

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRATURA DE CONCRETOS
GEOPOLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS DE AÇO**

RAPHAELA FERNANDES GOMES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

Maio de 2019

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRATURA DE CONCRETOS
GEOPOLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS DE AÇO**

RAPHAELA FERNANDES GOMES

“Dissertação apresentada ao PPGEC -
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil”

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

Maio de 2019

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRATURA DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS DE AÇO

RAPHAELA FERNANDES GOMES

“Dissertação apresentada ao PPGEC -
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil”

Aprovada em 31 de Maio de 2019.

Comissão Examinadora:

Eng. Eliane Fernandes Côrtes Pires, D. Sc. – UFF

Prof. Afonso Rangel Garcez de Azevedo, D. Sc – UFF

Prof. Jonas Alexandre, D. Sc. LECIV – UENF

Prof. Eduardo Atem de Carvalho, Ph. D. LAMAV – UENF

Prof. Dylmar Penteado Dias, D. Sc. LECIV – UENF (Presidente)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as oportunidades e por me guiar em toda essa caminhada.

Agradeço aos meus pais Vitor e Wilma por todo amor, dedicação e por me apoiarem em tudo. Sou eternamente grata a vocês.

Agradeço ao Prof. Dylmar por todo incentivo, companheirismo e amizade durante todo o meu mestrado.

Aos meus amigos de curso por tornarem o dia-a-dia mais agradável e por compartilharem comigo todos os momentos.

Agradeço ao Prof. Flávio da PUC-Rio por permitir que eu realizasse os meus ensaios no laboratório da PUC.

Agradeço aos meus familiares por todo incentivo, apoio e amor durante toda a minha vida acadêmica.

Ao meu namorado por me ouvir, apoiar e incentivar em todos os momentos principalmente nos de dificuldade.

A todos do LECIV que contribuíram para que os meus dias fossem melhores e mais divertidos.

À FAPERJ por viabilizar financeiramente todo o meu mestrado.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar os parâmetros de fratura de concreto geopolimérico à base de metacaulim reforçado com fibras de aço com gancho nas extremidades. A solução alcalinizadora era composta por silicato de sódio alcalino e hidróxido de sódio. As resistências à compressão, à tração por compressão diametral e extração de módulo de elasticidade foram obtidas pelos seus respectivos ensaios aos 21 dias de idade. Foi realizado o ensaio de resistência à flexão em vigas entalhadas com frações volumétricas de fibras de 0, 0,25 e 0,50% de acordo com a norma EN 14651 (2005). Os parâmetros de fratura obtidos foram: deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD), fator de intensidade de tensão (K_I), taxa de energia armazenada (G_I), abertura da ponta da trinca (CTOD), Integral J e resistência à fratura R. Também foi avaliado o desempenho da fibra e a tenacidade a partir da resistência à tração na flexão residual ($f_{r,j}$) e resistência à flexão equivalente ($f_{eq,j}$). Os resultados comprovaram a eficiência das fibras de aço em diminuir a propagação das fissuras e na prevenção da fratura dos compósitos. Todos os parâmetros de fratura sofreram incrementos com a inserção de fibras, principalmente para a fração volumétrica igual a 0,50%, e o parâmetro mais influenciado pelas fibras de aço foi a taxa de energia armazenada (G_I), com aumento de 115% para $V_f = 0,50\%$ em relação à matriz sem reforço fibroso.

Palavras-chave: concreto geopolimérico, fibras de aço, parâmetros de fratura.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the fracture parameters of geopolymer concrete reinforced with steel fibers with hook at the ends. The alkaline activating solution was composed by alkaline sodium silicate and sodium hydroxide. Compressive and indirect tensile (Brazilian test) strengths and modulus of elasticity were obtained by their respective tests at 21 days of age. The flexural strength test was performed on notched beams with volumetric fiber fractions of 0, 0.25 and 0.50% according to EN 14651 (2005). The fracture parameters obtained were: crack mouth opening displacement (CMOD), stress intensity factor (K_I), stored energy rate (G_I), crack tip opening displacement (CTOD), Integral J and fracture resistance R. Fiber performance and toughness from the tensile strength in the residual flexure ($f_{r,j}$) and equivalent flexural strength ($f_{eq,j}$) were also evaluated. The results proved the efficiency of the steel fibers in reducing the propagation of cracks and in the prevention of fracture of the composites. All the fracture parameters were increased with fiber insertion, mainly for the volumetric fiber fraction of 0.50%, and the parameter most influenced by the steel fiber was the stored energy rate (G_I), increasing from 115% to 0.50 % relative to the matrix without fibrous reinforcement.

