

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**JOÃO GABRIEL RIBEIRO DE PINA
LEONARDO RIBEIRO LEAL**

ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS GEOPOLÍMEROS

**Rio de Janeiro
2021**

JOÃO GABRIEL RIBEIRO DE PINA
LEONARDO RIBEIRO LEAL

ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS GEOPOLÍMEROS

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof.^a Orientadora: Lais Alves

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

P645 Pina, João Gabriel Ribeiro de
Estudo do módulo de elasticidade dos geopolímeros / João
Gabriel Ribeiro de Pina [e] Leonardo Ribeiro Leal – 2021.
59f.: il. color., enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.

Bibliografia: f. 58-59

Orientadora: Lais Amaral Alves

1. Engenharia Mecânica. 2. Polímeros. 3. Polímeros – Normas.
4. Engenharia de materiais. I. Alves, Lais Amaral (Orient.).
II. Leonardo Ribeiro Leal. III. Título.

CDD 620.1

RESUMO

Devido à dificuldade enfrentada nos dias atuais com questões relacionadas à poluição ambiental, sobretudo na indústria de materiais, os geopolímeros surgem como uma alternativa ao cimento Portland por apresentarem boas propriedades mecânicas, como a alta resistência. O objetivo desse trabalho foi contribuir para a elaboração de uma norma para o módulo de elasticidade do material geopolimérico tendo como base um suporte na formulação matemática do módulo de elasticidade para o concreto de normas já existentes (ABNT NBR 6118/2014, Fib Code 2010, Eurocode 2/2004 e ACI 318/2005). Para tal, se teve o apoio de dados experimentais de um ensaio de compressão de Lopes e Paes (2019) e, assim sendo, foi possível obter resultados comparativos entre as formulações das diferentes normas, podendo também, a partir dos resultados, fazer comparações entre o geopolímero e o concreto.

Palavras-chave: Geopolímeros. Compósitos. Normas. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Due to the difficulty faced nowadays with issues related to environmental pollution, especially in the materials industry, geopolymers emerge as an alternative to Portland cement because they have good mechanical properties, such as high strength. The objective of this work was to contribute to the development of a standard for the modulus of elasticity of gelpolymeric material based on the mathematical formulation of the modulus of elasticity for concrete from existing standards (ABNT NBR 6118/2014, Fib Code 2010, Eurocode 2/2004 and ACI 318/2005). To this end, we had the support of experimental data from a compression test by Lopes and Paes (2019) and, therefore, it was possible to obtain comparative results between the formulations of different standards.

Keywords: Geopolymers. Composites. Standards. Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Estrutura dos Polisialatos.....	10
Figura 2:	Gráficos moleculares computadorizados de poli (sialato) polimérico Mn - (- Si-O-Al-O-) n e Mn - (-Si-O-Al-O-Si-O-) n poli (sialato-siloxo) e estruturas relacionadas.....	11
Figura 3:	Processo de geopolimerização exotérmica.....	13
Figura 4:	Representação esquemática de diferentes características geométricas e espaciais das partículas que compõem a fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: a) concentração, b) tamanho, c) forma, d) distribuição e e) orientação.....	17
Figura 5:	Classificações de compósitos.....	18
Figura 6:	Padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra sujeita à aplicação de uma carga trativa.....	19
Figura 7:	Perfis tensão-posição relacionados ao comprimento da fibra. A) $l = l_c$; b) $l > l_c$ e c) $l < l_c$	20
Figura 8:	Representação de diferentes arranjos de fibras: a) contínuas e alinhadas, b) descontínuas e alinhadas e c) descontínuas e aleatoriamente alinhadas.....	21
Figura 9:	Gráfico Tensão x Deformação do aço.....	23
Figura 10:	Gráfico Tensão x Deformação concreto.....	26
Figura 11:	Representação esquemática da relação tensão-deformação para estruturas de análise (o uso $0,4f_{cm}$ para a definição de E_{cm} é aproximado)	28
Figura 12:	Falha de material. a) dúctil e b) frágil.....	32
Figura 13:	Componentes do Cimento GP-1818. a) Pó precursor e b) líquido ativado.....	35
Figura 14:	CPs do GP-1818 feitos com molde de ferro.....	36
Figura 15:	CP do GP-1818 com molde de PVC.....	36
Figura 16:	Molde de PVC.....	38
Figura 17:	CPs com 1 dia. Sem fibra, 1% de fibra, 2% de fibra e CP de teste, respectivamente.....	39

Figura 18:	CPs com 7 dias. Sem fibra; 1% de fibra; 2% de fibra, respectivamente.....	39
Figura 19:	CPs com 14 dias. Sem fibra, 1% de fibra e 2% de fibra, respectivamente.....	40
Figura 20:	Pesagem das fibras de juta.....	41
Figura 21:	Máquina de ensaios universais MTS.....	42
Figura 22:	Corpo de Prova posicionado na máquina de ensaio.....	43
Figura 23:	Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 1 dia de cura.....	45
Figura 24:	Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 7 dias de cura.....	46
Figura 25:	Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 14 dias de cura.....	46
Figura 26:	Gráfico comparativo do módulo de elasticidade encontrado utilizando as diferentes normas mencionadas.....	52
Figura 27:	Gráfico comparativo do módulo de elasticidade estipulado para o concreto e para o geopolímero com 1% de fibra utilizando a norma NBR 6118.....	53
Figura 28:	Gráfico comparativo do módulo de elasticidade estipulado para o concreto e para o geopolímero com 2% de fibra utilizando a norma NBR 6118.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Razão atômica dos compostos das matrizes de cimento geopolimérico	12
Tabela 2 -	Energia necessária em MJ/Ton.....	12
Tabela 3 -	Emissão de gases de efeito estufa em toneladas.....	13
Tabela 4 -	Aplicações do geopolímero conforme a razão Si/Al.....	14
Tabela 5 -	Resistência à compressão em concretos GC e HPC após distintos períodos de cura.....	15
Tabela 6 -	Tipos de agregados no concreto.....	31
Tabela 7 -	Composição química do GP-1818 e do Novo Material.....	37
Tabela 8 -	Resultado do geopolímero sem fibra.....	44
Tabela 9 -	Resultados do compósito de geopolímeros com 1% de fibra.....	44
Tabela 10 -	Resultados do compósito de geopolímero com 2% de fibra.....	44
Tabela 11 -	Valores de Módulo de elasticidade (E_{ci}) do geopolímero sem fibra (NBR 6118/2014)	47
Tabela 12 -	Valores de Módulo de elasticidade (E_{ci}) do geopolímero com 1% de fibra (NBR 6118/2014)	48
Tabela 13 -	Valores do Módulo de elasticidade (E_{ci}) do geopolímero com 2% de fibra (NBR 6118/2014)	48
Tabela 14 -	Valores das secantes dos Módulos de elasticidade (E_{cm}) dos geopolímeros sem fibra.....	48
Tabela 15 -	Valores das secantes dos Módulos de elasticidade (E_{cm}) dos geopolímeros com 1% fibra.....	49
Tabela 16 -	Valores das secantes dos Módulos de elasticidade (E_{cm}) dos geopolímeros com 2% fibra.....	49
Tabela 17 -	Valores dos Módulos de elasticidade (E_c) dos geopolímeros sem fibra.....	49

Tabela 18 -	Valores do Módulos de elasticidade (E_c) dos geopolímeros com 1% fibra.....	50
Tabela 19 -	Valores do Módulos de elasticidade (E_c) dos geopolímeros com 2% fibra.	50
Tabela 20 -	Valores dos Módulos de elasticidade (E_{ci}) dos geopolímeros sem fibra.....	51
Tabela 21 -	Valores do Módulos de elasticidade (E_{ci}) dos geopolímeros com 1% fibra.....	51
Tabela 22 -	Valores do Módulos de elasticidade (E_{ci}) dos geopolímeros com 2% fibra.....	51
Tabela 23 -	Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica do concreto.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	JUSTIFICATIVA	7
1.2	OBJETIVO	7
1.3	METODOLOGIA	8
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	8
2	QUÍMICA DOS GEOPOLÍMEROS	10
2.1	PROPRIEDADES DOS GEOPOLÍMEROS	14
2.1.1	Formas de aplicação	16
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS	16
2.2.1	Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras	18
2.2.1.1	Influência do comprimento da fibra	19
2.2.1.2	Influência da orientação e da concentração da fibra	20
2.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE	21
2.3.1	Módulo de elasticidade para o concreto	25
2.3.1.1	NBR 6118/2004	25
2.3.1.2	EUROCODE 2/2004	27
2.3.1.4	ACI 318/2005	29
2.3.1.5	Fib MODEL CODE 2010	30
2.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	GEOPOLÍMERO	Error! Bookmark not defined.
3.1.1	Preparação dos corpos de prova	37
3.1.2	Fibra de Juta	40
3.2	REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO	41
3.3	RESULTADOS OBTIDOS	43

4	ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA O GEOPOLÍMERO	46
4.1	NORMA NBR 6118/2014.....	47
4.2	NORMA EUROCODE 2/2004	48
4.3	NORMA ACI 318/2005	50
4.4	CÓDIGO MODELO FIB 2010.....	50
4.5	ANÁLISE COMPARATIVA	51
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas que o mundo enfrenta nos dias de hoje é a poluição ambiental. Na indústria de materiais principalmente a produção de cimento Portland causará emissão de poluentes que resultarão em poluição ambiental. A emissão de dióxido de carbono durante a produção do cimento Portland comum é enorme porque a produção de uma tonelada de cimento Portland emite aproximadamente uma tonelada de CO_2 na atmosfera (MC CAFFREY, 2002).

Os geopolímeros apresentam perspectivas promissoras para aplicação na indústria do concreto como aglutinantes alternativos para o cimento Portland devido à sua menor emissão de CO_2 na atmosfera, além de apresentarem boas propriedades mecânicas (PROVIS et al, 2007).

Davidovits (1994) propôs que um líquido alcalino poderia ser usado para reagir com o silício e o alumínio em um material de origem geológica ou em materiais subprodutos, como cinzas volantes, escórias de alto-forno e cinza da casca de arroz para a produção de ligantes. Devido ao fato de ocorrer uma reação química de polimerização, Davidovits cunhou o termo “geopolímero” para representar estes aglutinantes.

Segundo Davidovits (1994), materiais geopoliméricos têm uma ampla gama de aplicações no campo das indústrias como na automobilística, aeroespacial, fundições, metalurgia, engenharia civil e indústrias de plásticos. O tipo de aplicação do geopolímero é determinado pela estrutura química em termos da razão atômica Si:Al no polissialato. Para aplicações na área de construção civil, por exemplo, uma baixa relação Si:Al é adequada.

Propriedades mecânicas do geopolímero como resistência a compressão e trabalhabilidade do concreto são influenciadas pelas proporções e propriedades dos materiais que constituem o geopolímero. Por exemplo: maiores concentrações (em termos molares) de solução de hidróxido de sódio resultam em maiores valores de resistência a compressão do concreto geopolimérico e conforme a razão molar H_2O para Na_2O aumenta, a resistência a compressão diminui (HADJITO e RANGAN, 2005).

Além da influência dos constituintes nas propriedades mecânicas do geopolímero, a cura também é um fator de influência nestas mesmas propriedades. O tempo e a temperatura de cura influenciam na resistência a compressão do

concreto. Tempos mais longos de cura melhoram a polimerização, resultando em maiores resistências à compressão, porém a taxa de aumento de resistência é mais rápida até 24 horas de tempo de cura, além desse tempo o ganho de resistência é apenas moderado, gerando como conclusão que o tempo de cura não precisa ser maior do que 24 horas em aplicações práticas. Esta cura pode ser realizada a vapor ou a seco, com a cura a seco resultando em resistências a compressão superiores em 15% das obtidas por meio da cura a vapor (HADJITO e RANGAN, 2005).

1.1 JUSTIFICATIVA

O módulo de elasticidade de um material é uma das principais propriedades mecânicas analisadas na realização de projetos de estruturas. Tal importância se justifica pela relação das forças atuantes em um material com a consequente deformação que o material sofre. Uma correta análise do módulo de elasticidade, proporciona a escolha adequada de um material a ser utilizado em uma determinada estrutura, garantindo que não ocorrerão patologias estruturais, como por exemplo, fissuras e trincas.

No contexto global atual de desenvolvimento de tecnologias e materiais mais sustentáveis, menos agressivos ao meio ambiente, os geopolímeros aparecem como alternativas interessantes, devido a seu processo de fabricação ser menos poluente do que o processo de fabricação do cimento Portland, que é o mais utilizado em aplicações na construção civil.

Pelo fato de ser uma tecnologia recente, se faz necessário realizar estudos mais detalhados com enfoque nas propriedades físicas e mecânicas deste material para assim avaliar para quais tipos de aplicações este material pode ser adequado.

1.2 OBJETIVO

Pelo fato de os geopolímeros ainda não possuírem normas técnicas que regulamentem suas possíveis aplicações, este presente trabalho propôs realizar uma análise do módulo de elasticidade, obtido por meio das normas técnicas NBR 6118/2004, EUROCODE 2/2014, ACI 318/2005 e FIB MODEL CODE 2010, que são as mais utilizadas para projeto de estruturas de concreto, além de sugerir a utilização de uma destas normas para reger projetos de estruturas de geopolímeros.

1.3 METODOLOGIA

Para maior embasamento teórico e maior domínio das técnicas de análise utilizadas, fez-se necessário consulta a livros, dissertações, artigos e pesquisas desenvolvidas que propiciassem informações valiosas que agregassem a este trabalho.

As amostras utilizadas neste trabalho foram preparadas pelos autores Lopes e Paes (2019) no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) do CEFET/RJ seguindo a proporção recomendada da mistura para a produção do geopolímero e posteriormente moldadas em formas cilíndricas adequadas ao teste de compressão. três amostras foram preparadas por dia com quantidades de fibra distintas, resultando em nove corpos de prova que posteriormente foram utilizados nas análises. A desmoldagem dos corpos de prova ocorreu após um dia e a cura foi realizada ao ar ambiente até a data estipulada para a testagem.

Foi realizada análise química em ambos os materiais no LADES para determinação dos componentes e consequente comparação de amostras. Foram realizados ensaios mecânicos de compressão utilizando as instalações do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM), localizado na PUC-RIO para obtenção dos resultados do teste de resistência à compressão para posterior análise.

Com a obtenção destes dados, partiu-se para o cálculo do módulo de elasticidade de cada corpo de prova conforme as normas NBR 6118/2004, EUROCODE 2/2014, ACI 318/2005 e FIB MODEL CODE 2010. Após a conclusão dos cálculos dos módulos de elasticidade, os resultados obtidos foram analisados e comparados. Por fim, foram apontadas possíveis razões para os diferentes valores obtidos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo aborda a apresentação do tema, com introdução, justificativa, objetivo, metodologia e organização do trabalho.

