limitação da deflexão foi puramente para padronização dos ensaios, objetivando a determinação da tenacidade, uma vez que os corpos de prova com fibras continuavam absorvendo carga sem fratura (separação).

Após finalizados os ensaios, com os resultados obtidos, foram determinados os módulos de ruptura, elasticidade e resiliência, além da tenacidade das argamassas estudadas. As propriedades foram determinadas por meio das formulações próprias do ensaio de flexão em três pontos. As equações que descrevem cada propriedades estão listadas a seguir, sendo que as Equações 01, 02 e 03 determinam os módulos de ruptura, elasticidade e resiliência, respectivamente, enquanto a Equação 04 fornece a tenacidade do compósito.

$$M. Rup. = \frac{3 \times P_{m\acute{a}x} \times l}{2 \times b \times e^2} \quad [\text{MPa}] \quad (01)$$

$$E = \frac{l^3}{4 \times b \times e^3} \times \left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (02)$$

$$M. Res. = \frac{\sigma_p^2}{2 \times E} \quad [\text{MPa}] \quad (03)$$

$$T = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \quad [\text{kJ/m}^2] \quad (04)$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima durante o ensaio (em N);

l é a distância entre os apoios, fixada em 100 mm;

b e e são a largura e a espessura do corpo de prova, respectivamente, em mm, as quais foram determinadas a partir da média de três medidas obtidas com auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm;

$\Delta P / \Delta \delta$ é o coeficiente angular da reta que representa o trecho elástico, essa formada a partir da curva $P \times \delta$ (Carga x Extensão), em N.m;

σ_p é a tensão limite de proporcionalidade obtida através da Equação 05 descrita abaixo.

$$\sigma_p = \frac{3 \times P_p \times l}{2 \times b \times e^2} \quad (05)$$

Com P_p sendo a carga no limite de proporcionalidade do gráfico, ou seja, no limite do regime elástico.

Como critério de aceitabilidade dos resultados obtidos com cada corpo de prova, foi aplicado para cada formulação o critério de Chauvenet. Este é um método estatístico que baseia-se na hipótese de que só é relevante descartar um dado se o desvio em relação à média para este valor for menor que o inverso do dobro do número de corpos de prova, como descrito na Equação 06 (CALLEGARO, 2014).

$$critério = \frac{1}{2 \times n} \geq \frac{cp - \mu}{\sigma} \quad (06)$$

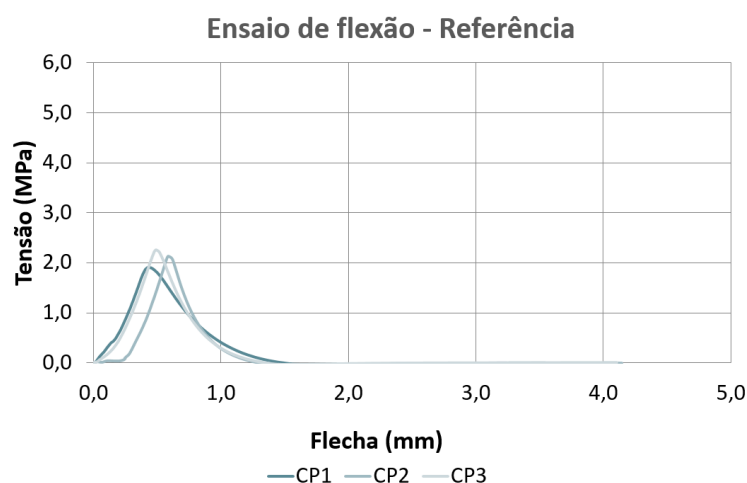
Com n sendo o número de medições; cp o valor obtido para o corpo de prova analisado; μ a média entre os valores dos corpos de prova analisados e σ o desvio padrão entre estes.

Por fim, realizou-se a análise dos resultados por meio do *Statistica 7.0*, obtendo como instrumentos de análise o gráfico de Pareto, que indica quais variáveis são estatisticamente relevantes, e a superfície de resposta de cada variável, a qual permite identificar a influência de cada variável na propriedade analisada.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

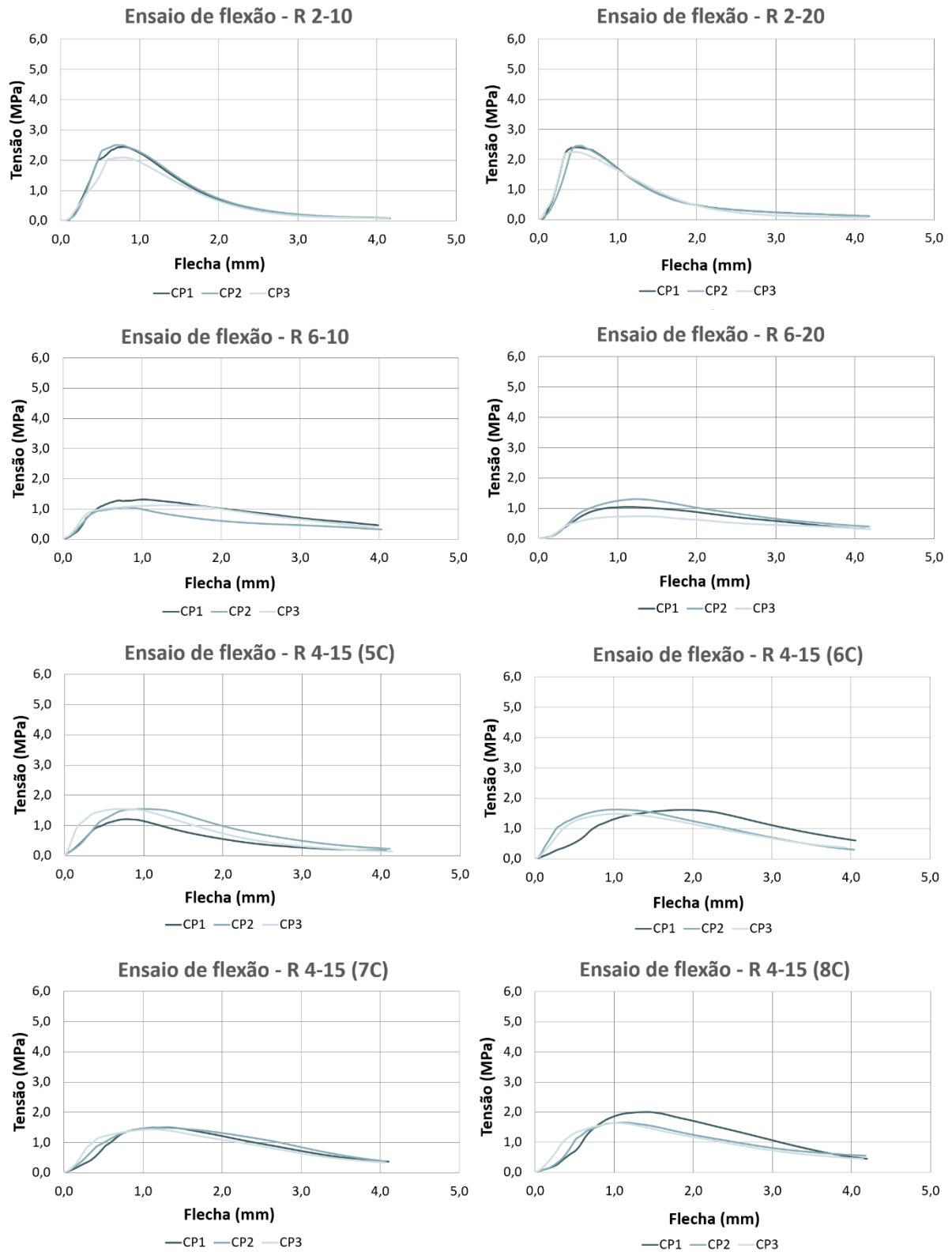
Tendo por base o ensaio de tração na flexão em três pontos, obtiveram-se valores de deformação observada associados à carga aplicada. Com os dados colhidos, calculou-se a tensão correspondente a cada carga, de forma a se produzir gráficos de Tensão (MPa) x Flecha (mm) para os corpos de prova ensaiados. A Figura 10 traz os resultados dos ensaios para os corpos de prova de referência, os quais não receberam reforço com fibras; as Figuras 11 e 12, por sua vez, demonstram o comportamento durante ensaio dos corpos de prova reforçados com fibras de rami e sisal, respectivamente.