Keywords: geopolymer concrete, steel fibers, fracture parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Transferências de tensões em: a) matriz íntegra; b) matriz fissurada; c) fissura contendo fibras (SILVEIRA, 2018).....	8
Figura 2.2- Comportamento mecânico de um compósito cimentício reforçado com fibras submetido à flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).....	8
Figura 2.3 - Curvas de tensão versus deformação para matrizes frágeis com reforço de fibras: V_f baixo (A), V_f intermediário (B) e V_f elevado (C) (BALAGURU et al., 1992).....	10
Figura 2.4 - Tipos de fibras de aço.	12
Figura 2.5 - Distribuição de tensão ao longo da fibra e modo de ruptura, em função do comprimento crítico (PEREIRA, 2017).	13
Figura 2.6 - Modos de solitação na ponta da trinca: Modo I (A), Modo II (B); e Modo III (C) (FERREIRA e HANAI, 2017).	15
Figura 2.7 - Tipos de zona não lineares em diferentes tipos de materiais (SILVA, 2017).....	18
Figura 2.8 - Tipos de zonas não lineares em diferentes tipos de materiais (SILVA, 2017).....	18
Figura 2.9 - Sólido pré-fissurado solicitado à fratura e diagrama P versus CMOD até a ruptura (FERREIRA e HANAI, 2017).	19
Figura 2.10 - Abertura da ponta da trinca ou CTOD (MEDINA, 2014).	21
Figura 2.11 - Representação de um caminho de integração (EFFTING, 2004).	22
Figura 2.12 - Modelos de curva-R (CALAND, 2001).	23
Figura 2.13- Áreas sob a curva carga-deflexão para obtenção dos parâmetros de resistência à tração na flexão (adaptado da RILEM TC162-TDF).	26
Figura 3.1 - Difractograma de raios X do metacaulim (OLIVEIRA, 2018).....	29
Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia.....	30
Figura 3.3 - Curva granulométrica da brita 0.	30
Figura 3.4 - Geometria da fibra de aço 45/30 BL. Fonte: Catálogo Dramix ArcelorMittal.....	32
Figura 3.5- Corpos de prova nos moldes metálicos (a) e após o desmolde (b).....	34
Figura 3.6 – Corpo de prova para ensaio de compressão axial e para determinação do módulo de elasticidade.....	35
Figura 3.7 Corpo de prova para ensaio de tração por compressão diametral.	37
Figura 3.8 -Esquema de ensaio dos corpos de prova prismáticos para determinação dos parâmetros de fratura - dimensões em mm (adaptado EN 14651, 2005).	38
Figura 3.9 - Clip gauge acoplado ao corpo de prova.....	38
Figura 3.10 – Corpo de prova no atuador hidráulico.	38
Figura 4.1- Carga-deflexão média dos CCG.....	43
Figura 4.2- Tensão à tração na flexão versus CMOD dos CCG sem fibras.	44
Figura 4.3- Concreto geopolimérico sem reforço fibroso.	45
Figura 4.4- Tensão à tração na flexão versus CMOD dos CCG com $V_f = 0,25\%$	46
Figura 4.5- Tensão à tração na flexão versus CMOD dos CCG com $V_f = 0,50\%$	46