No segundo capítulo é realizada a revisão bibliográfica, apresentando o que são geopolímeros, suas características, constituintes e propriedades. Os materiais compósitos também são descritos, apresentando sua definição e constituição, além de se destacar a importância da inserção do reforço fibroso, discutindo a adição de

fibras naturais, em especial a fibra de juta. Também são citadas algumas aplicações dos geopolímeros, além de uma revisão a respeito do teste de compressão.

O terceiro capítulo engloba os materiais utilizados, métodos de preparo que foram realizados para obtenção da mistura e posterior corpo de prova, informações a respeito dos ensaios de compressão que esses corpos foram submetidos e as normas referentes à módulo de elasticidade que foram utilizadas neste estudo.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos, as discussões, além da análise destes resultados.

O quinto capítulo é referente a conclusão deste trabalho sendo seguida pela sugestão para trabalhos futuros e pelas referências bibliográficas.

2 QUÍMICA DOS GEOPOLÍMEROS

Os ligantes de alumino-silicato são chamados de compostos geopolímeros inorgânicos, uma vez que o cimento geopolimérico obtido é o resultado de uma reação de policondensação orgânica, a chamada geopolimerização. Essas reações produzem estruturas tridimensionais de tecto-aluminossilicato com a seguinte fórmula empírica geral: $Mn[-(SiO_2)_z - AlO_2]1_n \times wH_2O$, em que M é um cátion (K, Na, Ca) e n é o grau de policondensação. Essas estruturas são chamadas de polissialates, onde sialato significa unidade de construção de oxo-aluminato de silício. A rede de sialato consiste em tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados por compartilhamento de todos os átomos de oxigênio (DAVIDOVITS, 1994).

O nome “Polissialato” foi sugerido para a designação química dos geopolímeros a base de silício e alumínio. Sialato é uma abreviação para a estrutura denominada de silicooxo-aluminato. A rede de sialato é uma unidade básica, formada através da união das moléculas de silicato (SiO_4) e de aluminato (AlO_4), que quando combinada em repetição dá origem aos polissialatos (DAVIDOVITS, 1994). Como pode ser observado na Figura 1 e na Figura 2 dependendo da proporção Si/Al, as redes recebem nomenclaturas diferentes.

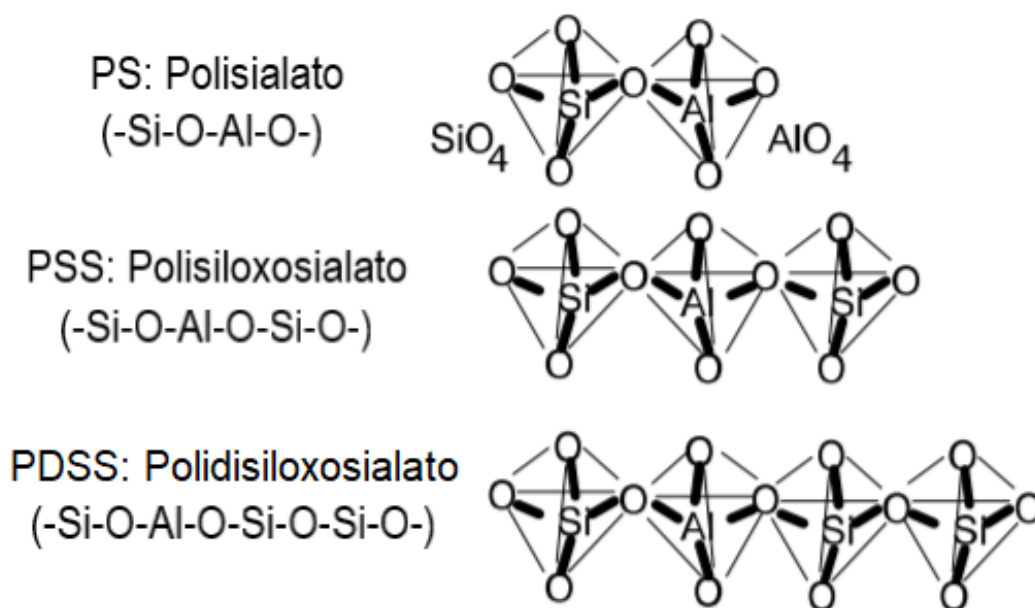


Figura 1: Estrutura dos Polissialatos.

Fonte: adaptado de DAVIDOVITS, 1994

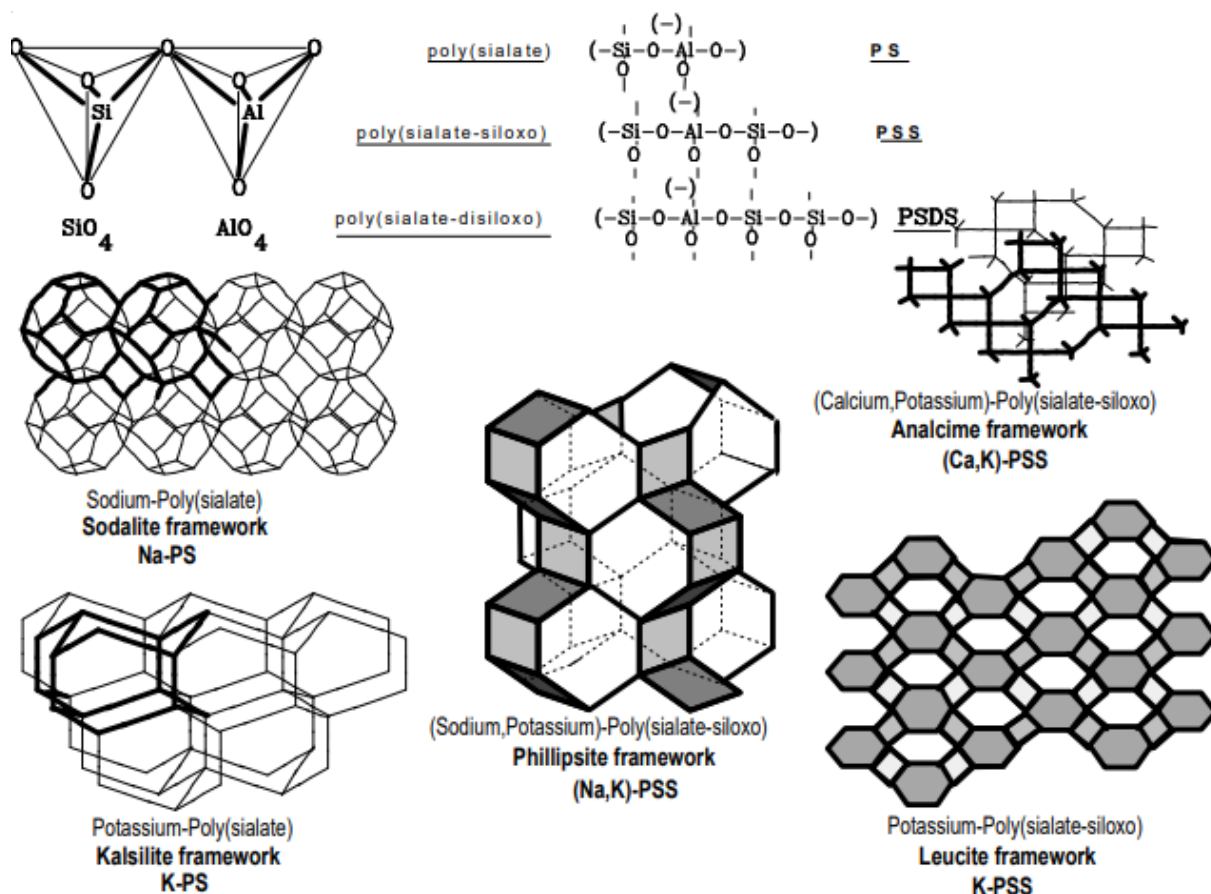


Figura 2: Gráficos moleculares computadorizados de poli (sialato) polimérico Mn - (-Si-O-Al-O-) n e Mn - (-Si-O-Al-O-Si-O-) n poli (sialato-siloxo) e estruturas relacionadas.

Fonte: Alkaline Cements and Concretes, KIEV Ukraine, 1994.

A nova terminologia foi importante para o sucesso no desenvolvimento de novos materiais. Para o usuário de alta tecnologia, os geopolímeros e, portanto, por analogia com os polímeros orgânicos derivados do petróleo, são transformados, sofrem policondessação e fixam rapidamente em baixa temperatura, em poucos minutos. Mas são, além disso, geopolímeros, inorgânicos, duros, estáveis, à temperatura de até 1250°C, não inflamáveis. (DAVIDOVITS, 1988)

Minerais de silicato comuns de acordo com a terminologia usada acima são sialatos policondensados. Nesse sentido, a maior parte da crosta terrestre é composta por siloxossialatos e sialatos. De acordo com esta terminologia, a série albita-anortita comum do feldspato pode ser descrita como poli. (DAVIDOVITS, 2005)

Como pode ser reparado, a estrutura química dos geopolímeros pode gerar diferentes tipos de formações e influenciar diretamente em suas aplicações. Nesse

sentido, a formação do material é feita com a correta quantidade de cada elemento no que depender de sua utilização.

O mecanismo químico não envolve a dissolução de todos os ingredientes reativos, mas a criação de novas matrizes que interagem com a superfície das cargas reativas de alumínio-silicato. A composição química dessas matrizes cimentícias é mais complicada que a das resinas de geopolímero puras. A análise do micro feixe de elétrons fornece a composição química e, o valor médio dessas medições fornece, através da Tabela 1, as seguintes razões atômicas (DAVIDOVITS, 2005).

Tabela 1 - Razão atômica dos compostos das matrizes de cimento geopolimérico.

Composto químico	Valor médio observado	Valor mínimo observado	Valor máximo observado
Si/Al	2,854	2,047	5,57
K/Al	0,556	0,306	0,756
Si/K	6,13	3,096	9,681
Ca/Al	0,286	0,17	0,401
Si/Ca	15,02	4,882	41,267

Fonte: DAVIDOVITS, 2005

É interessante comparar as necessidades de energia (Tabela 2), bem como as emissões de CO₂ (Tabela 3) de gases de efeito estufa dos cimentos portland tradicionais em relação a este novo tipo de cimento geopolimérico.

Tabela 2 - Energia necessária em MJ/Ton

Tipo	Calcinação (MJ/ton)	Esmagamento (MJ/ton)	Total	Emissão de gases (ton)
Portland Cement	3200	430	3430	1,00
Geopolímero	600	390	990	0,15 – 0,20

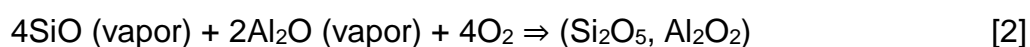
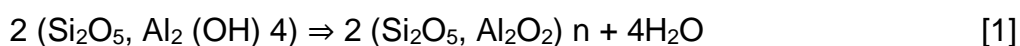
Fonte: DAVIDOVITS, 2005

Tabela 3 - Emissão de gases de efeito estufa em toneladas.

Tipo	Emissão de gases (ton)
Portland Cement	1,00
Geopolímero	0,15 – 0,20

Fonte: DAVIDOVITS, 2005

Um mecanismo de endurecimento, entre outros, envolve a reação química do geopoliméricos precursores, como óxidos de alumino-silicato (Al_3 + em coordenação IV) com polissilicatos alcalinos produzindo ligações Si-O-Al poliméricas. A fim de enfatizar a coordenação de dobra IV de Al, geralmente escrever $(Si_2O_5, Al_2O_2)_n$ para estes óxidos de silicato de alumino em vez de $(2SiO_2, Al_2O_3)$. fabricação de $(Si_2O_5, Al_2O_2)_n$ é realizada [1] por calcinação de hidróxidos de silicato de alumino ($Si_2O_4, Al_2(OH)_4$), ou [2] por condensação de vapores de SiO e Al_2O [14]:



A geopolimerização é exotérmica e pode ser esquematizada como segue na Figura 3. Pode ser considerado como o resultado da policondensação de monômeros ainda hipotéticos, os íons ortossilato:

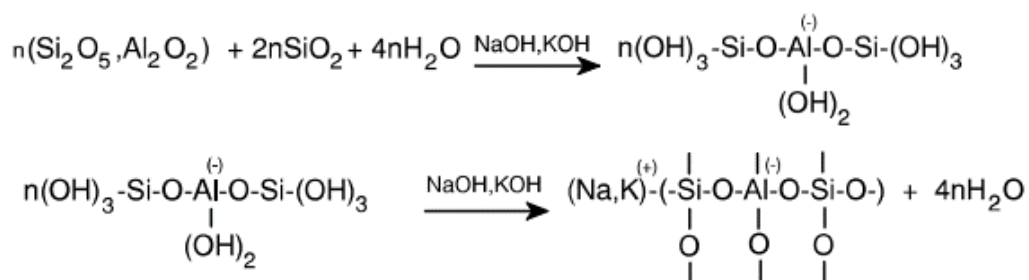


Figura 3: Processo de geopolimerização exotérmica.

Fonte: DAVIDOVITS, 2005

Foi assumido que as sínteses são realizadas através de oligômeros (dímero, trímero) que fornece as estruturas unitárias reais do edifício macromolecular tridimensional, deixando assim a estrutura mais compacta.

2.1 PROPRIEDADES DOS GEOPOLÍMEROS

No processo de reação, o aluminossilicato e o líquido ativador afetam diretamente o produto final. O primeiro possui efeito na dissolução e reação subsequente, enquanto o segundo dissolve o material sólido, determina a ruptura e recombinação da estrutura do aluminossilicato, a policondensação e balanço de carga do sistema de reação (DUXSON et. al., 2005).

Geopolímeros exibem uma ampla gama de propriedades e características que os tornam adequados para diversas aplicações, dependendo das matérias-primas utilizadas na síntese de polímeros (KAPS & BUCHWALD, 2002; ŽIVICA, 1993). Vale ressaltar, que as propriedades dos geopolímeros estão atreladas à relação sílica/alumina, como pode ser visto na tabela 4:

Tabela 4 - Aplicações do geopolímero conforme a razão Si/Al.