FIGURA 10: GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA A REFERÊNCIA



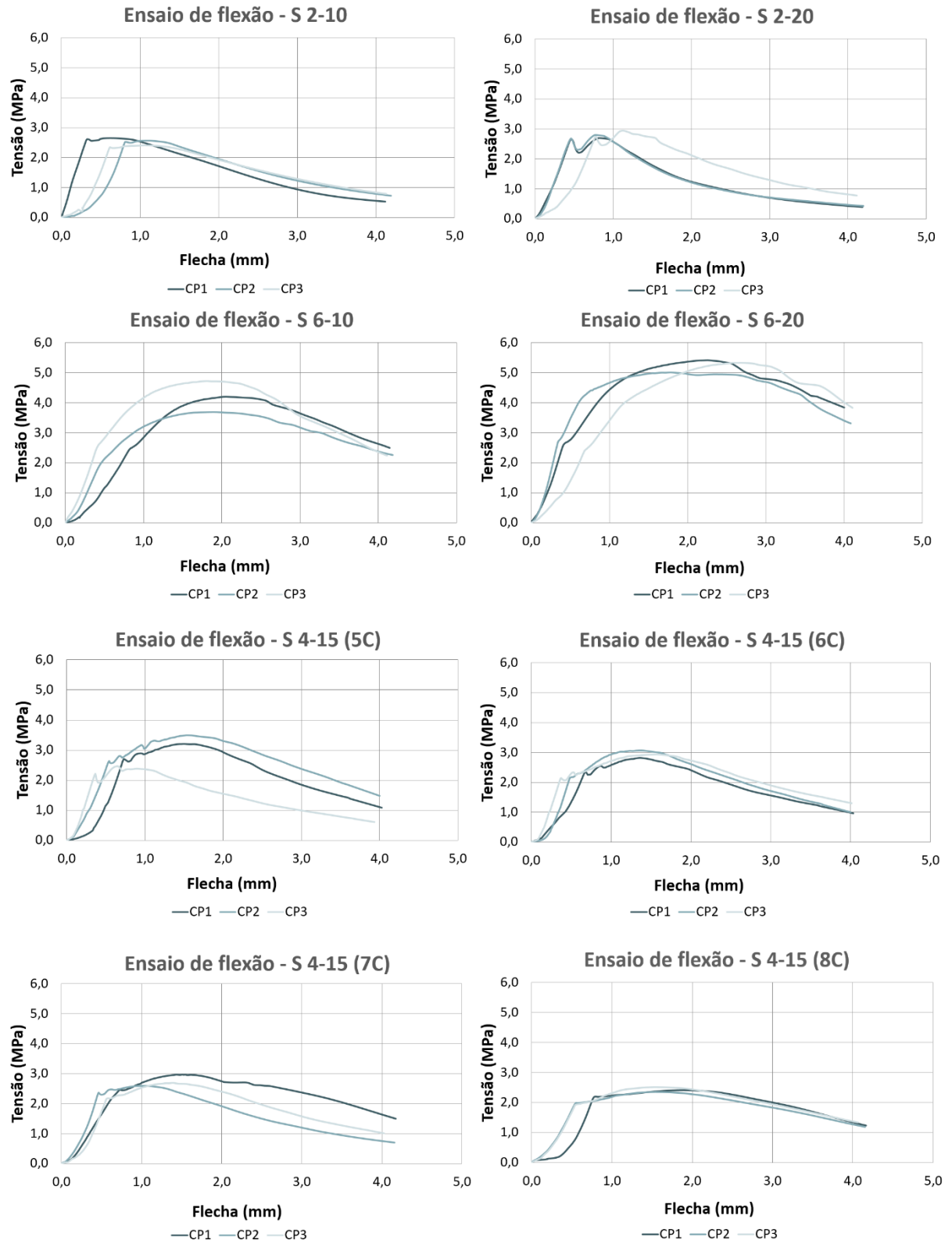
FONTE: Autora

FIGURA 11: GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA AS FIBRAS DE RAMI



FONTE: Autora

FIGURA 12: GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA AS FIBRAS DE SISAL



FONTE: Autora

Infere-se da observação dos gráficos que, enquanto as fibras de rami apresentaram cargas máximas menores à medida que os teores aumentam, as fibras de sisal tiveram comportamento oposto, uma vez que a carga máxima suportada pelos corpos de prova é maior conforme o teor de fibra no compósito é acrescido. Ademais, observa-se em ambas as fibras o aumento da amplitude da curva de Tensão x Flecha à proporção que o teor de fibras se eleva, isto é, aparece o comportamento pós pico com a inserção das fibras. Inclusive observa-se o crescimento da resistência após o pico (ruptura da matriz). Além disso, à medida que o teor aumenta é claro o crescimento da “calda” pós-pico.

Outro fator a se observar é a diferença de comportamento entre corpos de prova de uma mesma formulação. Quanto maior o teor de fibras, maior a diferença observada entre os gráficos da formulação, evidenciando, conforme esperado, que o processo de moldagem fica dificultado e o compósito perde a uniformidade para teores mais elevados de fibras, fato ocasionado sobretudo pela queda da trabalhabilidade do compósito.