Figura 4.6 - Comportamento do CCG com $V_f = 0,50\%$ para $CMOD = 4mm$	47
Figura 4.7- Resistência média à tração na flexão dos CCG.	48
Figura 4.8 - Curvas carga versus $CMOD$ dos CCG.	52
Figura 4.9- Valores médios de K_{IC} em função de V_f dos CCG.....	53
Figura 4.10- Valores médios de $CTOD_C$ em função de V_f dos CCG.	54
Figura 4.11 - Gráfico carga-deflexão média até a carga máxima atingida.	56
Figura 4.12 - Resistência à fratura R em função de V_f dos CCG.	57
Figura 4.13 - Diagramadas propriedades mecânicas em função da fração volumétrica de fibras.	60
Figura 4.14 - Diagrama dos parâmetros de fratura em função da fração volumétrica de fibras.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas de diversos tipos de fibra (TRIDADE, 2017)....	9
Tabela 3.1 - Características físicas e químicas do metacaulim.....	29
Tabela 3.2 – Laudo do fabricante do silicato de sódio alcalino.....	31
Tabela 3.3 - Laudo de análise química do NaOH.	31
Tabela 3.4 - Propriedades físicas e mecânicas da fibra de aço.	32
Tabela 3.5 - Quantidade de material para confecção de 1,0 m ³ de concreto geopolimérico.	33
Tabela 3.6 - Parâmetros do ensaio de compressão axial e na determinação do módulo de elasticidade.	36
Tabela 3.7- Parâmetros utilizados no ensaio de tração por compressão diametral...36	
Tabela 3.8 - Parâmetros do ensaio de flexão a três pontos em prismas.	39
Tabela 4.1 - Valores médios de resistência à compressão dos CCG.	40
Tabela 4.2 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos CCG.....	41
Tabela 4.3 - Resistência à tração por compressão diametral dos CCG.	42
Tabela 4.4 - Carga média máxima atingida no ensaio no ensaio de flexão de prismas entalhados.	43
Tabela 4.5 - Valores de CMOD, de resistência no LP e de resistência última dos cp's prismáticos com entalhe.	48
Tabela 4.6 - Tensão residual à flexão para CMOD igual à 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm dos CCG.	49
Tabela 4.7 - Resistências à tração na flexão residual e à flexão equivalente dos CCG.	49
Tabela 4.8 – Valores da razão $f_{R,3}/f_{R,1}$ dos CCG.....	51
Tabela 4.9 -Valores de K_{IC} , $CTOD_C$ e $CMOD_C$ dos CCG.	53
Tabela 4.10 - Valores de G_{IC} , J_{IC} e curva-R dos CCG.	55
Tabela 4.11 - Comparação de parâmetros de fratura encontrados por diferentes autores.....	58
Tabela 4.12 - Comparação entre os parâmetros de fratura entre o concreto geopolimérico e o concreto de cimento convencional.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Extensão da trinca
- a_c - Extensão crítica da trinca
- a_0 - Extensão inicial da trinca (extensão do entalhe)
- b - largura do corpo de prova prismático
- d_1, d_2 - Raízes da equação
- f_{cm} - Resistência média à compressão do concreto
- f_{ck} - Resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias
- $g(\alpha)$, $g(a/b)$ - Função geométrica da MFLE
- h - altura seção transversal da viga
- l - Comprimento do vão
- n - Número
- C_i - Flexibilidade ou (compliância) inicial para curva P-CMOD
- C_s - Flexibilidade (compliância) secante para curva P-CMOD
- E - Módulo de elasticidade
- E_{ci} - Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto
- F - Força
- $F(a/d)$ - Função geométrica
- G_{IC} - Taxa de liberação de energia
- H_0 - Espessura do *clip gauge*
- $J_{máx}$ - Integral J na carga máxima
- K_I - Fator de intensidade de tensão no modo I de abertura da trinca
- K_{IC} - Fator de intensidade de tensão crítico no modo I de abertura da trinca
- L_0 - Comprimento do CP, vão da viga
- M - Momento ou momento fletor atuante
- $P_{máx}$ - Carga máxima aplicada
- R - Resistência à fratura
- U - Energia de deformação, energia por unidade de espessura
- $U_{máx}$ - Energia absorvida na carga máxima
- V_f - Volume de fibras
- W - Energia requerida para a formação da trinca
- α - Razão entre a extensão da trinca e a altura do CP; Parâmetro geométrico para determinação da curva-R
- α_0 - Razão entre a extensão inicial da trinca e a altura do CP

β - Parâmetro geométrico para determinação da curva-R

δ - Deslocamento, deflexão

Δ_a - Extensão nominal da trinca ($a-a_0$)