Razão Si/Al	Aplicações
≥ 1	-Tijolos -Cerâmica -Proteção de Fogo
≥ 2	- Cimentos e concretos com baixa emissão de gás carbônico - Encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos
$= 3$	- Compósitos com fibra de vidro para proteção ao fogo - Equipamentos de fundição - Compostos resistentes ao calor, de 200 a 1000 °C - Ferramentas para aeronáutica
> 3	- Selantes para a indústria, de 200 a 600 °C - Ferramentas para a aeronáutica
20-35	-Compósitos com fibra resistentes ao calor e ao fogo

Fonte: Adaptado de PANIAS e GIANNOPOULOU (2004) *apud* ALVES (2018).

Tendo em vista a importância da relação Al-Si na solução alcalina e da reação de polimerização, é de se esperar que essas características possam afetar a organização microestrutural e assim, influenciar nas propriedades mecânicas. O comportamento mecânico é uma propriedade básica na avaliação de um material de

engenharia em uma determinada utilidade. Para geopolímeros como novos materiais cimentícios, a resistência à compressão é uma característica importante. Desde sua invenção na década de 1970, tem se verificado uma melhor resistência à compressão se comparado aos cimentos convencionais, definindo tempo e durabilidade de ambos (PEREIRA, et al., 2018).

A Tabela 5 apresenta os resultados de resistência à compressão (tensão máxima) para concretos de cimento geopolimérico (GC) e cimento Portland de alto desempenho (HPC) após diferentes períodos de cura. Nesta tabela deve-se notar que após 2h de cura, o concreto GC já apresenta uma resistência razoável e após um dia sua resistência está dentro do padrão de 30 MPa. Com o envelhecimento crescente, após 28 dias ambos os concretos tendem a adquirir resistências à compressão semelhantes, dentro do desvio padrão, até 2 anos (PEREIRA, et al., 2018).

Tabela 5 - Resistência à compressão em concretos GC e HPC após distintos períodos de cura.

Tipo de concreto	Resistência a compressão (Mpa) após determinado tempo de cura				
	2h	1 dia	7 dias	28 dias	2 anos
GC	15.8 ± 1.7	39,2 ± 1,3	51,2 ± 1,3	57,4 ± 0,9	61,0 ± 1,1
HPC	-	29.1 ± 1.8	45,8 ± 2,3	57,9 ± 1,6	59,5 ± 1,4

Fonte: PEREIRA, et al., 2018

Boa resistência quando exposto à altas temperaturas é mais uma propriedade que foi interessante a se destacar. Inicialmente desenvolvido para suportar temperaturas elevadas, os geopolímeros possuem uma melhor performance nessas condições em relação aos materiais à base de cimento Portland (DAVIDOVITS, 1999).

Durabilidade é considerada uma das vantagens mais fortes de concreto geopolimérico sobre o cimento de Portland porque este sistema aglutinante não depende de compostos de cálcio e é livre de C₃A e CaO, que são muito vulneráveis em ácidos e ataque sulfático (FERNANDEZ-JIMENEZ & GARCÍA-LODEIRO, 2006)

Muitos resultados experimentais do passado provaram que Concreto geopolimérico tem menor permeabilidade, maior resistência contra agressividade

ambientes, como água ácida e sulfatada, bem como muito menos ou nenhuma corrosão mesmo sob o reforço de aço em ambientes marítimos (REDDY et al., 2011).

2.1.1 Formas de aplicação

Por possuir propriedades interessantes e ser uma alternativa ao cimento Portland, o cimento geopolimérico está sendo mais utilizado em: pavimentos, na fabricação de peças pré-moldadas e em reparos estruturais, principalmente pelo fato de adquirir um valor de resistência consideravelmente alto em pouco tempo, facilitando na rapidez do desenvolvimento do projeto (VICKERS et. al., 2015).

Mendes *et al.* (2004) estudou o comportamento de cimento Portland e aglutinante de geopolímero em temperaturas elevadas usando pasta cimento Portland equivalente. Verificou-se que o aglutinante de geopolímero ganhou resistência com a temperatura, enquanto a pasta cimento Portland apresentou queda considerável com o aumento da temperatura. Nasvi *et al* (2006) compararam o comportamento mecânico do aglutinante de geopolímero e Cimento classe G, bem como cimento em diferentes temperaturas. Eles concluíram que aglutinante de geopolímero tem maior resistência em temperaturas elevadas. Uehara estudou o desempenho do geopolímero e cimento Portland. Eles observaram que o geopolímero tem excelentes propriedades em condições adversas em comparação com o cimento Portland. Isso ocorre porque o geopolímero tem excelentes propriedades de resistência a ácidos.

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Callister (2013), os materiais compósitos são definidos como uma combinação de dois ou mais materiais distintos (podendo serem estes materiais metais, cerâmicos e/ou polímeros), de forma que se obtenha as melhores características e propriedades de cada componente, gerando assim um material com propriedades adequadas e favoráveis para uma determinada aplicação. Os materiais compósitos fornecem uma combinação incomum de características e propriedades que não estão presentes nas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais.

O desenvolvimento dos materiais compósitos contribuiu e contribui para a ampliação de diferentes combinações e faixas de propriedades. Os materiais

compósitos são constituídos por múltiplas fases, exibindo características significantes de ambas as fases que o compõem (CALLISTER, 2013).

No contexto atual, o material compósito é caracterizado como um material de múltiplas fases feito de forma artificial, ao invés de surgido de forma natural na natureza. Acrescenta-se a isso a necessidade das fases que constituem o material compósito serem diferentes quimicamente, além de estarem separadas por uma interface distinta. Assim sendo, grande parte das ligas metálicas e dos materiais cerâmicos, não se encaixam nessa definição, porque suas múltiplas fases decorrem de fenômenos naturais (CALLISTER, 2013).

Destaca-se que em grande parte dos materiais compósitos, há a ocorrência de apenas duas fases: uma fase contínua denominada matriz e uma fase descontínua e dispersa, denominada reforço. A fase contínua, matriz, é responsável por conferir a estrutura do compósito, enquanto, por outro lado, o reforço é responsável por amplificar alguma propriedade desejada. Ambas as fases contribuem para a determinação das propriedades do material, com diferentes características sendo obtidas devido às variações de quantidades relativas das fases e da geometria da fase dispersa, geometria esta que engloba a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação das partículas, como pode ser visto na Figura 4 (CALLISTER, 2013).

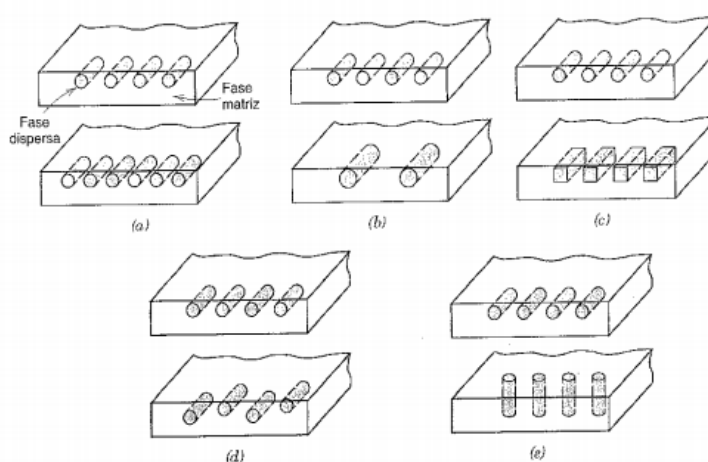


Figura 4: Representação esquemática de diferentes características geométricas e espaciais das partículas que compõem a fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: a) concentração, b) tamanho, c) forma, d) distribuição e e) orientação

Fonte: CALLISTER, 2013

Segundo Callister (2013), os materiais compósitos são divididos em algumas categorias: três divisões principais que englobam os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. Dentro destas divisões principais, ainda existem pelo menos duas subdivisões para cada, conforme Figura 5.



Figura 5: Classificações de compósitos.
Fonte: CALLISTER, 2013

2.2.1 Materiais Compósitos Reforçados Com Fibras

As principais aplicações de compósitos reforçados com fibras são frequentemente, projetos que necessitem altos valores de resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Desta forma, as características são apresentadas em função de parâmetros diretamente relacionados ao seu peso, como: resistência específica e módulo específico, sendo a resistência específica equivalente à razão do limite de resistência a tração em relação a densidade relativa, enquanto o módulo específico é equivalente ao módulo de elasticidade em relação a densidade relativa. Pode-se dizer que os compósitos mais importantes, tecnologicamente, são os compósitos em que a fase dispersa se encontra na forma de uma fibra. Existem compósitos com resistências e módulos específicos com valores excepcionalmente altos, que foram obtidos empregando-se materiais de baixa densidade tanto para a fibra quanto para a matriz (CALLISTER, 2013).

2.2.1.1 Influência do comprimento da fibra

Além das propriedades mecânicas de um compósito reforçado com fibras, outro fator se torna importante na análise das características mecânicas do compósito: o grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. Essa extensão da transmissão de carga está atrelada a magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz. Quando há a aplicação de uma tensão, essa ligação fibra-matriz cessa nas extremidades da fibra, de forma a produzir um padrão de deformação da matriz, ou seja, não existe transmissão alguma de carga a partir da matriz em cada extremidade da fibra (CALLISTER, 2013). A Figura 6 exemplifica este padrão de deformação.

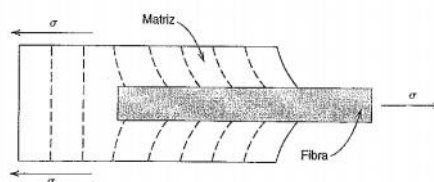


Figura 6: Padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra sujeita à aplicação de uma carga trativa.

Fonte: CALLISTER, 2013

Para que haja um aumento efetivo da resistência, além de um enrijecimento do material compósito, é necessário um certo comprimento crítico de fibra. Este comprimento crítico, l_c , é dependente de alguns parâmetros, sendo eles: diâmetro da fibra, d , e da sua resistência final (ou limite de resistência a tração), σ_f , além da força de ligação entre a fibra e a matriz (considerando o menor valor entre a força de ligação e a tensão de limite de escoamento cisalhante da matriz), t_c (CALLISTER, 2013).

No caso da aplicação de uma tensão igual a σ_f em uma fibra que possui exatamente o comprimento crítico, o que se obtém, é o perfil tensão-posição mostrado na figura 7. Neste caso, a carga máxima na fibra é obtida apenas no eixo central da própria fibra. Conforme o comprimento da fibra aumenta, o reforço causado pela fibra se torna cada vez mais efetivo.

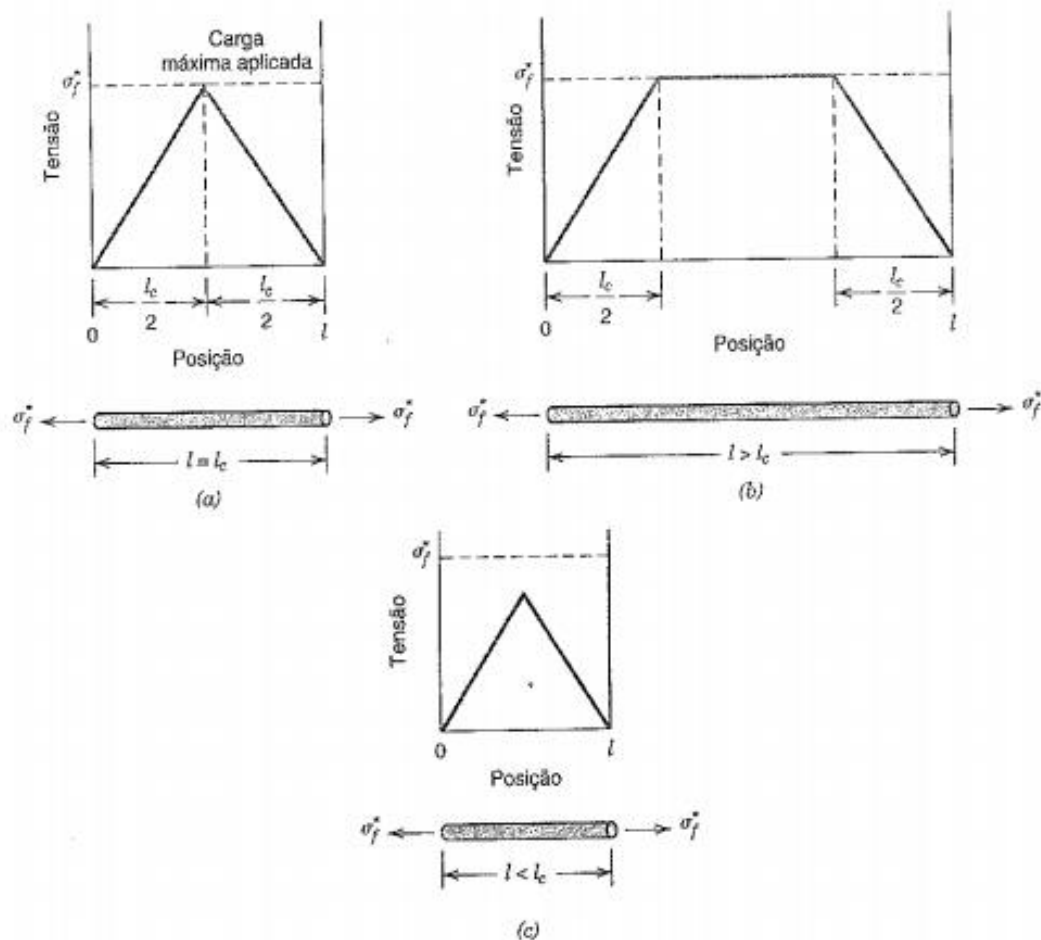


Figura 7: Perfis tensão-posição relacionados ao comprimento da fibra. a) $l = l_c$; b) $l > l_c$ e c) $l < l_c$.

Fonte: CALLISTER, 2013

2.2.1.2 Influência da orientação e da concentração da fibra

Além do comprimento da fibra, o arranjo ou orientação das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e sua distribuição, também possuem impactos significativos em relação a resistência e também em relação a outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. A orientação das fibras pode se dar de duas formas: com alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e um alinhamento completamente aleatório. Em condições normais, as fibras contínuas estão alinhadas, enquanto, por outro lado, as fibras descontínuas podem estar alinhadas e orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. A distribuição das fibras de forma uniforme é a combinação que propicia as melhores propriedades gerais dos compósitos (CALLISTER, 2013). A figura 8 mostra cada tipo de orientação.