Todavia, ainda que haja queda na uniformidade do comportamento dos corpos de prova quando ensaiados, ao aplicar o critério de Chauvenet, todas as amostras permaneceram dentro do limite estabelecido. Este fato evidencia que, apesar de haver uma discrepância de resultados entre uma mesma formulação, esta não é significativa nem altera a confiabilidade das análises.

Posto isto, para melhor avaliar o comportamento do compósito diante das variáveis estudadas, optou-se por analisar cada propriedade mecânica separadamente. Dessa forma, além de melhor entender cada propriedade, foi possível comparar de forma tangível os resultados obtidos com ambas as fibras.

4.1. Módulo de Ruptura

O módulo de ruptura fornece o máximo valor de tensão de flexão que o corpo de prova suporta até sua ruptura. Assim sendo, quanto maiores os valores observados, mais resistente à flexão a formulação se apresentará.

A média dos valores calculados para cada experimento, assim como o desvio padrão de cada amostra em relação à média, podem ser vistos nas Tabelas 6 e 7, as quais correspondem aos resultados de módulo de ruptura para rami e sisal, respectivamente.

TABELA 6: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RUPTURA PARA RAMI

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Módulo de ruptura médio (MPa)	Desvio padrão
Ref.	0	0	2,10	0,18
EXP.1 / R 2-10	2	10	2,35	0,22
EXP.2 / R 2-20	2	20	2,37	0,11
EXP.3 / R 6-10	6	10	1,16	0,14
EXP.4 / R 6-20	6	20	1,03	0,28
EXP.5 / R 4-15 (C)	4	15	1,43	0,19
EXP.6 / R 4-15 (C)	4	15	1,58	0,08
EXP.7 / R 4-15 (C)	4	15	1,47	0,03
EXP.8 / R 4-15 (C)	4	15	1,76	0,21

FONTE: Autora

TABELA 7: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RUPTURA PARA SISAL

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Módulo de ruptura médio (MPa)	Desvio padrão
Ref.	0	0	2,10	0,18
EXP.1 / S 2-10	2	10	2,54	0,12
EXP.2 / S 2-20	2	20	2,82	0,12
EXP.3 / S 6-10	6	10	4,20	0,52
EXP.4 / S 6-20	6	20	5,25	0,21
EXP.5 / S 4-15 (C)	4	15	3,05	0,53
EXP.6 / S 4-15 (C)	4	15	2,94	0,13
EXP.7 / S 4-15 (C)	4	15	2,75	0,20
EXP.8 / S 4-15 (C)	4	15	2,43	0,08

FONTE: Autora

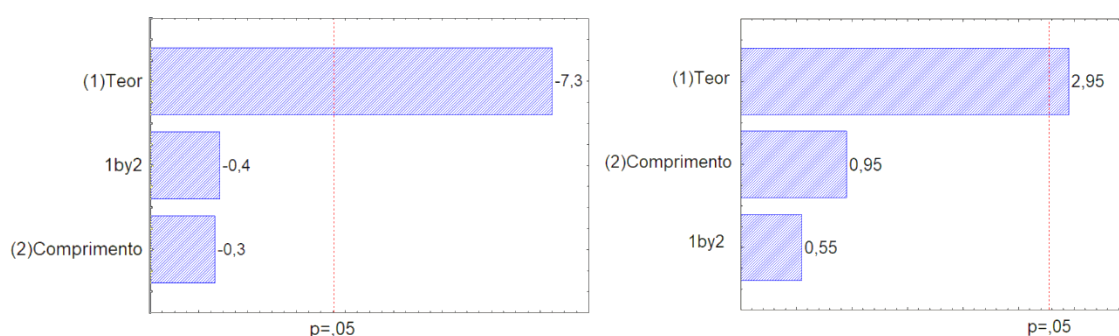
Verifica-se, a partir da análise da Tabela 6, que as únicas formulações que ultrapassam os valores de módulo de ruptura obtidos na referência são as que apresentam teor de 2% de fibra em volume de argamassa. Para essas formulações o módulo de ruptura chega a ser 12% superior à referência. Em contrapartida, as formulações com elevados teores de fibras apresentaram cerca da metade da resistência observada na amostra de referência. Quanto ao comprimento, não é possível perceber uma influência direta desta variável.

Para a fibra de sisal, o comportamento observado difere substancialmente dos compósitos reforçados com rami. Em primeiro lugar, analisando-se a Tabela 7 é possível ver

que o módulo de ruptura aumenta tanto com o teor quanto com o comprimento das fibras, sendo a formulação com maior módulo de ruptura duas vezes maior que a de menor módulo. Além disso, observa-se que mesmo a formulação com menor módulo de ruptura é 20% maior que o valor do módulo observado na amostra de referência.

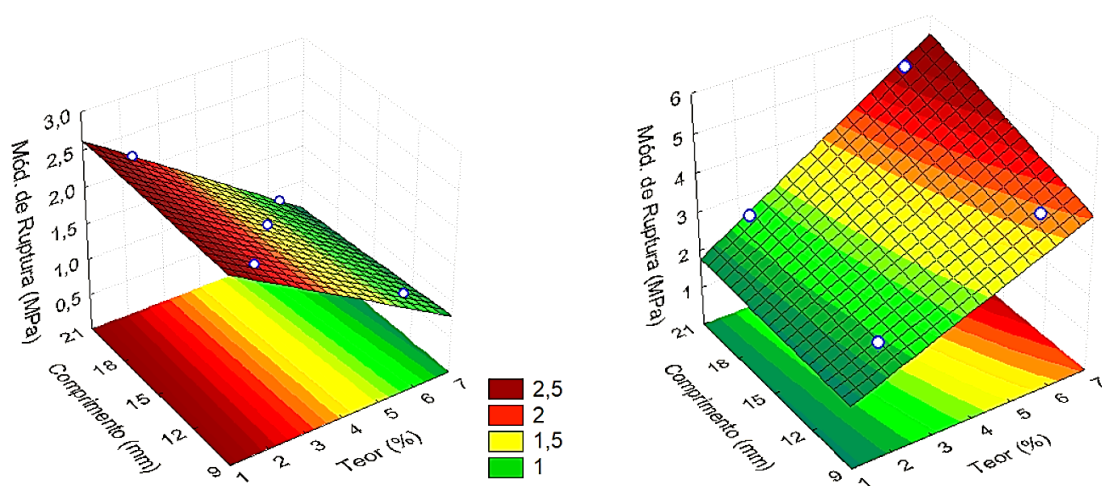
Para análise da influência das variáveis, obteve-se por meio do software *Statistica 7.0* a Figura 13, que avalia a significância das variáveis a partir do gráfico de Pareto, e a Figura 14, a qual analisa influência destas nos valores de módulo de ruptura por meio da superfície de resposta.