ν - Coeficiente de Poisson

Φ - Diâmetro das fibras de aço

η - Coeficiente de eficiência relacionado com a orientação da fibra

σ_s - Tensão normal no aço de armadura passiva

$f_{r,1}$ e $f_{r,2}$ - Tensões residuais no estado limite de serviço

$f_{r,3}$ e $f_{r,3}$ - Tensões residuais no estado limite último

f_{eq} - Tensão de tração na flexão equivalente

CCG - Concreto de cimento geopolimérico

CCP - Concreto de cimento Portland

CMOD - Deslocamento de abertura da boca da trinca, do inglês *Crack Mouth Opening Displacement*

CMOD_c - Deslocamento crítico de abertura da boca da trinca

CP - Corpo de prova; cimento Portland

CTOD - Deslocamento de abertura da ponta da trinca, do inglês *Crack Tip Opening Displacement*

CTOD_c - Deslocamento crítico de abertura da ponta da trinca

DRX - Difração de raios X

LP - Limite de proporcionalidade

MFLE - Mecânica da fratura elástica linear

MFEP - Mecânica da fratura elastoplástica

MC - Metacaulim

NBR - Norma Brasileira

PS - Polissialato

PSS - Polissiloxossilato

RILEM - *Réunion Internationale des Laboratoires d'Éssais de Matériaux*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativas.....	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 GEOPOLÍMEROS	4
2.1.1 Matérias-primas.....	4
2.2 CONCRETO GEOPOLIMÉRICO	5
2.3 REFORÇO POR FIBRAS DE AÇO.....	7
2.4 FIBRAS DE AÇO.....	11
2.5 MECÂNICA DA FRATURA	14
2.5.1 Tipos de ruptura.....	15
2.5.2 Mecânica da fratura elástica linear (MFEL)	15
2.5.3 Mecânica da fratura elastoplástica (MFEP)	17
2.6 CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS RESIDUAIS E EQUIVALENTES.....	24
2.7 MECÂNICA DA FRATURA APLICADA EM GEOPOLÍMEROS	26
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	28
3.1 MATERIAIS.....	28
3.1.1 Metacaulim	28
3.1.2 Agregado miúdo	29
3.1.3 Agregado graúdo.....	30
3.1.4 Silicato de sódio alcalino	31
3.1.5 Hidróxido de sódio	31
3.1.1 Água	32

3.1.2	Fibras de aço	32
3.1.3	Solução ativadora alcalina	33
3.1.4	Concreto geopolimérico	33
3.2	MÉTODOS	34
3.2.1	Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade longitudinal	34
3.2.2	Resistência à tração por compressão diametral	36
3.2.3	Ensaio de flexão em prisma	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	40
4.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON	41
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	42
4.4	VIGAS ENTALHADAS	42
4.4.1	Carga <i>versus</i> flecha ($P-\delta$)	42
4.4.2	Resistência à tração na flexão	43
4.4.3	Parâmetros de fratura dos CCG	51
4.5	VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DOS PARÂMETROS DE FRATURA	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1	CONCLUSÕES	62
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
6	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais antigos do mundo e, também, o material de construção mais utilizado atualmente. Isso porque oferece importantes propriedades como resistência mecânica e durabilidade para as edificações. A Engenharia Civil tem crescido muito no mundo e, a cada dia, há a descoberta de novos materiais que podem ser empregados na construção civil. O concreto geopolimérico (CCG) é uma descoberta recente e que traz muitos benefícios para o ramo.

O CCG detém propriedades que superam os concretos convencionais; resistência a altas temperaturas (DIAS *et al.*, 2005), a ataques de ácidos e sulfatos (LUUKKONEN *et al.*, 2018) e alta durabilidade (PALOMO *et al.*, 2014) são algumas delas. Atrelado a essas propriedades, uma das vantagens de sua utilização é não precisar realizar cura úmida para minimizar os efeitos da retração.