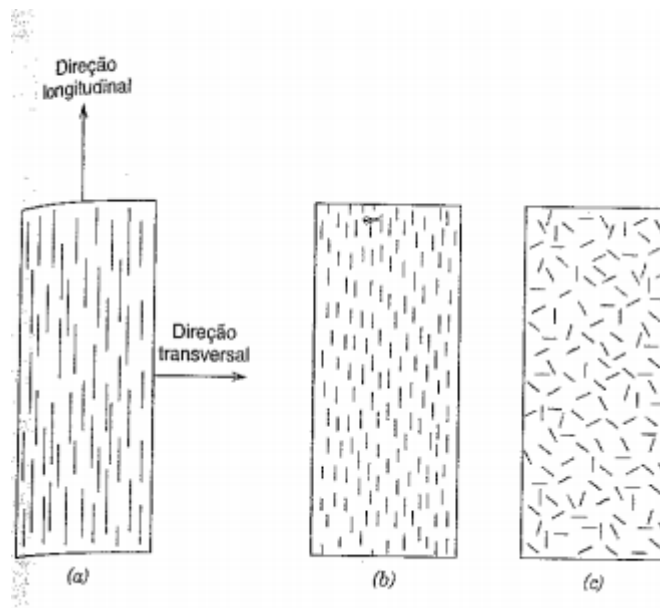


Figura 8: Representação de diferentes arranjos de fibras: a) contínuas e alinhadas, b) descontínuas e alinhadas e c) descontínuas e aleatoriamente alinhadas.
Fonte: CALLISTER, 2013

2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Young (1807) define o módulo de elasticidade como sendo “propriedade mecânica de um material para resistir à compressão ou ao alongamento em relação ao seu comprimento”.

Em outras palavras, à medida que submetemos um material a tensões de tração ou compressão, observa-se que até um certo limite, as tensões (σ) são proporcionais as deformações (ϵ). Neste contexto, podemos encontrar uma constante de proporcionalidade quando, o material, submetido a uma tensão externa de tração ou de compressão. Essa constante é uma propriedade característica de cada material e pode ser encontrada pela razão das tensões pela deformação, como é mostrado na equação [3]:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad [3]$$

Tendo em vista que:

$$\sigma = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \quad [4]$$

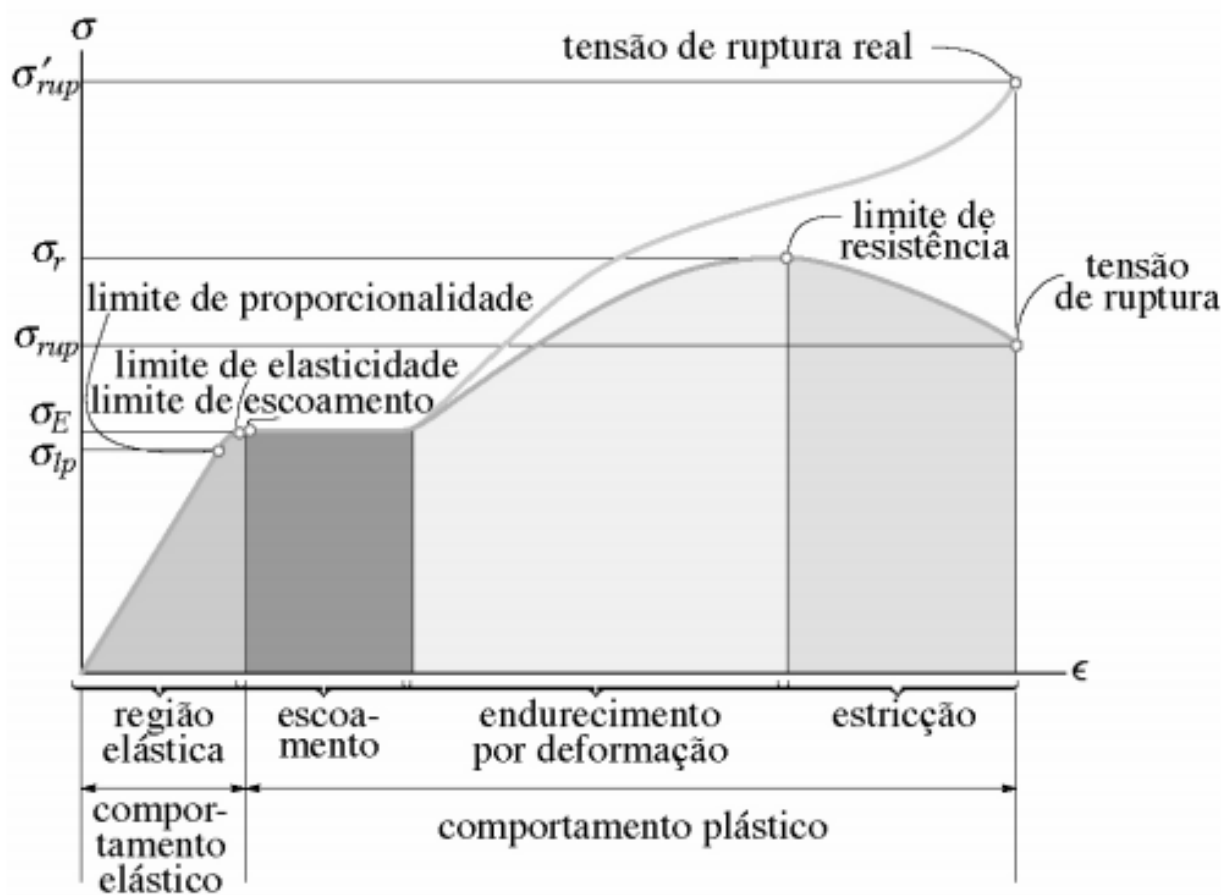
Analogamente, a deformação nominal (ε) é determinada dividindo a variação no comprimento de referência do corpo de prova pelo comprimento de prova inicial (L_0).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [5]$$

Como o módulo de elasticidade é uma constante atrelada à rigidez, pode-se dizer que quanto maior o módulo, mais difícil de se deformar o material. Se os valores correspondentes de σ e ε forem marcados em um gráfico no qual a ordenada é a tensão e a abscissa é a deformação, a curva resultante é denominada diagrama tensão-deformação convencional.

Esse diagrama é muito importante na engenharia pois proporciona os meios para se obterem dados sobre a resistência à tração (ou compressão) de um material sem considerar o tamanho ou a forma física do material, isto é, sua geometria. Entretanto, é importante salientar que dois diagramas tensão deformação para um determinado material nunca serão exatamente iguais, já que os resultados dependem de variáveis como a composição e as imperfeições microscópicas do material, seu modo de fabricação e a taxa de carga e temperaturas utilizadas durante o teste (HIBELLER, 2009).

Na figura 9, consegue-se visualizar o gráfico tensão *versus* deformação mais tradicional, referente ao aço, um dos materiais mais usados para fabricação de elementos mecânicos.



Diagramas tensão-deformação convencional e real para material dúctil (aço) (sem escala)

Figura 9: Gráfico Tensão versus Deformação do aço.
Fonte: HIBBELER, 2009

Na figura 9 pode se observar a inclinação da reta da região elástica que, se realizado um ângulo entre essa reta e o eixo da região elástica, tem-se o coeficiente angular da reta, e, quanto maior a inclinação dessa reta, maior será o módulo de elasticidade.

Como pode ser observado no gráfico, existem diferentes pontos que representam diferentes limites a serem estudados. O primeiro destes que se consegue visualizar é o limite de proporcionalidade que é onde as tensões ainda conseguem ter uma relação de proporcionalidade às deformações do corpo de prova. Após esse ponto, a reta tende a começar a encurvar-se até o limite de escoamento, um pequeno aumento na tensão acima desse ponto resultará em uma deformação permanente do material e entrará no regime plástico.

Caso a carga seja mantida após o escoamento, deve-se resultar em uma curva que cresce continuamente, tornando-se mais achatada até atingir uma tensão máxima denominado limite de resistência. No limite de resistência, a área da seção transversal começa a diminuir em uma região localizada no corpo de prova até que possa acontecer a ruptura.

Como pode ser observado, o diagrama tensão deformação para a maioria dos materiais de engenharia exibe uma relação linear entre tensão e deformação dentro da região elástica. Por consequência, um aumento da tensão provoca um aumento proporcional na deformação. Esse fato foi descoberto por Robert Hooke, em 1676, para molas, e é conhecido como lei de Hooke e pode ser expresso matematicamente como (HIBBELER, 2009):

$$\sigma = E\varepsilon \quad [6]$$

Na expressão [6] E representa a constante de proporcionalidade que pode ser denominada de módulo de elasticidade ou módulo de Young em homenagem a Thomas Young que publicou sobre o módulo em 1807.

Como o geopolímero se apresenta como uma alternativa ao cimento que é um material imprescindível na formação do concreto, o trabalho têm como objetivo separar o módulo de elasticidade encontrado para o concreto em algumas normas citadas por pelo artigo de Carius *et al.* (2019, p.5). É importante ressaltar que este artigo tem por objetivo apresentar um estudo do comportamento da resistência à compressão do concreto, considerando que o concreto é um material compósito e que o geopolímero pode ser apresentado como uma alternativa. Nesse sentido, é válido ressaltar a presença de três tipos de módulos de elasticidade do concreto quando sujeitos à compressão. De acordo com De Marchi (2011) estes são: Módulo de elasticidade tangencial, secante e cordal.

O módulo tangente que é calculado através do coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão *versus* deformação na compressão, mas quando não for especificado o ponto da curva, refere-se à origem, ou seja, ao módulo tangente inicial E_{ci} , já o módulo secante é dado pela relação entre uma tensão qualquer e a deformação a ela correspondente, ou seja, o coeficiente angular da reta que liga os pontos da curva tensão *versus* deformação correspondente a essa tensão e à tensão igual a zero. Quando a tensão não é mencionada, infere-se que o módulo

secante seja relativo a uma tensão entre 40 e 50 % da resistência à compressão. Por fim, o módulo cordal é definido pela reta que liga dois pontos quaisquer da curva tensão X deformação (DE MARCHI, 2011).

Destaca-se também a variabilidade intrínseca e extrínseca como fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto. Variabilidade intrínseca se relaciona com a variação dos agregados que ocupam, em média, 75 % do volume do concreto, impactando diretamente na variabilidade do mesmo e alterando significativamente o valor do módulo de elasticidade (DE MARCHI, 2011). Já a variabilidade extrínseca se encontra entre os parâmetros influenciadores para o módulo de elasticidade relacionados aos corpos-de-prova, encontram-se a forma e a dimensão da seção transversal, a relação entre o comprimento e essa dimensão e a direção de concretagem (SHEHATA, 2005).

2.3.1 Módulo de elasticidade para o concreto

2.3.1.1 NBR 6118/2004

Esta norma trata de projetos de estruturas de concreto, então em seu escopo é possível encontrar diretrizes do que deve ser feito ao trabalhar com alguns tipos de concreto. Nesse sentido, segundo a norma estabelece o módulo de elasticidade como:

$$E_{ci} = 5600 * f_{ck}^{(1/2)} \quad [7]$$

Onde E_{ci} é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto e também pode ser representado na Figura 10, como a reta tangente à curva do gráfico tensão x deformação.

Na Figura 10, que é encontrado na Norma NBR 8522, pode se ter uma melhor ideia de como é a representação de ambos os parâmetros, módulo de elasticidade tangencial e secante, que serão mais aprofundados posteriormente:

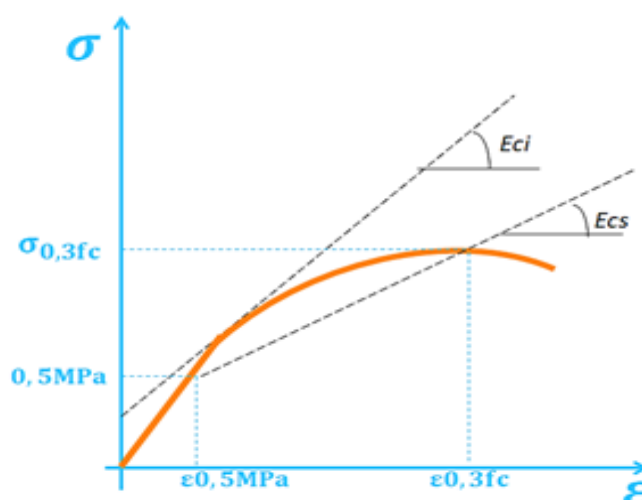


Figura 10: Gráfico Tensão versus Deformação concreto
Fonte: Norma NBR 8522 (2017)

O termo f_{ck} representa a resistência característica à compressão do concreto e é expresso em megapascal. Em linhas gerais, a norma técnica deu um tratamento estatístico ao concreto e esse parâmetro pode mensurar o quão resistente o concreto de uma obra tem de ser para satisfazer o projeto.

Ainda segundo a norma, o módulo de elasticidade numa idade $j \geq 7$ dias pode também ser avaliado através dessa expressão, substituindo-se f_{ck} por f_{ckj} que nada mais é do que a resistência característica do concreto à compressão correspondente aos j dias de idade.

Quando for o caso, é esse o módulo de elasticidade a ser especificado em projeto e controlado na obra.

A norma ainda descreve o módulo de elasticidade secante que é utilizado em análises elásticas de projeto especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço. A expressão utilizada é demonstrada na equação [8]:

$$E_{cs} = 0,85E_{ci} \quad [8]$$

Para estabelecer a diferença de quando usar cada módulo de elasticidade apresentado, tem-se que:

“Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à

compressão, igual ao módulo de elasticidade secante (E_{cs}).” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004)

“Na avaliação do comportamento global da estrutura e para o cálculo das perdas de protensão, pode ser utilizado em projeto o módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004)

2.3.1.2 EUROCODE 2/2004

Esta norma especifica as regras técnicas para o projeto de estruturas de concreto, concreto armado e concreto protendido, usando a filosofia de design do estado limite. Foi aprovado pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) em 16 de abril de 2004 para permitir que designers de toda a Europa trabalhassem em qualquer país que adote o código. O presente trabalho, irá se ater ao módulo de elasticidade nela presente.

Segundo a norma, as deformações elásticas do concreto dependem em grande parte de sua composição (especialmente a agregados) e, dessa forma, o módulo de elasticidade de um concreto é controlado pelos módulos de elasticidade de seus componentes.

O módulo de elasticidade secante pode ser estimado por:

$$E_{cm} = 22 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad [9]$$

A variável f_{cm} representa o valor médio da resistência à compressão do cilindro de concreto (que foi considerada como f_c , a partir dos dados dos autores Lopes e Paes) e E_{cm} a secante do módulo de elasticidade do concreto. Através da figura 11, podemos ver a melhor relação entre eles.