FIGURA 13: GRÁFICO DE PARETO DO MÓDULO DE RUPTURA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



FONTE: Autora

FIGURA 14: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO MÓDULO DE RUPTURA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



FONTE: Autora

Pelo gráfico de Pareto é possível observar que, para ambas as fibras, apenas a variável teor de fibras se mostra significativa. Há, no entanto, diferença de representatividade entre elas,

uma vez que, para o rami a variável teor se mostra extremamente significativa, enquanto quase não há diferença entre a significância do comprimento e da interação entre as duas variáveis. Para o sisal, apesar do teor ser a única variável significativa, já é possível distinguir a diferença de significância entre comprimento e interação teor/comprimento, sendo a primeira mais significativa que a segunda. Inclusive, é possível observar que, apesar de não significativo, o efeito de interação da variável comprimento chega a ser próximo de 1, o que confirma os resultados obtidos, onde maiores valores de comprimento resultam em módulos de ruptura maiores.

A superfície de resposta confirma o que foi visto nos diagramas. Para o rami há quase uma reta paralela ao eixo que representa a variável comprimento, indicando sua baixa interferência. Já para o sisal, observa-se um pico para compósitos com elevado teor e comprimento de fibras, apesar do mesmo não ser observado para menores valores. Outra análise que pode ser feita é relativa à proporcionalidade entre a variável significativa (teor) e o resultado de módulo de ruptura observado para cada fibra, onde, no caso do rami, a variável se mostra inversamente proporcional, ao contrário do sisal, onde essa passa a ser diretamente proporcional ao módulo de ruptura, confirmando o que já havia sido observado.

4.2. Módulo de elasticidade

Uma vez que o módulo de elasticidade expressa a rigidez do material, quanto maior seu valor, menor a deformação elástica sofrida pela amostra quando submetida a um carregamento, portanto, mais rígido o corpo de prova é. A primeira análise feita em relação ao módulo de elasticidade foi acerca da média e desvio padrão para cada formulação modelada. A Tabela 08 expressa os valores encontrados para a fibra de rami, enquanto a Tabela 9 os descreve para a fibra de sisal.

TABELA 8: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA RAMI

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Módulo de elasticidade médio (MPa)	Desvio padrão
Ref.	0	0	292,08	22,38
EXP.1 / R 2-10	2	10	235,78	74,98
EXP.2 / R 2-20	2	20	408,34	26,22
EXP.3 / R 6-10	6	10	149,20	22,19
EXP.4 / R 6-20	6	20	86,24	17,18
EXP.5 / R 4-15 (C)	4	15	178,76	100,94
EXP.6 / R 4-15 (C)	4	15	118,61	65,94

EXP.7 / R 4-15 (C)	4	15	110,62	56,09
EXP.8 / R 4-15 (C)	4	15	131,25	43,07

FONTE: Autora

TABELA 9: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA SISAL

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Módulo de elasticidade médio (MPa)	Desvio padrão
Ref.	0	0	292,08	22,38
EXP.1 / S 2-10	2	10	209,65	110,11
EXP.2 / S 2-20	2	20	205,74	71,75
EXP.3 / S 6-10	6	10	215,91	104,69
EXP.4 / S 6-20	6	20	314,12	104,63
EXP.5 / S 4-15 (C)	4	15	312,60	27,87
EXP.6 / S 4-15 (C)	4	15	303,07	65,67
EXP.7 / S 4-15 (C)	4	15	265,46	82,56
EXP.8 / S 4-15 (C)	4	15	236,07	32,49

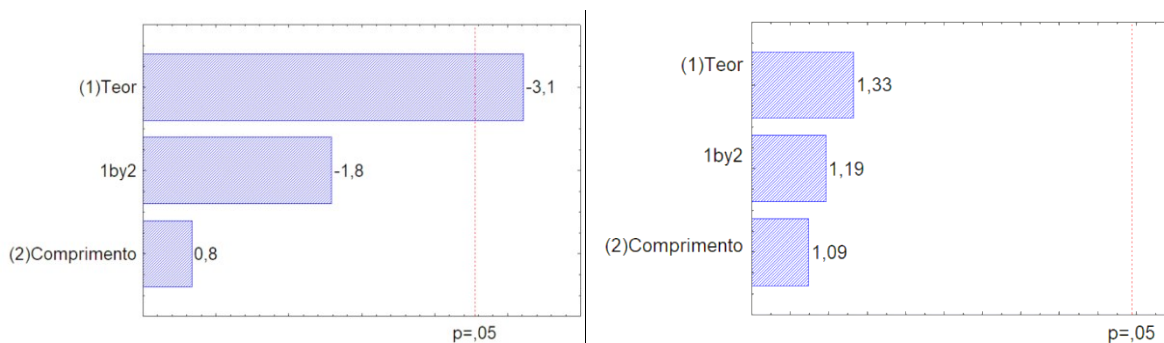
FONTE: Autora

Ao analisar a fibra de rami pelos dados da Tabela 8, percebe-se que o maior valor encontrado corresponde a formulação com 2% de teor e 20mm de comprimento, a qual chega a ser 40% superior ao valor encontrado para a amostra de referência. Esta porém, foi a única formulação que excedeu os valores de módulo de elasticidade da referência, sendo todos os outros inferiores ao observado para esta

Os resultados para a fibra de sisal, descritos na Tabela 9, trazem poucos valores acima do observado para a referência, ademais, estes não aparentam conter influência das variáveis estudadas. Mesmo entre as formulações centrais, que são idênticas, observou-se mais de 30% de variação entre os ensaios 5(C) e 8(C), o que não deveria ocorrer. Isso pode ser ocasionado pela baixa trabalhabilidade do compósito, que resultou em corpos de prova com diferentes distribuições de fibras, o que afetou sobretudo o comportamento do compósito na fase elástica.