Microestrutura, aderência ao aço no concreto armado, utilização em pisos industriais e em pavimentação e aplicações em que se deve ter um ótimo desempenho no que diz respeito à durabilidade a agentes químicos agressivos foram algumas das pesquisas já realizadas em relação aos materiais alcalizados. Entretanto, a matriz geopolimérica, assim como a matriz de cimento Portland, necessita de reforço com fibras para aumentar a deformação e diminuir o crescimento de fratura quando submetida a tensões de tração e flexão (BHUTTA *et al.*, 2017).

Em materiais, como o concreto, existem vazios e também microfissuras que podem ocorrer antes mesmo da estrutura estar sendo submetida a carregamentos. A existência dessas discontinuidades propicia a concentração de tensões elevadas, mesmo no início do carregamento do componente estrutural e, conseqüentemente, atinge de forma direta a resistência do material. A introdução de fibras no concreto pode aumentar a resistência mecânica e a ductilidade das estruturas quando submetidas à tração direta, à tração na flexão e, também à compressão, assim como melhorar o comportamento pós-fissuração, diminuir a retração, entre outros.

A utilização de fibras em concretos é muito comum, pois elas atuam como pontes sobre as fissuras, sejam elas provenientes de carregamentos, de retração ou não. O bom desempenho da fibra está diretamente ligado à aderência existente entre a matriz cimentícia e a fibra e, quando estas são rígidas e resistentes, limitam o tamanho da fissura. As fibras tornam os compósitos cimentícios mais dúcteis após a fissuração, aumentando a tenacidade destes compósitos reforçados (LEE *et al.*, 2018).

A mecânica da fratura é um ramo da engenharia que estuda o comportamento de materiais que apresentam algum tipo de descontinuidade e estão sob atuação de carga. Quando o objeto de estudo é a integridade estrutural, a mecânica da fratura contribui para analisar desde a formação até o impedimento da propagação das fissuras, aspirando ao desempenho adequado dos materiais e das estruturas. A propriedade do material que quantifica a resistência à propagação de trincas é chamada, na mecânica da fratura, de tenacidade à fratura do material. Segundo Effting (2004), estudar as tensões relacionadas às trincas é importante para determinar a carga estática máxima e a vida de fadiga dos componentes, pois uma estrutura pode colapsar se possuir trincas que atinjam um tamanho crítico.

Estudos recentes analisaram os parâmetros de fratura em concreto convencional e em concreto geopolimérico reforçados com fibras e observaram que a tenacidade à fratura aumenta com a inserção das fibras. Lee *et al.* (2018) concluíram que os parâmetros de fratura, em concreto convencional, cresceram com o aumento do volume de fibras utilizado. Islam *et al.* (2017) observaram que, ao introduzir fibras de aço em concreto geopolimérico com óleo de palmeira, a primeira resistência à fissuração do concreto aumentou de 1,5 a 3,5 vezes em comparação com a mistura sem adição de fibras, e que não houve a formação de trincas por causa da diminuição da propagação das microfissuras na estrutura.

Diante do exposto, é essencial a realização de estudos que analisem os parâmetros de fratura de concretos geopoliméricos reforçados por fibras de aço, que é o principal objetivo do presente estudo.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Os concretos geopoliméricos são uma nova descoberta para substituição do concreto Portland. Os geopolímeros que formam o concreto são materiais que podem ser compostos por diversas fontes de aluminossilicatos e soluções ativadoras alcalinas, produzindo geopolímeros diferentes a cada combinação. Os concretos geopoliméricos vem sendo estudados por diversos autores e suas propriedades e seu comportamento à fratura estão sendo avaliados de diferentes formas. A utilização de diversos tipos de fibra, assim como a obtenção dos parâmetros de fratura destes concretos geopoliméricos reforçados são de grande valia para ampliar ainda mais o conhecimento deste novo material.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa são:

1.2.1 Objetivo geral

A análise do comportamento de fratura de concretos geopoliméricos reforçados por fibras de aço.