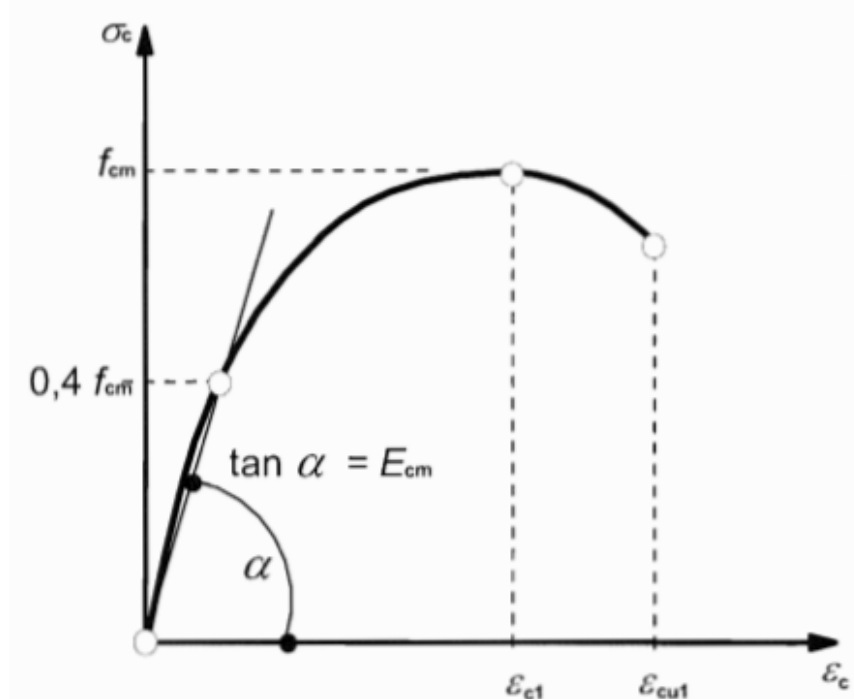


Figura 11: Representação esquemática da relação tensão versus deformação para estruturas de análise (o uso $0,4 f_{cm}$ para a definição de E_{cm} é aproximado).

Fonte: EUROCODE 2/2004

Ainda é estabelecido o cálculo do módulo de elasticidade tangencial em função do tempo de vida do concreto ($E_c(t)$). Para isso, tem-se que:

$$E_c = 1,05 E_{cm} \quad [10]$$

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} * E_{cm} \quad [11]$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm} \quad [12]$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad [13]$$

Logo:

$$E_c(t) = 1,05 * \left(\exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \right)^{0,3} * E_{cm} \quad [14]$$

Em que:

E_c = Tangente do módulo de elasticidade a uma tensão equivalente a 0 MPa em 28 dias

$E_c(t)$ = Tangente do módulo de elasticidade a uma tensão de compressão equivalente a 0

$E_{cm}(t)$ = Secante do módulo de elasticidade do concreto em t dias

f_{cm} = Valor médio da resistência à compressão do cilindro de concreto em 28 dias

$f_{cm}(t)$ = Valor médio da resistência à compressão do cilindro de concreto em t dias

$\beta_{cc}(t)$ = Coeficiente relacionado a idade do concreto em t dias

t = Idade do concreto em dias

s = coeficiente que depende do tipo de cimento (0,20 para cimentos de classe R, 0,25 para cimentos de classe N e 0,38 para cimentos de classe S)

2.3.1.4 ACI 318/2005

Esta norma diz respeito ao uso do concreto estrutural usado em edifícios e, quando aplicável, em estruturas não construtivas. Entre os assuntos abordados estão: desenhos e especificações, inspeção, materiais, requisitos de durabilidade, qualidade, mistura, etc. Entretanto, vamos nos ater ao módulo de elasticidade (E_c) tratado.

Ainda que a norma não especifique um cálculo para o módulo tangencial, temos a orientação de considerá-lo como sendo $w_c^{(1.5)} 33\sqrt{f_c'}$ para valores de w_c (peso unitário do concreto) entre, 1442 e 2482 kg/m³, $\sqrt{f_c'}$ representa a raiz quadrada da resistência à compressão especificada do concreto em *psi*. Os estudos que conduziram a expressão do módulo de elasticidade foram definidos a partir da inclinação da linha desenhada de uma tensão de 0 a uma tensão de $0,45f_c'$.

Segundo a norma, o módulo de elasticidade do concreto é sensível ao módulo de elasticidade do agregado e pode diferir do valor especificado. Além disso, os valores medidos podem variar de 120 a 80 por cento do valor especificado.

É válido salientar que a norma ainda menciona outros dois tipos de módulo de elasticidade, um deles é o módulo de elasticidade do reforço (E_s), este é relacionado a reforço de concreto não protendido e deve ser considerado como 29000 *psi*. O outro

citado é o módulo de elasticidade do aço protendido (E_p) e deve ser determinado a partir de testes ou relatado pelo fabricante.

2.3.1.5 Fib MODEL CODE 2010

Este Código Modelo é um documento destinado a servir de base para normas futuras, produzido através de um esforço excepcional por vários países reunidos. Onde os códigos operacionais existentes são documentos legais, com base em conhecimento maduro, a norma também leva em conta novos desenvolvimentos no que dizem respeito às estruturas de concreto e novas ideias aos requisitos a serem formulados para que as estruturas alcancem um comportamento ideal de acordo com as novas ideias apresentadas. Neste Código Modelo, essas novas ideias não se referem apenas as clássicas demandas que se referem à segurança e facilidade de manutenção, mas também levam em consideração a crescente importância dos critérios de *design* para durabilidade e sustentabilidade. Assim como já feito anteriormente, o trabalho se concentra na apresentação do módulo de elasticidade.

Segundo o código, os valores para o módulo de elasticidade para concreto de peso normal com areia natural e cascalho podem ser estimados a partir da resistência característica especificada. Nesse sentido, o módulo de elasticidade pode ser encontrado da seguinte forma:

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{(1/3)} \quad [15]$$

Em que,

E_{ci} = módulo de elasticidade em [MPa] na idade do concreto de 28 dias; f_{ck} é a força característica em [MPa]; $\Delta f = 8$ MPa; $E_{c0} = 21.500$ MPa;

O $\alpha_E = 1,0$ para agregados de quartzito. Para diferentes tipos de valores qualitativos agregados para α_E podem ser encontrados em tabela.

Quando a resistência à compressão do concreto com 28 dias f_{cm} é conhecida, E_{ci} pode ser obtido por:

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{(1/3)} \quad [16]$$

Em que,

E_{ci} = módulo de elasticidade em MPa do concreto com 28 dias de idade

E_{c0} = 21.500 MPa

αE = constante relacionada aos tipos de agregados presentes no material segundo tabela 6

f_{ck} = resistência característica segundo subcláusula 5.1.4 do FIB Code

Δf = 8 MPa

Tabela 6 - Tipos de agregados no concreto.

Tipos de agregado	αE	$E_{c0} * \alpha E$ (MPa)
Basalto, agregados de calcário denso	1,2	25800
Agregados de quartzito	1	21500
Agregados de calcário	0,9	19400
Agregados de arenito	0,7	15100

2.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão é um dos principais testes para se determinar as propriedades mecânicas mais importantes de um material. Além disso, o teste de compressão é muito utilizado para a determinação da relação entre a tensão normal média e a deformação normal média em muitos materiais da engenharia, tais como os polímeros (HIBBELER, 2009).

Para a realização do teste de compressão um corpo-de-prova é fabricado a partir do material, com formato e tamanho padronizados.

No ensaio de compressão, o corpo de prova é sujeito a uma força axial compressiva que aumenta progressivamente, causando seu encurtamento. Durante o ensaio de compressão, a carga compressiva e a consequente deformação devem ser monitoradas continuamente ou em incrementos finitos, e as propriedades mecânicas em compressão determinada (ASTM E9, 2019).

Na maioria dos materiais frágeis a ruptura acontece, sendo este o ponto em que o ensaio é interrompido, enquanto nos materiais dúcteis, o corpo de prova tende a ter um alargamento da sua seção transversal, achatando-se na forma de um disco, sem que sofra ruptura, fazendo com que o ensaio de compressão seja interrompido

quando ocorre deformação lateral do corpo de prova. A figura 12 mostra o comportamento de materiais dúcteis e frágeis sob esforços compressivos (CHIAVERINI, 1986).

Nos materiais frágeis, a ruptura ocorrerá pelo efeito de cisalhamento resultante da tensão de compressão e não ocorrerão deformações laterais relevantes se comparadas às deformações laterais que ocorrem nos materiais dúcteis (ZOLIN, 2011).

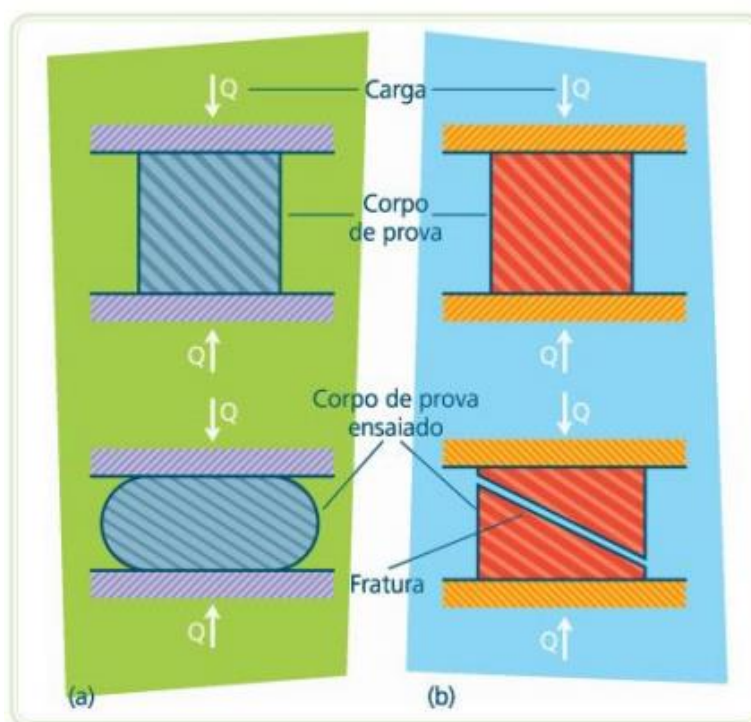


Figura 12: Falha de material. a) dúctil e b) frágil.

Fonte: ZOLIN, 2011

Para materiais com baixa ductilidade, o limite de resistência à compressão é uma propriedade mecânica importante, diferindo em valor do limite de resistência à tração e, sendo, de forma geral, maior do que este (SOUZA, 1982).

O limite de resistência à compressão (σ_c) é calculado a partir da divisão da carga máxima pela seção original do corpo de prova (A_0) (SOUZA, 1982).

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \quad [17]$$

O limite de resistência à compressão (σ_c) é geralmente dado em MegaPascal (MPa), a carga máxima (P) é obtida no ensaio de compressão normalmente em

Newton (N) e A_0 é a área da seção transversal inicial do corpo de prova em milímetro quadrado (mm^2).

Segundo Zolin (2011) corpos de prova de seção circular são os mais indicados para ensaios de compressão. No caso de um corpo de prova cilíndrico a área de seção transversal inicial é obtida por meio da seguinte fórmula, na qual D é o diâmetro do corpo de prova em milímetro (mm) (HIBBELER, 2009).

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [18]$$

Por meio dos dados obtidos a partir do ensaio de compressão, pode-se calcular a deformação correspondente no corpo de prova para diferentes valores de tensão de compressão e, com estes dados, é possível obter um gráfico com os resultados. A curva obtida no gráfico, é denominada diagrama tensão-deformação (HIBBELER, 2009).

A deformação é obtida a partir da seguinte fórmula, na qual ϵ é a deformação nominal ou de engenharia, L_0 é o comprimento de referência inicial e δ é a variação no comprimento de referência inicial (HIBBELER, 2006).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad [19]$$

Importante notar que:

$$\delta = L_0 - L_f \quad [20]$$

Segundo Souza (1982), o ensaio de compressão, apesar de aplicado em materiais frágeis, apresenta algumas limitações, como: a dificuldade na aplicação de uma carga axial ou verdadeiramente concêntrica e a ocorrência de atrito entre os cabeçotes das máquinas de ensaio e as faces dos corpos de prova, que produz tensões que retardam o escoamento nas regiões adjacentes aos contatos, resultando em um gradiente de tensões ao longo do comprimento do corpo de prova. A aplicação de lubrificantes é uma medida eficaz para redução do atrito nestas regiões.

Outro fenômeno a se evitar é a flambagem, que se caracteriza pela instabilidade na compressão. Qualquer excentricidade na aplicação dos esforços

compressivos tende a favorecer a ocorrência de flambagem. Além disso, a flambagem ocorre em corpos de prova com comprimentos muito grandes em relação a seus diâmetros. Para evitar sua ocorrência, é importante dimensionar o corpo de prova de modo que a tensão máxima seja menor que a tensão crítica que provocaria a flambagem (SOUZA, 1982).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo do trabalho é destinado a apresentação e à descrição dos materiais, métodos de preparo e ensaios utilizados para a realização do projeto. Ressalta-se que essa etapa experimental é baseada no projeto final elaborado pelos autores Lopes e Paes (2019), isso se deve às restrições de locomoção e acesso aos laboratórios impostas pela pandemia do SARS-CoV-2.

3.1 GEOPOLÍMERO

O material utilizado inicialmente para a preparação do trabalho foi o geopolímero Cimento GP-1818 da empresa Geo-Pol®, como observado nas Figura 13a e 13b, composto por pó precursor à base de metacaulim (Figura 13a e de líquido ativador à base de NaOH (Figura 13b).



Figura 13: Componentes do Cimento GP-1818. a) Pó precursor e b) líquido ativado.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

Após a preparação dos corpos de prova (CPs) preparados com o material e feitos sob um molde de ferro antigo e inapropriado para o experimento. Então, foi observado que estes ficaram muito danificados e inaptos para o restante do projeto. É possível verificar essa condição com maiores detalhes nas Figuras 14 e 15.



Figura 14: CPs do GP-1818 feitos com molde de ferro.

Fonte: Lopes e Paes (2019)



Figura 15: CP do GP-1818 com molde de PVC.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

Sendo assim, um novo material, geopolímero industrial, foi fornecido para a realização do trabalho. Este, segundo o fornecedor do material, apesar das proporções semelhantes de pó / líquido em relação ao GP 1818, possuía uma estrutura química entre os ligantes mais evoluída que poderiam melhorar o seu desempenho para o trabalho em questão. Após análise química no LADES que pode ser visto na Tabela 7, determinou-se que uma diferença entre o material utilizado

anteriormente e o posterior é que o novo possui uma coloração mais escura (a diferença pode ser explicada, dentre outras questões, pela composição química do material) e uma razão maior de Si/Al além de não conter óxido de cálcio, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do GP-1818 e do Novo Material.