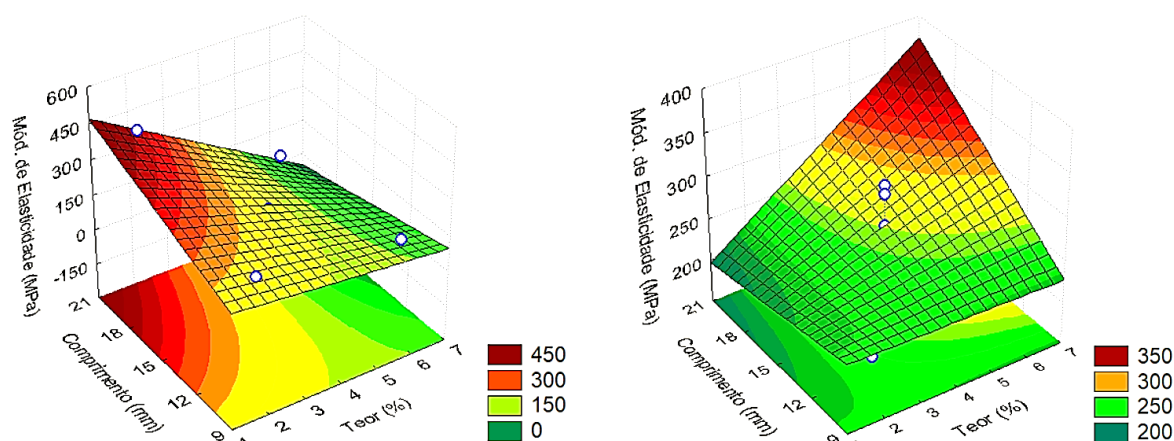
A seguir são apresentados os gráficos de Pareto e de superfícies de resposta para o módulo de elasticidade, estes contidos nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

FIGURA 15: GRÁFICO DE PARETO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



FONTE: Autora

FIGURA 16: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



FONTE: Autora

Em relação ao rami, observa-se pelo gráfico de Pareto que apenas a variável teor é significativa, sendo o comprimento o que apresenta a menor significância entre as variáveis analisadas. Olhando para a superfície de resposta do rami, observa-se que para baixos teores o comprimento das fibras se mostra relevante, de forma que os maiores valores de módulo de elasticidade ocorrem para pequenos teores e elevados comprimentos; já em teores mais altos quase não há influência do comprimento.

Para o sisal, por sua vez, o gráfico de Pareto atua confirmando a análise anterior, a saber, que nenhuma das variáveis se mostrou significativa. Através da superfície de resposta é possível perceber, porém, que melhores valores de módulo de elasticidade ocorrem para elevados teores e comprimentos.

4.3. Módulo de resiliência

O módulo de resiliência é definido como sendo a capacidade que um corpo possui de absorver energia quando deformado elasticamente e se recuperar quando o carregamento é retirado, retornando assim ao seu estado original; logo, quanto maior o módulo de resiliência, maior a deformação elástica que o corpo consegue suportar. Os valores de média e desvio padrão encontrados nos ensaios para as fibras de rami e sisal então expressos nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

TABELA 10: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA RAMI

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Módulo de resiliência médio (KPa)	Desvio padrão
Ref.	0	0	7,27	1,31
EXP.1 / R 2-10	2	10	7,82	0,95
EXP.2 / R 2-20	2	20	5,72	0,71
EXP.3 / R 6-10	6	10	1,88	0,60
EXP.4 / R 6-20	6	20	2,68	1,44
EXP.5 / R 4-15 (C)	4	15	3,20	1,89
EXP.6 / R 4-15 (C)	4	15	3,24	0,27
EXP.7 / R 4-15 (C)	4	15	2,40	1,03
EXP.8 / R 4-15 (C)	4	15	2,44	0,65

FONTE: Autora

TABELA 11: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA SISAL

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Módulo de resiliência médio (KPa)	Desvio padrão
Ref.	0	0	7,27	1,31
EXP.1 / S 2-10	2	10	1,63	0,99
EXP.2 / S 2-20	2	20	2,43	1,28
EXP.3 / S 6-10	6	10	6,75	3,93
EXP.4 / S 6-20	6	20	8,43	2,83
EXP.5 / S 4-15 (C)	4	15	10,03	2,74
EXP.6 / S 4-15 (C)	4	15	7,32	1,31
EXP.7 / S 4-15 (C)	4	15	9,72	3,11
EXP.8 / S 4-15 (C)	4	15	8,44	0,22

FONTE: Autora

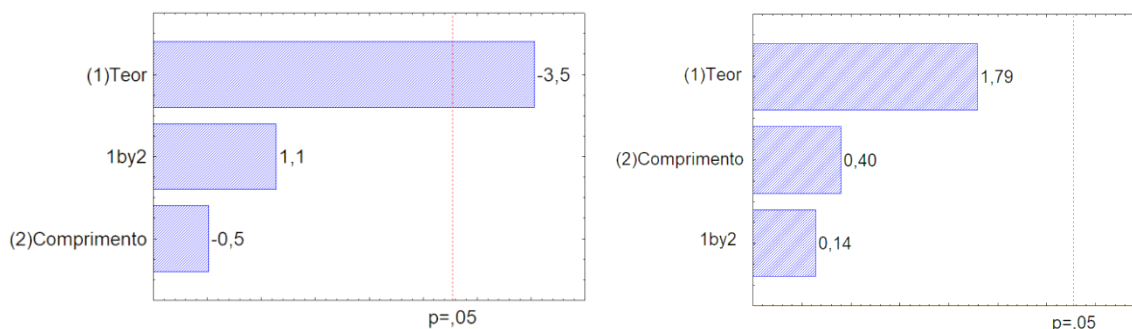
Para a fibra de rami, conforme visto na Tabela 10, apenas a formulação 1 apresentou valores de resiliência superiores à referência. Tal acréscimo, porém, foi pequeno, da ordem de

7%. Os demais valores foram todos inferiores à referência e seguiram a tendência vista para o módulo de elasticidade, de forma que os menores valores de módulo de resiliência foram observados para teores maiores de fibras. Quanto ao comprimento, novamente não se viu uma clara influência.

A fibra de sisal, por sua vez, apresentou maior módulo de resiliência para os pontos centrais, experimentos 5 a 8. Para baixos teores de fibra, os valores de módulo também são baixos, chegando a ser 77% inferior ao observado para a referência. Já nas formulações com 6% de teor, apesar de maiores, os valores de módulo ainda são inferiores à média observada nos pontos centrais, já que para estas últimas formulações o módulo de resistência chega a ser 37% superior à referência. Isto pode ser devido à queda na trabalhabilidade conforme aumento do teor, o que dificulta a uniformidade de distribuição das fibras junto à matriz e pode interferir no comportamento do compósito durante a deformação elástica.