1.2.2 Objetivos específicos

- analisar a fratura por meio do ensaio de tração na flexão de corpos de prova entalhados reforçados com diferentes frações volumétricas de fibras (0; 0,25 e 0,50%) devido a não utilização de superplastificante o que tornou menos trabalhável teores maiores de fibras;
- obter os parâmetros de fratura ($CMOD_C$, $CTOD_C$, K_{IC} , curva-R, integral J e energia G), que servirão para averiguar se houve aumento ou não da tenacidade à fratura dos concretos geopoliméricos;
- analisar a eficiência das frações volumétricas de fibras no controle e na propagação das fissuras, assim como no reforço do concreto geopolimérico;
- comparar os resultados obtidos com outros concretos de cimento geopolimérico (CCG) e de cimento Portland (CCP) encontrados na literatura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, a saber:

- Capítulo 1: aborda a introdução e os objetivos desta pesquisa.
- Capítulo 2: consiste na revisão bibliográfica sobre geopolímeros, mecânica da fratura e concreto com fibras.
- Capítulo 3: traz a caracterização dos materiais empregados, bem como o fabricação dos concretos geopoliméricos e sua caracterização mecânica.
- Capítulo 4: apresenta o estudo do comportamento mecânico dos concretos e a obtenção dos parâmetros de fratura.
- Capítulo 5: são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros vêm sendo estudados desde 1939. No entanto, somente em 1978 que Joseph Davidovits elaborou e aplicou o termo geopolímero, patenteando-o em 1981.

É importante ressaltar que os geopolímeros são um único produto resultante de uma tecnologia utilizada para confeccionar diferentes materiais, como os aglomerantes geopoliméricos para confecção de argamassas, concretos e resinas, entre outros. São considerados, conforme descreveu Davidovits (2008), um novo material para compósitos com fibras e um novo cimento para concreto.

Os geopolímeros são polímeros que ao serem submetidos à policondensação se formam rapidamente à baixa temperatura, no espaço de poucos minutos. De acordo com Barros *et al.* (2012), são polímeros inorgânicos alcalinizados com elevado desempenho térmico e mecânico, sendo um material estrutural alternativo.

2.1.1 Matérias-primas

Essencialmente, as matérias-primas empregadas nos geopolímeros são fontes de aluminossilicatos e um ativador alcalino. Os ativadores alcalinos devem conter pH elevado suficientemente para possibilitar a dissolução da parcela amorfa do precursor sólido; já os aluminossilicatos devem apresentar uma quantidade representativa de material amorfo e dimensão granulométrica propícia (LONGHI, 2015). As argilas calcinadas (BAI *et al.*, 2018), cinzas volante (SANJAYAN *et al.*, 2015; NOUSHINI *et al.*, 2018) e as escórias de alto-forno (YANG *et al.*, 2008) são exemplos dos precursores mais utilizados. Já os ativadores alcalinos mais comuns são os hidróxidos de sódio e potássio e os silicatos de sódio e potássio.

2.1.1.1 Precursores

São muitos os pesquisadores que utilizam argilas calcinadas como material precursor na produção de geopolímeros, sendo o metacaulim (MC) a argila mais utilizada. O MC é um material pozolânico amorfo, obtido pela calcinação de argilas e rochas compostas essencialmente de caulinita. Quando o caulim é beneficiado por

moagem e tratamento térmico entre 600 e 850°C origina o metacaulim, que é composto majoritariamente por silicato de alumínio hidratado $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ e perde íons hidroxila de sua estrutura cristalina com a calcinação, transformando-se em metacaulinita $[Al_2Si_2O_7]$ (CUNHA *et al.*, 2010). Davidovits (1994) afirma que a conversão do caulim em metacaulim torna o material mais reativo com propriedades pozolânicas e, o produto final, dependendo da composição química e mineralógica do caulim-base, pode apresentar diferentes graus de finura, superfície específica e colorações variadas.

2.1.1.2 Ativadores alcalinos

Os ativadores alcalinos podem ser compostos de apenas uma substância (monocomponentes) ou por uma combinação delas (bicomponentes). Quando se trata de ativação alcalina a reação se resume no processo de policondensação. A matéria-prima possui SiO_2 , Al_2O_3 e os ativadores alcalinos dissolvem esses compostos alcançando as mínimas condições adequadas à reação. Os agentes modificadores da estrutura são K^+ e Na^+ , que contrabalançam o excesso de cargas negativas decorrentes da alteração de condensação do alumínio com o oxigênio, sendo, então, os elementos que estabelecem as propriedades ligantes.