Componente	GP-1818	Novo Material
Al ₂ O ₃	14,1%	11,9%
SiO ₂	29,4%	32,3%
K ₂ O	13,31%	16,8%
CaO	3,5%	0%

Fonte: Lopes e Paes (2019)

De acordo com o fabricante, deve ser respeitado a proporção de aproximadamente 75 g de pó para cada 100 g de líquido ativador.

Dessa maneira, com a quantidade de pó precursor disponível para a produção geopolimérica, chegou-se à quantidade de 187,09 g para esta ficar numa escala ideal. Para o líquido ativador, seriam necessários 249,97 g, mas pequenas variações, como as apresentadas, são aceitáveis e não alteram de maneira significativa as propriedades do material.

3.1.1 Preparação dos corpos de prova

Com o auxílio de moldes cilíndricos de dimensões de 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro, se fez o preparo dos corpos de prova que seriam submetidos ao ensaio de compressão.

No entanto, mesmo com o auxílio de um desmoldante e dos preparos realizados, parte do material aderiu ao molde de ferro, fazendo com que o corpo de prova fosse parcialmente danificado como citado anteriormente. Moldes de PVC foram então preparados para que se aproximassem das medidas dos moldes de ferro. As medidas dos moldes de PVC eram de 48 mm de diâmetro e 110 mm de altura. Os moldes de PVC podem ser visualizados na Figura 16.

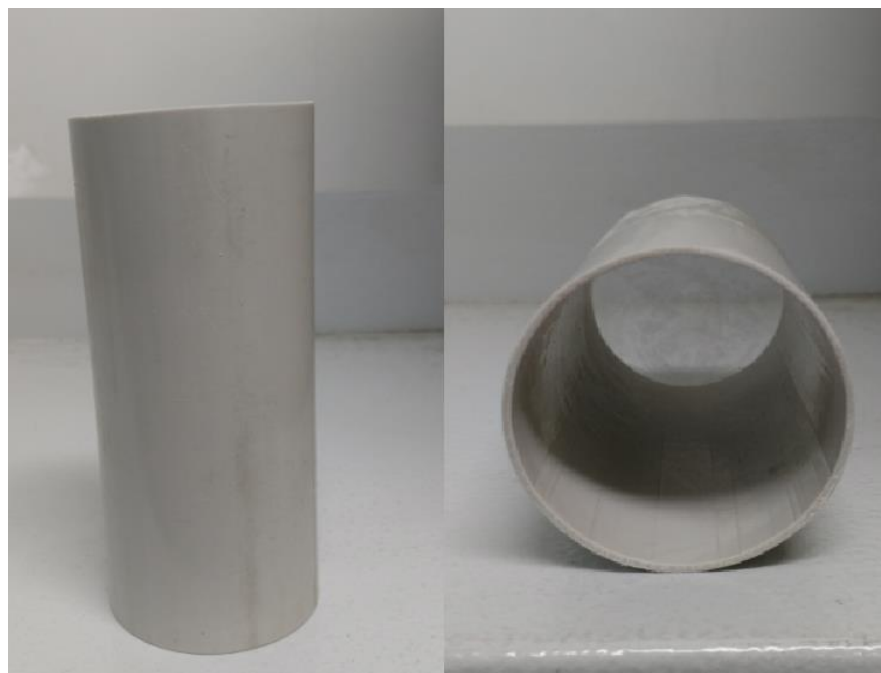


Figura 16: Molde de PVC.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

Todos os CPs ficaram nos moldes por apenas um dia pelo fato do geopolímero possuir uma secagem rápida. Após esse tempo, eles foram desmoldados com o auxílio de ferramentas para cortar os moldes de PVC. Os CPs foram então curados ao ar ambiente após esse tempo, por um total de sete e quatorze dias para os corpos com maior tempo de cura. Recipientes contendo água foram posicionados perto dos CPs para evitar que o ambiente seco devido ao ar refrigerado pudesse prejudicá-los.

As Figuras 17, 18 e 19 contém todos os corpos de prova criados para a execução do trabalho, para os diferentes tempos de cura e com os diferentes teores de fibra de juta em relação a composição do material.

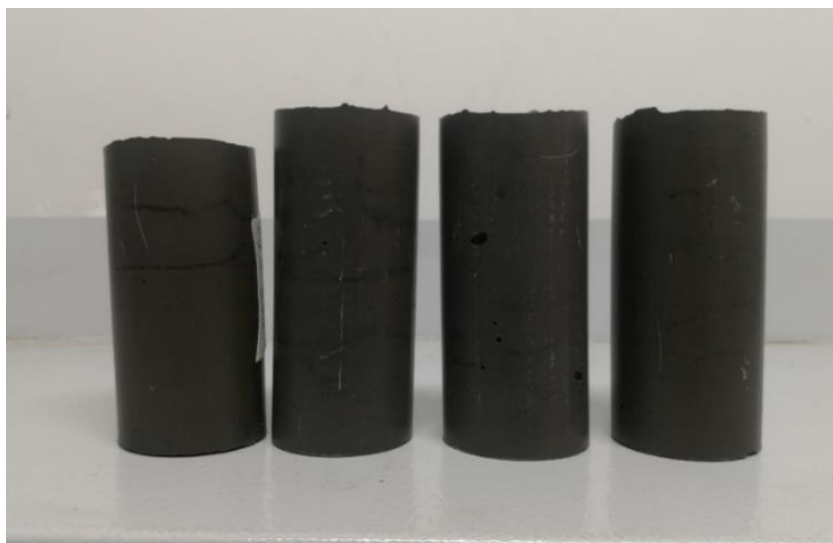


Figura 17: CPs com 1 dia. Sem fibra, 1% de fibra, 2% de fibra e CP de teste, respectivamente.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

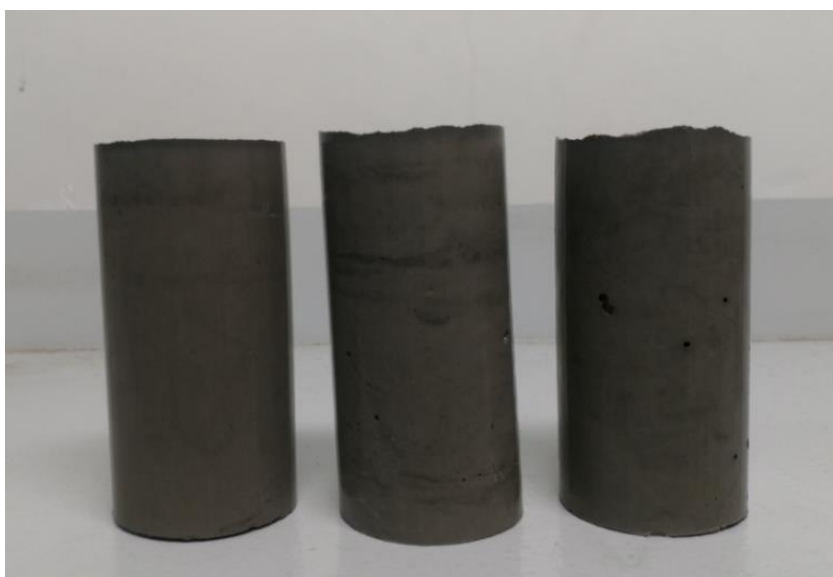


Figura 18: CPs com 7 dias. Sem fibra; 1% de fibra; 2% de fibra, respectivamente.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

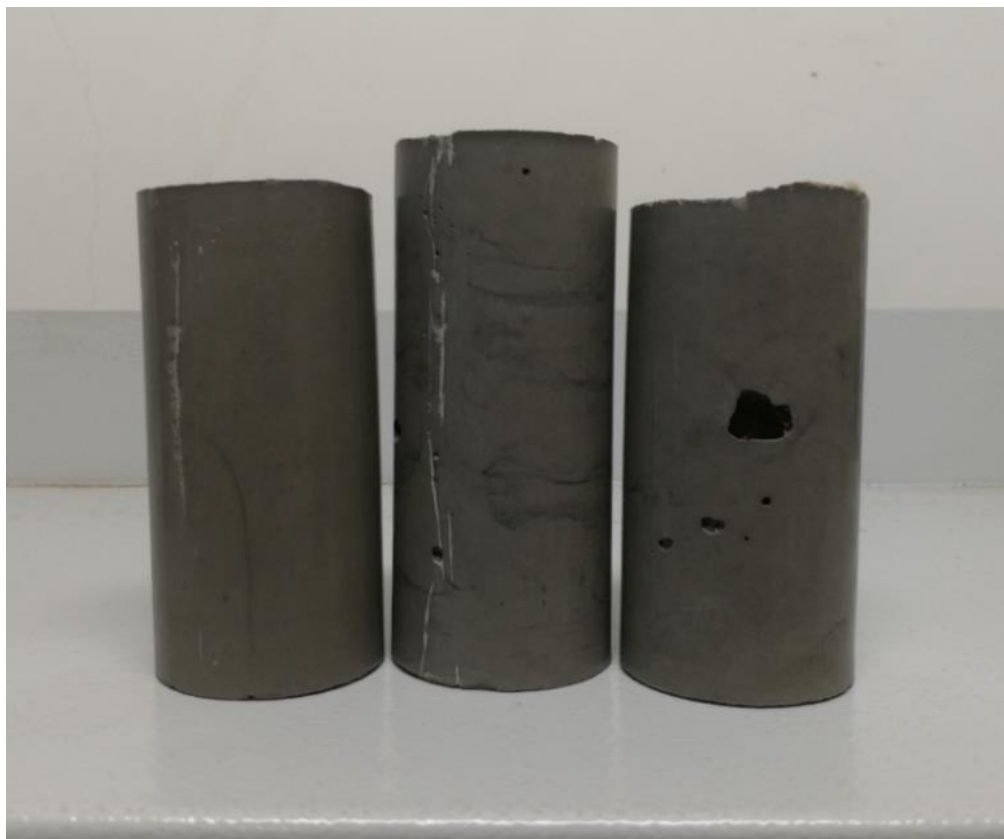


Figura 19: CPs com 14 dias. Sem fibra, 1% de fibra e 2% de fibra, respectivamente.
Fonte: Lopes e Paes (2019)

3.1.2 Fibra de Juta

A juta é uma fibra de origem vegetal e é muito utilizada em atividades comuns do dia a dia como artesanato, decoração e principalmente na indústria cafeeira, sendo a principal matéria prima das sacas que embalam café. As fibras utilizadas são feitas com 100% de juta.

Pensando numa melhor trabalhabilidade, foi escolhido um tamanho de fibra reduzido para o trabalho. Picanço e Ghavami (2008) concluíram que uma melhor performance de fibras de curauá no comportamento à compressão de argamassas foram as cortadas com 25 mm de comprimento e por isso, foi resolvido utilizar esse mesmo comprimento para as fibras de juta no presente trabalho. Após o corte, as fibras foram pesadas na balança digital. Fidelis (2014) estudou diversas propriedades da juta, e a densidade da fibra de juta utilizada neste trabalho foi de $1,61 \text{ g/cm}^3$, valor obtido por ele. Levando em consideração essa densidade estipulada, a figura 20 mostra a pesagem das fibras de juta. Com a correta pesagem, se fez a mistura desta ao geopolímero anteriormente preparado.



Figura 20: Pesagem das fibras de juta.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

3.2 REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Para a realização dos ensaios de compressão, os autores utilizaram a máquina de ensaios universais MTS modelo 311.11 presente na Figura 21 com capacidade total de carga de 1000 kN. Essa máquina foi disponibilizada através do laboratório LEM da PUC-RIO e para a realização do ensaio, foi respeitado os procedimentos estipulados na norma NBR 5739, que aborda esse tipo de ensaio em CP cilíndrico.



Figura 21: Máquina de ensaios universais MTS.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

Como mostra a Figura 22, o corpo de prova foi centralizado no prato inferior com o auxílio do círculo concêntrico de referência e em seguida, uma rótula esférica foi posicionada no prato superior, acima do CP. Dessa maneira, é possível prosseguir com a realização do ensaio.



Figura 22: Corpo de Prova posicionado na máquina de ensaio.

Fonte: Lopes e Paes (2019)

O ensaio foi executado utilizando uma velocidade de 0,2 mm/min e terminado algum tempo depois da tensão máxima de ruptura obtida. Durante sua realização, dados de carga suportada e deslocamento são obtidos para posterior análise.

3.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os ensaios foram realizados com a finalidade de se analisar a carga máxima suportada pelos corpos de prova identificados anteriormente com os diferentes teores de fibra presentes e do tempo de cura estipulados. Dessa forma, a partir do deslocamento do impactador poderia se analisar a carga máxima suportada por cada um deles.

Nas Tabelas 8, 9 e 10 estão demonstrados os valores de carga máxima (F em kN) obtidos no ensaio de compressão e a tensão máxima (f_c) calculada para os corpos de prova sem fibra, com 1% e com 2% de volume de material em fibra de juta,

respectivamente. Os valores obtidos por Lima e Paes (2019) de deformação real (ϵ) foram obtidos utilizando-se as equações [5] e [6] do item 2.3. Podem ser observados os valores para deformação real inicial até o ponto de tensão máxima (ϵ_i), a deformação real do corpo até o momento de ruptura (ϵ_r) e a razão entre estes valores (ϵ_i / ϵ_r) e a média M (ϵ_i / ϵ_r). Os corpos de prova foram nomeados da seguinte forma: CP-XFYD, CP significando corpo de prova, X sendo um valor equivalente a zero, um ou dois, referente a quantidade de fibras do material e Y sendo equivalente a um, sete e 14 dias, referente ao tempo de cura do corpo de prova. Na tabela 8 os resultados para os geopolímeros sem adição de fibra, na tabela 9 com 1% de fibra e na tabela 10 com 2% de fibra.

Tabela 8 - Resultado do geopolímero sem fibra.

Sem Fibra							
CP	Tempo de	F (kN)	f_c (MPa)	ϵ_i (%)	ϵ_r (%)	ϵ_i / ϵ_r (%)	M ϵ_i / ϵ_r
	de						
CP-0F1D	1	17,84	9,86	1,15	1,38	83,61	
CP-0F7D	7	19,59	10,82	1,42	1,51	94,18	88,90
CP-0F14D	14	-	-	-	-	-	

Tabela 9 - Resultados do compósito de geopolímeros com 1% de fibra.