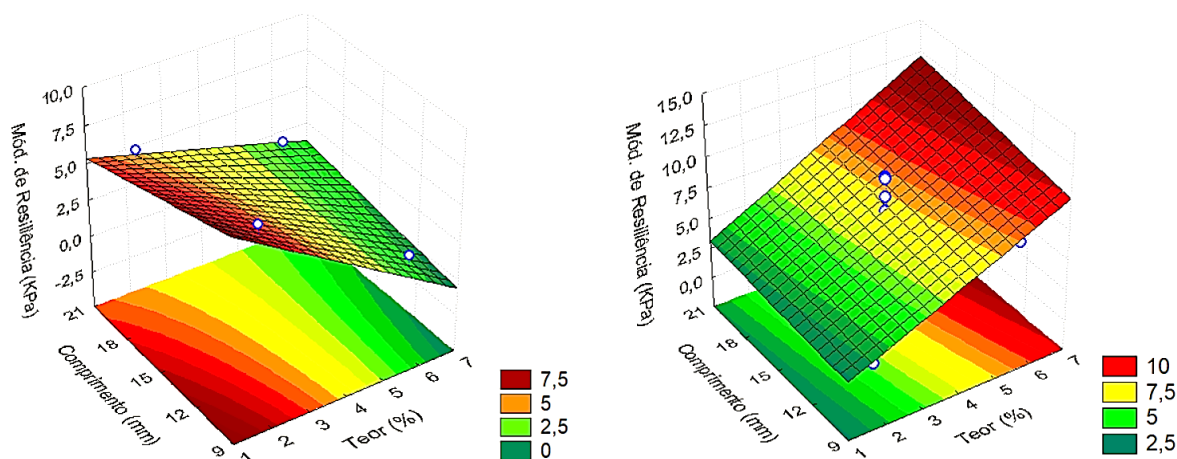
Prosseguindo com a análise, tem-se o gráfico de Pareto e a superfície de resposta para o módulo de elasticidade, descritos à partir das Figuras 17 e 18, respectivamente.

FIGURA 17: GRÁFICO DE PARETO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



FONTE: Autora

FIGURA 18: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



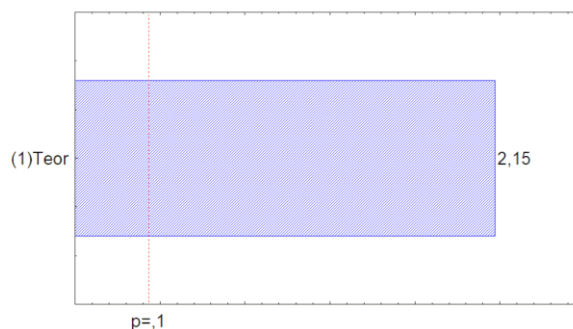
FONTE: Autora

Analisando em primeiro lugar a fibra de rami, através do gráfico de Pareto é possível perceber que, mais uma vez, apenas a variável teor se mostrou significativa; além disso, o valor negativo frente a essa variável indica seu aspecto inverso em relação ao módulo de resiliência, como também já havia sido observado nas propriedades anteriores. A superfície de resposta confirma a pouca influência do comprimento, à medida que atesta a relação entre teor e módulo de resiliência, indicando que maiores valores de módulo são observados para menores teores de fibra.

Para o sisal, o resultado evidenciado no gráfico de Pareto indica que nenhuma das variáveis estudadas se mostrou significativa. No entanto, ao analisar a superfície de resposta é possível ver que o teor exerce certa influência sobre o resultado de módulo de resiliência obtido. Além disso, observa-se no gráfico de Pareto que a variável teor ficou bem próxima à linha de referência, e, uma vez que as variáveis que a cruzam se mostram estatisticamente relevantes, optou-se por realizar uma nova análise.

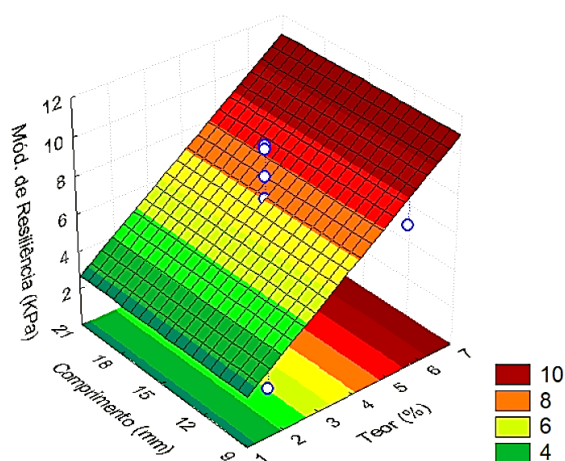
Para tanto, adotou-se a eliminação dos efeitos que estiveram na região de rejeição, a saber, o comprimento e a interação teor/comprimento. Ademais, alterou-se o nível de significância para 10%. Tal ajuste acarreta na diminuição da representatividade da regressão, de forma que a primeira análise não será descartada. O gráfico de Pareto e a superfície de resposta para essa nova situação estão respectivamente descritos pelas Figuras 19 e 20 abaixo.

FIGURA 19: GRÁFICO DE PARETO CORRIGIDO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA O SISAL



FONTE: Autora

FIGURA 20: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA CORRIDA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA O SISAL



FONTE: Autora

Percebe-se que com a eliminação das variáveis mencionadas, o teor de fibras passa a ser significativo. Dessa forma, é possível concluir que, apresentadas as ressalvas quanto à representatividade da regressão, quanto maior o teor, maior o valor de módulo de resiliência observado. É importante salientar, também, que com a eliminação das variáveis comprimento e interação teor/comprimento, a superfície de resposta foi modificada também, apresentando apenas a influência que o teor exerce sobre o resultado final.

4.4. Tenacidade

Como última propriedade analisada, a tenacidade diz respeito à relação entre a resistência e a ductilidade de um material a partir de sua capacidade de absorver energia até a fratura. Dessa forma, quanto mais tenaz o material for, menor sua fragilidade, de modo que se

faz importante observar aumento nos valores de tenacidade em compósitos geopoliméricos reforçados com fibras.

Para analisá-la, em conformidade ao que foi apresentado anteriormente, foram montadas tabelas que expressam a média e o desvio padrão para cada ensaio realizado. A Tabela 12 traz resultados para fibra de rami, enquanto a Tabela 13 os expressa para a fibra de sisal.

TABELA 12: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA TENACIDADE PARA RAMI

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Tenacidade média (J/m ²)	Desvio padrão
Ref.	0	0	250,24	41,57
EXP.1 / R 2-10	2	10	892,28	81,18
EXP.2 / R 2-20	2	20	806,88	27,53
EXP.3 / R 6-10	6	10	810,13	141,13
EXP.4 / R 6-20	6	20	729,86	156,42
EXP.5 / R 4-15 (C)	4	15	776,01	153,92
EXP.6 / R 4-15 (C)	4	15	1083,33	83,34
EXP.7 / R 4-15 (C)	4	15	1006,29	61,22
EXP.8 / R 4-15 (C)	4	15	1168,99	131,06

FONTE: Autora

TABELA 13: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA TENACIDADE PARA SISAL