De acordo com Rodrigues (2014), a reação de síntese do geopolímero pode ser acelerada com a utilização de uma solução alcalina bicomponente (hidróxido alcalino + silicato alcalino), devido à quantidade de SiO_2 solubilizada contida no silicato e que está disponível para reagir com o alumínio tetraédrico do precursor geopolimérico.

No processo de geopolimerização há a necessidade de utilizar água, uma vez que atua como meio de condução iônica e é importante para que o grau de saturação adequado seja preservado, resultando em uma geopolimerização eficiente. É importante ressaltar que o excesso de água, assim como a sua privação, ocasionam um desequilíbrio na reação e resultam em estruturas instáveis ou com descontinuidades físicas.

2.2 CONCRETO GEOPOLIMÉRICO

O concreto geopolimérico tem seu processo de fabricação semelhante ao concreto convencional; no entanto, não há pasta de cimento Portland e sim um geopolímero utilizado como aglutinante. A resistência à compressão e a

trabalhabilidade do concreto geopolimérico são influenciadas pelas proporções e propriedades dos materiais constituintes que formam a pasta geopolimérica (RAMUJEE *et al.*, 2017).

O desempenho mecânico dos concretos geopoliméricos evidenciou que apresentam comportamento frágil, assim como os do concreto de cimento Portland. Isso significa que exibem o fenômeno da deformação localizada elastoplástica na região imediatamente à frente e em torno da ponta de descontinuidades pré-existentes quando estão sob esforços mecânicos (PIRES *et al.*, 2017). Entretanto, Sarker *et al.* (2013) concluíram que o concreto geopolimérico necessita de tensão maior para formação de trincas do que o concreto de cimento Portland e Pires *et al.* (2017), a partir da análise das propriedades de fratura das vigas de concreto, constataram que, para a mesma resistência à compressão, o concreto de cimento geopolimérico é mais tenaz do que o equivalente de cimento Portland.

Dias e Thaumaturgo (2005) estudaram a tensão de aderência no concreto de cimento Portland e no concreto geopolimérico através do ensaio de arrancamento de barras de aço lisas e concluíram que para um mesmo volume de pasta de aglomerantes, houve um aumento de, aproximadamente, 4 vezes na tensão de aderência do concreto geopolimérico em relação ao concreto de cimento Portland devido a formação de uma matriz mais densa e a ausência de cristais de hidróxido de cálcio (Portlandita) na interface aço-concreto. Ng *et al.*, 2013 ao estudar vigas de concreto geopolimérico reforçado com fibras de aço se propuseram a analisar o comportamento dessas vigas quando submetidas ao cisalhamento. Eles concluíram que a resistência ao cisalhamento do concreto geopolimérico aumentou consideravelmente com o incremento do volume de fibras assim como o seu comportamento de fissuração.

Kumar *et al.*, 2018 estudaram o desempenho de concreto geopolimérico com e sem fibra de aço sob cura ambiente e sob calor. Eles constataram que o CCG com fibras tem melhores propriedades mecânicas que o CCG sem fibras e que, ao 7 dias, a cura sob calor apresentou melhores resultados que sob cura ambiente no entanto, aos 28 dias a cura ambiente apresentou melhores resultados. Pereira (2006) comparou o CCG com o CCP, ambos reforçados por fibras, e observou que as propriedades de resistência à compressão, tração por compressão diametral, tração na flexão e tenacidade à fratura do CCG foram melhores do que as do CCP devido à

microestrutura massiva e de baixa porosidade e, também, pela melhor interface entre a fibra e a matriz apresentada pelo CCG.

Peçanha (2012) comprovou, através de seus estudos de comparação das propriedades do CCG e do CCP, que o CCG apresentou elevada resistência à compressão nos primeiros dias, retrações autógena e hidráulica muito baixas, além de menor permeabilidade que o CCP. Davidovits, 1990; Dias, 2001 e Sumajouw e Rangan, 2006, em seus estudos, verificaram que a resistência ao ataque por ácidos é outra grande vantagem dos geopolímeros sobre os ligantes à base de cimento Portland.