1% de fibra							
CP	Tempo de cura	F (kN)	f_c (MPa)	ϵ_i (%)	ϵ_r (%)	ϵ_i / ϵ_r (%)	M ϵ_i / ϵ_r
CP-1F1D	1	34,02	18,80	1,54	2,13	72,16	
CP-1F7D	7	47,59	26,30	1,17	1,64	71,43	74,48
CP-1F14D	14	53,99	29,84	0,95	1,18	79,84	

Tabela 10 - Resultados do compósito de geopolímero com 2% de fibra.

2% de fibra							
CP	Tempo de cura	F (kN)	f_c (MPa)	ϵ_i (%)	ϵ_r (%)	ϵ_i / ϵ_r (%)	M ϵ_i / ϵ_r
CP-2F1D	1	44,15	24,40	1,12	1,69	65,94	
CP-2F7D	7	52,89	29,23	1,04	1,99	52,34	60,64
CP-2F14D	14	48,69	26,91	1,07	1,69	63,65	

Os gráficos apresentados nas Figuras 23, 24 e 25 representam uma comparação dos resultados obtidos no ensaio de compressão em relação às variáveis de porcentagem volumétrica de fibra e tempo de cura. Na Figura 23 é possível verificar a relação da Carga *versus* Deslocamento para os corpos com um dia de cura, na Figura 24 para 7 dias de cura e na Figura 25 para 14 dias de cura.

Os resultados obtidos no ensaio para os corpos com um dia de cura podem ser verificados na Figura 23. No gráfico, é possível observar as vantagens obtidas através da inserção da fibra de juta na matriz geopolimérica. Os corpos com fibra apresentaram maior capacidade de deformação antes de seu rompimento. Isso se deve a capacidade de aumento de resistência que o material possui. Ainda foi possível verificar a influência do tempo de cura, na resistência à ruptura dos corpos de prova com 7 dias de cura.

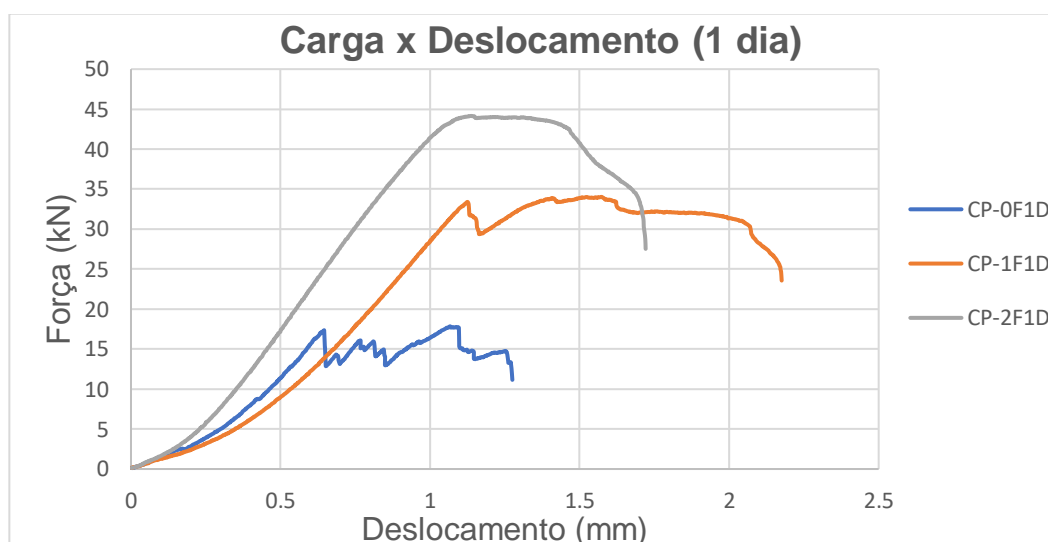


Figura 23: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 1 dia de cura.

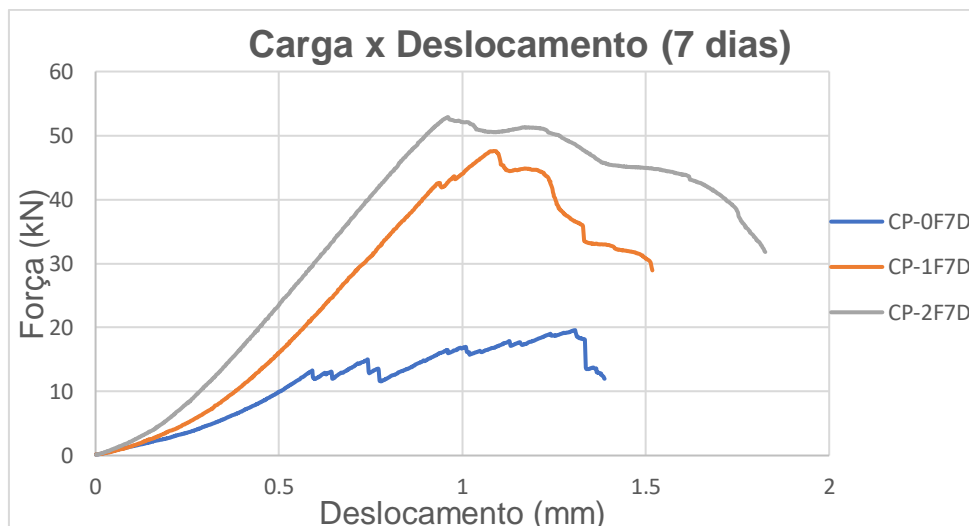


Figura 24: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 7 dias de cura.

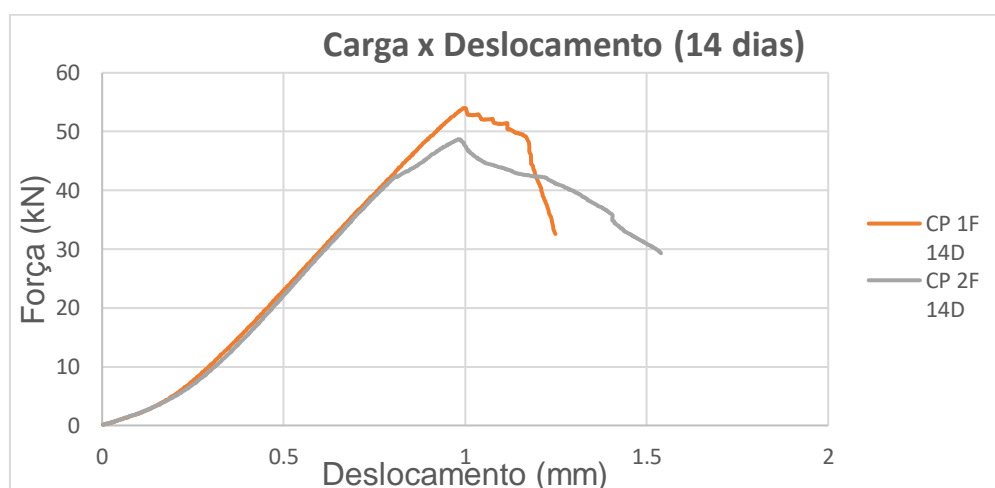


Figura 25: Gráfico de Carga x Deslocamento dos corpos com 14 dias de cura.

4 ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA O GEOPOLÍMERO

As próximas partes do trabalho serão destinadas em calcular, a partir dos resultados encontrados nos ensaios, diferentes resultados para módulos de elasticidades citados nas normas anteriores. Sendo assim, ao final do capítulo pode-se fazer uma análise comparativa desses resultados para uma melhor contribuição do módulo de elasticidade do geopolímero.

4.1 NORMA NBR 6118/2014

Para esta norma, os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 11, 12 e 13 abaixo, valendo destacar que algumas aproximações foram feitas em alguns compostos com a finalidade de tornar possível incluí-los no intervalo estimado.

É válido lembrar, entretanto, que, a norma sofreu uma atualização (NBR 6118/2014) em sua formulação, considerando uma diferente equação para diferentes tensões de compressão utilizadas. Sendo assim, a equação [22] apresenta o módulo de elasticidade sendo calculado em função do tempo de vida do concreto para o intervalo de tensões utilizados no presente trabalho.

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_c(t)}{f_c} \right]^{0,5} * E_{ci}, \text{ para os compostos com } f_c \text{ de 20 Mpa a 45 MPa [21]}$$

Onde, E_{ci} pode ser encontrado através da equação [22]:

$$E_{ci} = \alpha E * 5600 * \sqrt{f_c} \quad [22]$$

Desta forma, temos os E_{ci} apresentado na tabela 11 para compostos sem fibra, na tabela 12 para os compostos com 1% de fibra e a tabela 13 para compostos com 2% de fibra.

Tabela 11 - Valores de Módulo de elasticidade (E_{ci}) do geopolímero sem fibra (NBR 6118/2014).

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{ci} (t) (GPa)
CP-0F1D	1	9,86	17,6
CP-0F7D	7	10,82	18,4

Tabela 12 - Valores de Módulo de elasticidade (E_{ci}) do geopolímero com 1% de fibra (NBR 6118/2014).

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{ci} (t) (GPa)
CP-1F1D	1	18,80	24,3
CP-1F7D	7	26,30	28,7
CP-1F14D	14	29,84	30,6

Tabela 13 - Valores do Módulo de elasticidade (E_{ci}) do geopolímero com 2% de fibra (NBR 6118/2014).

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{ci} (t) (GPa)
CP-2F1D	1	44,15	37,2
CP-2F7D	7	52,89	40,7
CP-2F14D	14	48,69	39,1

4.2 NORMA EUROCODE 2/2004

As tabelas 14, 15 e 16 apresentam os valores de E_{cm} para cada corpo de prova sendo relacionado com a sua tensão máxima suportada de acordo com a equação [9], do item 2.3.1.2. A tabela 14 faz referência para os valores de E_{cm} dos compostos sem fibra, a tabela 15 para os com 1% de fibra e a tabela 16 para os com 2% de fibra.

Tabela 14 - Valores das secantes dos Módulos de elasticidade (E_{cm}) dos geopolímeros sem fibra.

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)
CP-0F1D	1	9,86	21,9
CP-0F7D	7	10,82	22,52

Tabela 15 - Valores das secantes dos Módulos de elasticidade (E_{cm}) dos geopolímeros com 1% fibra.

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)
CP-1F1D	1	18,80	26,58
CP-1F7D	7	26,30	29,40
CP-1F14D	14	29,84	30,53

Tabela 16 - Valores das secantes dos Módulos de elasticidade (E_{cm}) dos geopolímeros com 2% fibra.

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{cm} (MPa)
CP-2F1D	1	24,40	34,34
CP-2F7D	7	29,23	36,26
CP-2F14D	14	26,91	35,37

Com os valores das secantes dos módulos de elasticidade (E_{cm}) encontrados, foi possível calcular os módulos de elasticidade (E_c) sugeridos pela norma através da equação [14], do item 2.3.1.1. Com isso, as tabelas 17, 18, 19 apresentam os valores aproximados para os módulos de elasticidade referentes a cada corpo de prova. A tabela 17 para os corpos de prova sem fibra, a tabela 18 para corpos de prova com 1% de fibra e a tabela 19 para corpos de prova com 2% de fibra.

Tabela 17 - Valores dos Módulos de elasticidade (E_c) dos geopolímeros sem fibra.

CP	Tempo de cura	E_{cm} (MPa)	E_c (GPa)
CP-0F1D	1	21,90	16,66
CP-0F7D	7	22,52	21,93

Tabela 18 - Valores do Módulos de elasticidade (E_c) dos geopolímeros com 1% fibra.

CP	Tempo de cura	E _{cm} (MPa)	E _c (GPa)
CP-1F1D	1	26,58	25,81
CP-1F7D	7	29,40	30,60
CP-1F14D	14	30,53	31,07

Tabela 19 - Valores do Módulos de elasticidade (E_c) dos geopolímeros com 2% fibra.

CP	Tempo de cura	E _{cm} (MPa)	E _c (GPa)
CP-2F1D	1	34,34	33,35
CP-2F7D	7	36,26	35,32
CP-2F14D	14	35,37	36,00

Através dos valores encontrados, observa-se a influência da secante do módulo de elasticidade na determinação do módulo de elasticidade tangente. Entretanto, como pontos principais para o contexto do projeto, o tempo de cura se encontra como uma variável importante na determinação do módulo, a quantidade de fibras também foi determinante no grau do módulo de elasticidade.

4.3 NORMA ACI 318/2005

Como já explicado no capítulo 2, pela falta de informações relacionadas ao peso unitário e massa específica do material, não foi possível realizar os cálculos por meio desta norma.

4.4 CÓDIGO MODELO FIB 2010

Para fins de cálculo do módulo de elasticidade por meio do código modelo, α_E foi considerado como uma constante igual a 1 (mesmo porque o 1 é o α_E para agregados de quartzo que são os agregados mais usados no concreto).

Dessa forma, através da equação [15], do item 2.3.1.5 pode se obter o cálculo do módulo de elasticidade para cada corpo de prova. As tabelas 20, 21 e 22 trazem os resultados encontrados sendo relacionados com a tensão máxima suportada (f_c). A tabela 20 apresenta para os compostos sem fibra, a tabela 21 para os compostos com 1% de fibra e a tabela 22 com 2% de fibra.

Tabela 20 - Valores dos Módulos de elasticidade (E_{ci}) dos geopolímeros sem fibra.

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{ci} (GPa)
CP-0F1D	1	9,86	26,4
CP-0F7D	7	10,82	26,6

Tabela 21 - Valores do Módulos de elasticidade (E_{ci}) dos geopolímeros com 1% fibra.

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{ci} (GPa)
CP-1F1D	1	18,80	29,9
CP-1F7D	7	26,30	32,4
CP-1F14D	14	29,84	33,5

Tabela 22 - Valores do Módulos de elasticidade (E_{ci}) dos geopolímeros com 2% fibra.

CP	Tempo de cura	f_c (MPa)	E_{ci} (GPa)
CP-2F1D	1	44,15	37,3
CP-2F7D	7	52,89	39,3
CP-2F14D	14	48,69	38,3

4.5 ANÁLISE COMPARATIVA

A partir dos resultados obtidos foi possível observar, primeiramente que a quantidade de fibras influencia na tensão máxima de compressão suportada pelo

material e, conseqüentemente, no seu módulo de elasticidade. Percebe-se também que o tempo de cura foi outra variável que teve um importante papel na determinação do módulo de elasticidade, visto que na maioria das amostras, o tempo de cura de sete dias apresentou o maior módulo de elasticidade. Logo, pode ser considerado como sete dias o tempo ideal para uma maior resistência elástica dos compostos geopoliméricos.