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento da fibra (mm)	Tenacidade média (J/m ²)	Desvio padrão
Ref.	0	0	250,24	41,57
EXP.1 / S 2-10	2	10	1669,86	54,69
EXP.2 / S 2-20	2	20	1537,11	233,03
EXP.3 / S 6-10	6	10	3501,22	389,59
EXP.4 / S 6-20	6	20	4553,97	136,16
EXP.5 / S 4-15 (C)	4	15	2139,17	584,46
EXP.6 / S 4-15 (C)	4	15	2138,47	173,57
EXP.7 / S 4-15 (C)	4	15	2062,62	368,83
EXP.8 / S 4-15 (C)	4	15	2011,88	33,99

FONTE: Autora

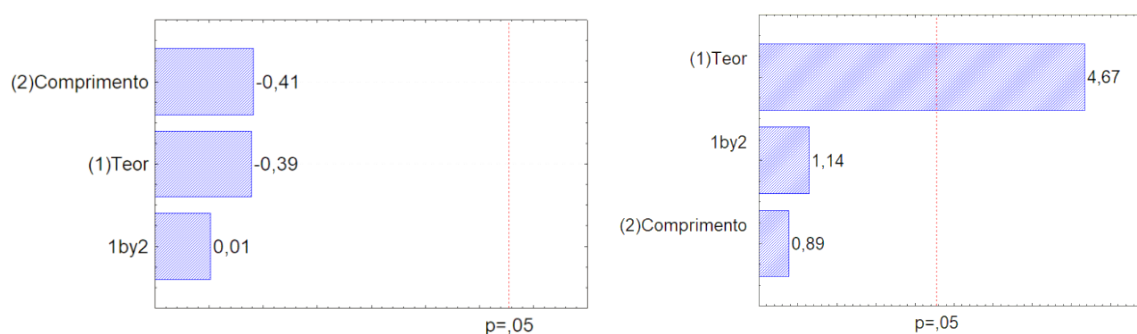
Os valores médios de tenacidade tanto para a fibra de rami quanto para a fibra de sisal expressam que a tenacidade sofreu significativa melhora em relação à formulação de referência, comprovando o que já se era esperado. Para o rami, os melhores resultados foram observados nos pontos intermediários, sendo estes até quatro vezes maiores que a referência. O comportamento da tenacidade nos extremos, porém, apenas sofreu influência do comprimento,

de modo que quanto menor o valor apresentado por esta variável, mais tenazes os corpos de prova se tornaram.

Para o sisal, os valores de tenacidade foram ainda melhores. Além disso, nesta fibra é possível observar a influência que a variável teor exerce no resultado. Para teores de 2%, a tenacidade chega a ser 6 vezes maior que a observada para a formulação de referência, aumentando de forma que, para o teor máximo analisado esta correspondeu a 18 vezes a tenacidade de referência.

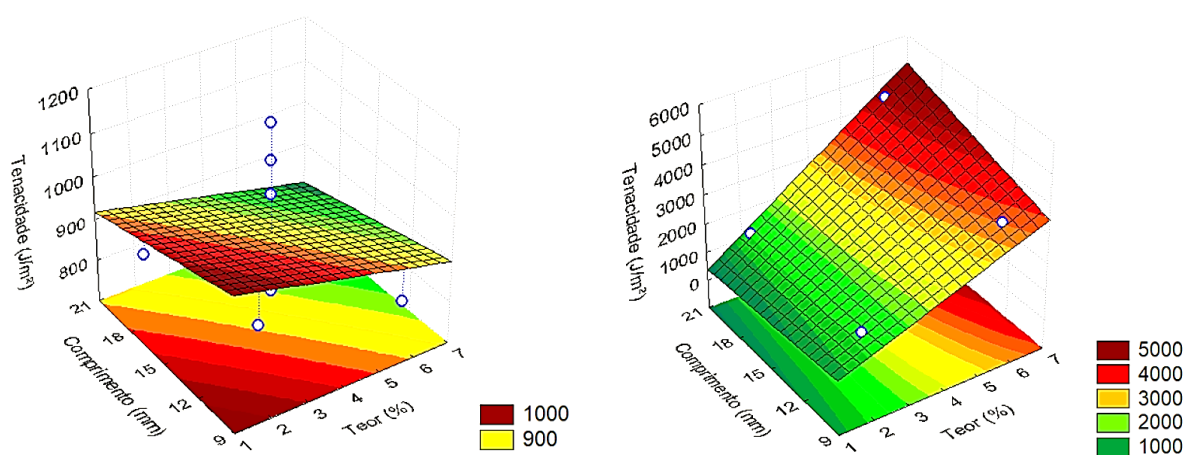
Com o fim de verificar a significância e influência das variáveis, seguiu-se com a análise do gráfico de Pareto e da superfície de resposta, expressos Figuras 21 e 22, respectivamente.

FIGURA 21: GRÁFICO DE PARETO DA TENACIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



FONTE: Autora

FIGURA 22: SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA TENACIDADE PARA FIBRAS DE RAMI (ESQUERDA) E SISAL (DIREITA)



FONTE: Autora

Em relação à fibra de rami, o gráfico de Pareto atesta que não há influência significativa de nenhuma das variáveis estudadas. Ademais, todas as variáveis se mostraram inversamente

proporcionais à tenacidade. Ao analisar a superfície de resposta comprova-se o que é visto através do gráfico de Pareto, uma vez que a superfície é quase horizontal, com exceção de uma pequena inclinação, a qual indica que menores valores de comprimento e teor de fibra resultam em melhores resultados de tenacidade.

Para o sisal, em contrapartida, através da observação do gráfico de Pareto é possível concluir que apenas a variável teor apresenta significância, além de indicar que todas as variáveis são diretamente proporcionais ao resultado. Este fato é atestado através da superfície de resposta, a qual indica que maiores valores de comprimento e teor resultam em elevada tenacidade.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados compósitos de matriz geopolimérica, à base de metacaulim e reforçados com fibras vegetais de rami e sisal, objetivando a melhoria das propriedades mecânicas do geopolímero. Deve-se salientar, no entanto, que os resultados aqui apresentados expressam apenas uma predisposição quanto ao comportamento dos compósitos frente às propriedades avaliadas, uma vez que, por se trabalhar com fibras vegetais que, em si, apresentam elevada variação em suas propriedades, seria necessário um número maior de ensaios a fim de complementar e atestar os resultados obtidos.