Dentre as especificações apresentadas, destaca-se a norma ABNT 6118/2014 que, ora revisada, contempla em sua formulação variáveis relacionadas ao tipo de agregado no concreto e o tempo de cura realizado no experimento, além de intervalos utilizados nas tensões máximas de compressão do experimento. Dessa forma, foi possível realizar uma comparação entre as diferentes especificações utilizadas no presente trabalho, como observado na Figura 26.

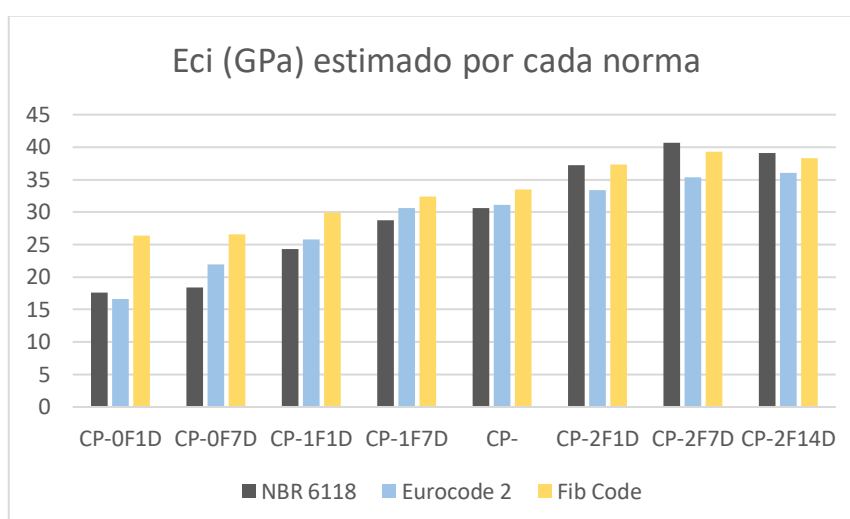


Figura 26: Gráfico comparativo do módulo de elasticidade encontrado utilizando as diferentes normas mencionadas.

Como pode ser observado, a inclusão do tempo de cura na formulação matemática do módulo de elasticidade, fez com que os valores tivessem um aumento gradativo, reforçando a hipótese da influência desse parâmetro no aumento da resistência elástica do composto.

Ademais, pode-se observar nas figuras 27 e 28 uma outra comparação do módulo de elasticidade encontrado para o composto geopolimérico e os valores estimados do módulo de elasticidade do concreto em função da sua classe de resistência tendo como base a formulação da norma NBR 6118/2014. (Obs:

aproximações foram feitas para fins comparativos e para se ter valores equiparados às classes de resistência do concreto.)

Os valores estipulados para o concreto foram retirados da própria norma NBR 6118/2014, como é apresentado na tabela 23.

Tabela 23 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica do concreto.

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Eci (GPa)	25	28	31	33	35	38	40

Fonte: ABNT NBR 6118/2014

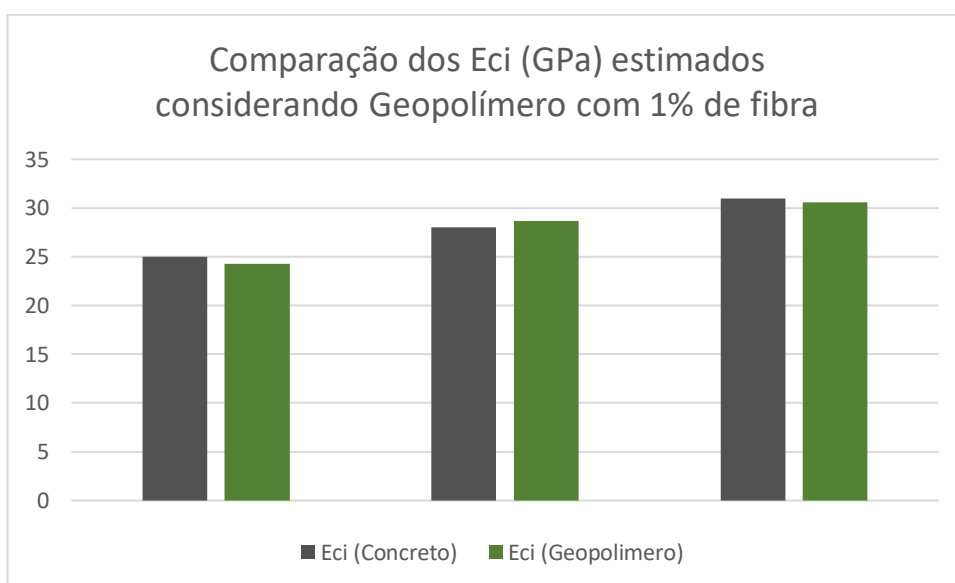


Figura 27: Gráfico comparativo do módulo de elasticidade estipulado para o concreto e para o geopolímero com 1% de fibra utilizando a norma NBR 6118.

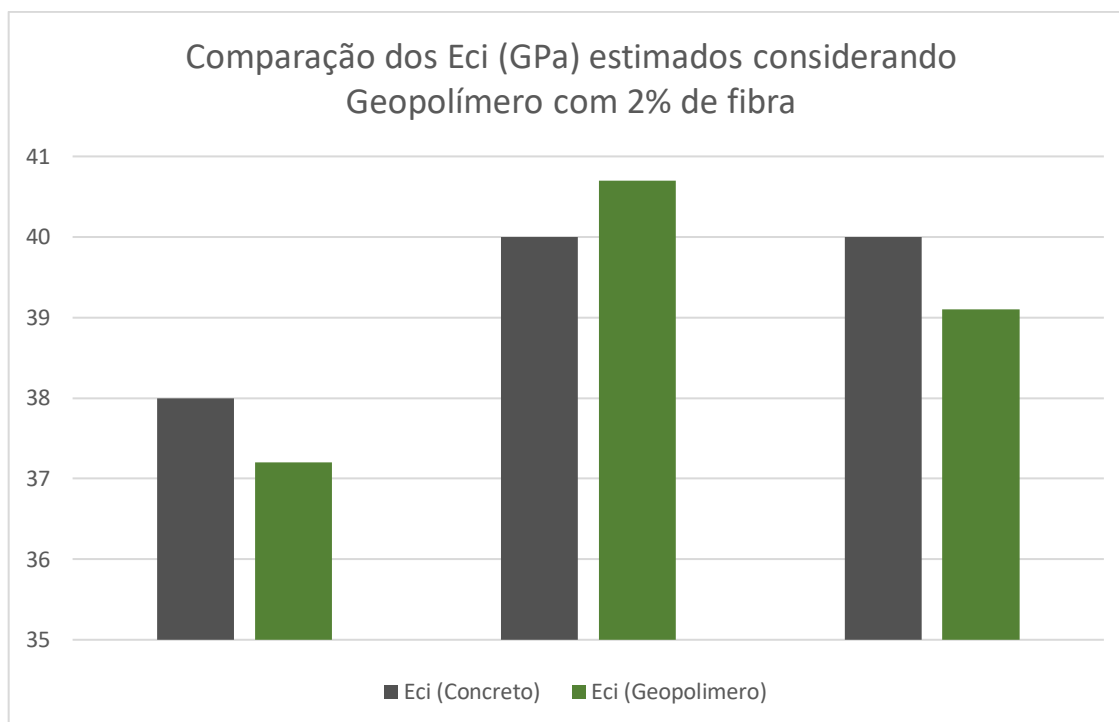


Figura 28: Gráfico comparativo do módulo de elasticidade estipulado para o concreto e para o geopolímero com 2% de fibra utilizando a norma NBR 6118.

Nota-se que os valores encontrados para os módulos de elasticidade dos geopolímeros com sete dias de cura são ligeiramente maiores do que para os concretos, o que reforça a tese de que são materiais de uma resistência muito elevada – Sendo considerada um tempo ideal para a cura do composto, no que diz respeito ao módulo de elasticidade.

É importante salientar que a norma Eurocode 2 também utiliza o parâmetro do tempo de cura como uma variável em sua formulação, entretanto, não leva em consideração os agregados do concreto, reduzindo assim o seu espectro de informações contidas na equação.

Em relação ao Código Fib 2010, este representou uma importante observação em relação a quantidade de fibras inseridas no composto, é possível verificar um sensível aumento na resistência à medida que mais fibras foram inseridas. Entretanto, ainda não foi possível realizar uma análise levando em consideração o tempo de cura, visto que sua formulação não inclui esse parâmetro no cálculo.

Portanto, diante da quantidade de parâmetros levados em consideração, é possível considerar a especificação NBR 6118/2014 como a mais apropriada para um cálculo mais preciso do módulo de elasticidade do geopolímero. A norma Eurocode 2/2004 também se apresenta com uma quantidade alta de parâmetros, entretanto,

reduz a sua precisão no cálculo ao não considerar os agregados dispostos no concreto. Além disso, também foi possível realizar uma comparação através dos valores estipulados para a resistência específica do concreto. A partir disso, foi possível verificar valores próximos aos do concreto.

5 CONCLUSÃO

Pelo presente trabalho, foi possível observar que os parâmetros de tempo de cura e de fibras de juta, ora acrescentados nos compostos, influenciaram de forma significativa a resistência elástica do material, e conseqüentemente, no módulo de elasticidade.

Ademais, o geopolímero se demonstrou com uma resistência aproximada se comparado ao concreto, o que reforça o argumento de ser tratado como um material muito promissor para ser usado de maneira alternativa. Suas propriedades de alta resistência a temperaturas elevadas e com um baixo índice de retração também são muito importantes, principalmente quando aplicados em áreas relacionadas a engenharia de materiais.

É válido ressaltar que algumas aproximações e considerações tiveram que ser feitas ao longo dos cálculos apresentados de forma a serem possíveis de se realizarem, visto que algumas variáveis dizem respeito aos agregados específicos do concreto. Isso foi feito de forma predominante na especificação NBR 6118/2014 que levou em consideração em sua formulação agregados específicos do concreto, entretanto, diante dos resultados expostos, foi possível analisá-la como a especificação mais apropriada para fins de cálculo do módulo de elasticidade para o geopolímero. A NBR 6118/2014 se comparada a Norma EUROCODE 2/2004 apresentou os seguintes valores: módulo de elasticidade 7% menor para o corpo de prova com 0% de fibras, módulo de elasticidade 4% menor para corpo de prova com 1% de fibras e módulo de elasticidade 12% maior para corpo de prova com 2% de fibras. Se comparada ao Código Modelo FIB 2010, a NBR 6118/2004 apresentou os seguintes valores: módulo de elasticidade 27% menor para corpo de prova com 0% de fibras, 13% menor para corpo de prova com 1% de fibras e 2% maior para corpo de prova com 2% de fibras. Nota-se que a adição de fibras causou uma maior variação no módulo de elasticidade calculado na norma NBR 6118/2004. Desta forma, uma abordagem mais pragmática, com poucas adições de fibra favorece a utilização da NBR 6118/2004 como guia, pois fornece os menores valores de módulo de elasticidade, garantindo uma margem mais conservadora para os cálculos estruturais.

Portanto, analisando os fatores, é possível dizer que o material geopolímero estudado se encontra como uma possível alternativa a outros materiais,

principalmente ao concreto, em diversas situações, tendo ganho em maior resistência contra agressividade e sendo um material mais duro também.

Como sugestão para trabalhos futuros, os autores sugerem uma análise comparativa entre os módulos de elasticidade obtidos por meio das normas utilizadas NBR 6118/2004, EUROCODE 2/2004 e Código Modelo FIB 2010 com os respectivos gráficos de tensão *versus* deformação do material geopolimérico para comprovar a acurácia destas normas para aplicações envolvendo o material geopolímero.

REFERÊNCIAS

318-05/318R-05 **Building Code Requirements for Structural Concrete** (ACI 318-05) and Commentary. 2005.

ALVES, L.A.; NOGUEIRA, A.S.; TAVARES, B.; BANEJA, M.D., De FREITAS, S.T.; De BARROS, S. **Experimental analysis on the adhesion of embedded glass and carbon fibre on geopolymer composite matrix**. In: *XVI Brazilian Materials Research Society (B-MRS), SBPMAT, v.1*. Gramado, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering**. [S.I.]: Wiley, 2013.

CEB-FIP Model Code 2010. **First complete draft, Lausanne**. Switzerland, 2010. DER KIUREGHIAN, A.; LIU, P. Structural Reliability Under Incomplete.

DAVIDOVITS, J. **Chemistry of geopolymeric systems, terminology**. In: *Geopolymer*. p. 9-39. 1999.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions**. France, 2005

DAVIDOVITS, J. **Properties of Geopolymer Cements**. Geopolymer Institute, Alkaline Cements and Concretes. Ucrânia, 1994.

DE MARCHI, R. D. **Estudo sobre a variabilidade do modulo de deformação do concreto associada a fatores intrínsecos à produção do material**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado), 2011.

DUXSON, P. et. al. **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. v. 269, p. 47-58. 2005.

EN 1992-1-1 (English): **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. 2004.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A. **Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials**. Journal of Materials Science, 2006.

GIANNOPOULOU, I.; PANIAS, D. **Structure, Design and Applications of Geopolymeric Materials**. Proceedings of the 3rd International Conference on Deformation Processing and Structure of Materials. Sérvia, 2007.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7.ed. ed. São Paulo, 2009.

PEREIRA, D. S. T. et al. **Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymeric concrete and portland concrete.** Journal of Materials Research and Technology, v. 7, p. 606-611. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2004

REDDY, D. V., et al. **Experimental Evaluation of the Durability of Fly Ash-based geopolymer Concrete in the Marine Environment.** In: *9th Latin American & Caribbean Conference, Medellin.* Colombia, 2011.

SHEHATA, L.D. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** In *ISAIA, G.C. (Ed.).* v. 1, n. 21, IBRACON. São Paulo, 2005.

VICKERS, L. et al. **Fire resistant geopolymers: role of fibres and fillers to enhance thermal properties.** Springer, 2015.

KRISHNAN, L., et al. **Geopolymer concrete, an eco-friendly construction material.** *International Journal of Research in Engineering and Technology.* v. 3, p. 164-167. 2014.

RANGAN, B. Vijaya. **Geopolymer concrete for environmental protection.** The Indian Concrete Journal, 88, p. 41-59. 2014.

CARIUS, A. C., et al. **Módulo de elasticidade do concreto: um estudo semi probabilístico e seus desdobramentos.** In: VI Congresso de Engenharia Civil. Juiz de Fora, 2019.

LOPES, G.; PAES, V. **Estudo da Resistência à compressão de um compósito com base geopolimérica com adição de fibra de juta.** Orientadora: Lais Alves. 2019. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)