Posto isto, conclui-se que:

- Para ambas as fibras, a variável comprimento não apresentou significância estatística em nenhuma das propriedades mecânicas avaliadas, indicando que pequenas variações no comprimento das fibras, como é o caso do estudo, não influenciam no resultado.
- Para compósitos reforçados com fibras de sisal, conclui-se que a variável teor é significativa e se relaciona de forma diretamente proporcional às propriedades mecânicas módulo de ruptura e tenacidade do compósito, apresentando valores máximos de 5,25 MPa e 4553,97 J/m² para as propriedades mencionadas, respectivamente.
- Ainda em relação às fibras de sisal, quanto ao módulo de resiliência e ao módulo de elasticidade, uma vez que estes investigam o comportamento do compósito na fase elástica, observou-se que os melhores resultados foram obtidos para as formulação centrais, indicando que teores elevados, ao influenciar na trabalhabilidade do compósito, afetam também a uniformidade das misturas e, portanto, o módulo de elasticidade dos compósitos. Para que haja uma comprovação deste fato, no entanto, uma vez que o planejamento fatorial com dois níveis supõe uma linearidade nos efeitos, é necessário empregar um modelo de segunda ordem através do planejamento do composto central, por meio do qual é possível obter superfícies de resposta curvas que representem torções no plano. Todavia, em uma análise mais simples do módulo de resiliência dadas as ferramentas disponíveis, foi possível observar significância da variável teor ao eliminar as demais variáveis.
- Compósitos reforçados com fibras de rami, por sua vez, apresentaram comportamento adverso do esperado. Apenas para a tenacidade não foi observada

variável significativa, para as demais propriedades foi atestado que apenas o teor de fibras era relevante estatisticamente. A relação de proporcionalidade entre o teor e as propriedades, no entanto, foi oposta ao resultado que pretendia-se alcançar, uma vez que as propriedades tinham seus valores reduzidos à medida que o teor de fibras era acrescido. A explicação para este fato pode se encontrar no método de saturação das fibras, haja visto que o rami apresenta elevada área superficial, o que acarreta maior adesão de água na superfície da fibra. Sendo assim, faz-se necessário ter superior cuidado durante o processo de saturação a fim de que não seja acrescentada água na mistura, a qual prejudica as propriedades mecânicas dos compósitos, uma vez que deixa a matriz mais porosa.

- Por último, é observado que maiores teores, apesar de no caso da fibra de sisal terem apresentado bons resultados para algumas propriedades mecânicas, influenciaram na trabalhabilidade da mistura, o que acarreta má distribuição das fibras e, conseqüentemente, comportamento não uniforme entre corpos de prova de uma mesma formulação.

Embasado nos resultados apresentados, sugere-se para trabalhos posteriores o estudo de metodologias alternativas para saturação das fibras de rami. Ademais, propõe-se a análise fatorial com planejamento composto central, de forma a gerar superfícies de resposta de segunda ordem que esclareçam a influência do elevado teor de fibras na trabalhabilidade da mistura e decorrente prejuízo à fase elástica do compósito. Por fim, sugere-se ensaios em estado fresco do geopolímero reforçado com fibras, procurando obter boa relação entre trabalhabilidade e propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. C. S. **Geopolímero à Base de Metacaulim com Adição de Fibras de Sisal**. Orientador: Prof.^a Dr.^a Leila Aparecida de Castro Motta. 2018. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22804>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e na compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BLEDZKI, A. K.; REIHMANN, S.; GASSAN, J. **Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 59, n. 8, p. 1329–1336, 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960222\)59:8%3C1329::AID-APP17%3E3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960222)59:8%3C1329::AID-APP17%3E3.0.CO;2-0)>, acesso em 08 de out. de 2020.

BORTOLINI, Juliano. **Estudo De Experimentos Fatoriais 2k Aplicados Em Um Processo Industrial**. Orientador: Dr. Marcelo Silva de Oliveira. 2012. 144 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária,) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/380>. Acesso em: 11 nov. 2020.

CALLEGARO, Rafael Frizzo. **Uma Arquitetura Para Fusão De Dados De Sensores De Baixo Custo Em Redes De Sensores Sem Fio**. Orientador: Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes. 2014. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129459>. Acesso em: 18 nov. 2020.

DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer Cement a review**. *Geopolymer Science and Technics*, n. November, p. 1–11, 2013. Disponível em: <www.geopolymer.org>.

FIGUEIREDO, Antonio D. **Concreto com fibras**. *Concreto: Ciência e Tecnologia*, n. 37, p. 36, 2011. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/293811669>>.

FREIRE, Eleusio Curvêlo; MEDEIROS, José da Cunha; ANDRADE, Francisco Pereira.

Circular Técnica, n° 22, EMBRAPA. **Cultura Do Rami No Agreste Nordestino**, Campina Grande, PB, set. 1996. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/33340/1/CULTURA-DO-RAMI.pdf>>
Acesso em 20 set. 2020

FILHO, Nivaldo T.de Arruda *et al.* **Mechanical resistance of lightweight cement composites utilizing industrial residues and fibers of sisal**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 8, p. 894–902, 2012.

JAWAID, M.; ABDUL KHALIL, H. P.S. **Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review**. *Carbohydrate Polymers*, v. 86, n. 1, p. 1–18, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>>.

JOSEPH, Kuruvilla; MEDEIROS, Eliton S.; CARVALHO, Laura H. **Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal**. *Polímeros*, São Carlos, v. 9, n. 4, p. 136-141, dez.1999. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14281999000400023&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 12 ago. 2020.

LEITE, Mônica; DAL MOLIN, Denise. **Avaliação Da Atividade Pozolânica Do Material Cerâmico Presente No Agregado Reciclado De Resíduo C&D**. *Sitientibus*, Feira de Santana, n. 26, p. 111-130, jan. 2002. Disponível em: <http://www2.uefs.br:8081/sitientibus/pdf/26/avaliacao_da_atividade_pozolanica.pdf>
Acesso em: 30 nov. 2020.

LI, Chao; SUN, Henghu; LI, Longtu. **A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements**. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>>.

MATSUNAGA, Toyoki; SATO, Yuto; GODA, Koichi. **Major cause of strength improvement of a ramie/PA composite with low fiber contents**. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, v. 1, n. 1, p. 93–98, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.08.002>>.

METACAULIM DO BRASIL **Estudo da influência do Metacaulim HP como adição de alta**

eficiência em concretos de cimento Portland [2003]. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/pdf/metacaulim-hp-usp.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

PALOMO, A. et al. A review on alkaline activation: New analytical perspectives. **Materiales de Construcción**, v. 64, n. 315, 2014.

PORTELA, Gleicyanne Oliveira de Souza. **Compósito geopolimérico reforçado com tecido de juta**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

RAJU, Arun; SHANMUGARAJA, M. **Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review**. *Materials Today: Proceedings*, n. xxxx, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.141>>.

RANJBAR, Navid; ZHANG, Mingzhong. **Fiber-reinforced geopolymer composites: A review**. *Cement and Concrete Composites*, v. 107, n. February 2019, p. 103498, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>>.

SOARES, I. M. **Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de Geopolímero a Partir de Metacaulim Ativado**. Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Maria Teresa Paulino Aguilar. 2013. 104 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS-9D2MYP/1/disserta_ao_mestrado_erica.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2020.