2.3 REFORÇO POR FIBRAS DE AÇO

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a inserção de fibras em matrizes cimentícias pode melhorar o comportamento frágil quando estas estão submetidas a altas tensões. O reforço por fibras vai atuar ampliando a capacidade de absorção de energia do concreto, levando a uma melhor ductilidade, além de elevar consideravelmente a baixa resistência à tração e à flexão do concreto. As propriedades mecânicas aos esforços de tração e o aumento da tenacidade à fratura das matrizes cimentícias são melhoradas com a adição de fibras, pois estas agem como um microrreforço, formando pontes nas fissuras, melhorando o desempenho do concreto (Figura 2.1).

Lee *et al.* (2018) afirmam que a eficiência de ligação das fibras está diretamente atrelada à força de adesão entre a matriz e a fibra, e que pisos industriais utilizam o reforço por fibras de aço, pois estas elevam a resistência a impactos e vibrações. Entretanto, Shah *et al.* (1995) salientam que existe uma limitação quanto ao teor de fibra utilizado, ou seja, uma fração volumétrica menor que 2% pois acima disso compromete, consideravelmente, a trabalhabilidade do concreto. Quanto maior a trabalhabilidade do concreto maior a facilidade de alinhamento das fibras na direção do corpo de prova resultando no aumento da resistência à tração.

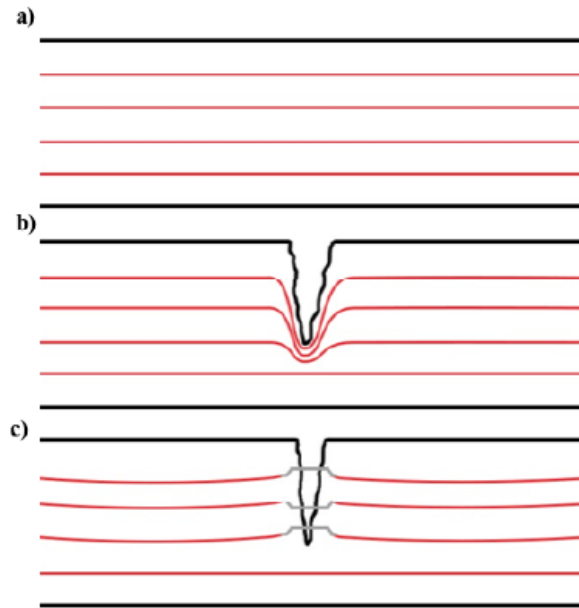


Figura 2.1 - Transferências de tensões em: a) matriz íntegra; b) matriz fissurada; c) fissura contendo fibras (SILVEIRA, 2018).

Na Figura 2.2 é ilustrada a curva típica de força *versus* deflexão do concreto simples e do concreto reforçado por fibras. Observa-se que o concreto simples rompe quando tem a deflexão correspondente à tensão máxima. Já o concreto reforçado por fibras, mesmo com deflexão superior à do concreto simples, resiste a cargas mais elevadas, rompendo quando há o deslocamento da fibra em relação à matriz ou o arrancamento da fibra da matriz (MEHTA e MONTEIRO, 2014).



Figura 2.2- Comportamento mecânico de um composto cimentício reforçado com fibras submetido à flexão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

É preciso estar atento a parâmetros como: diferença de módulo de elasticidade entre a fibra e a matriz; compatibilidade química entre a fibra e a matriz (sobretudo quanto à resistência da fibra à alcalinidade do meio); e diferença de expansão térmica entre a fibra e a matriz para que se faça um bom reforço (SILVA, 2000).

Segundo Trindade (2017), os compósitos variam de acordo com o tipo de matriz e fibra escolhidas (Tabela 2.1), da mesma forma que a geometria, distribuição, orientação e concentração. As fibras convencionais curtas de aço, sintéticas de carbono e têxteis naturais exibem diferenças em suas propriedades mecânicas.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas de diversos tipos de fibra (TRIDADE, 2017).

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Acrílico	1,16	260 - 1000	13,78 - 19,30	-
Vidro	2,5	3400	72	-
Aço	7,85	1050 - 2000	210	-
Basalto	2,8	4810	89	3,15
Carbono	2,12	2600 - 4020	540 - 640	0,4 - 0,8
Sisal	1,25	227,8	10,94 - 26,7	2,08 - 4,18
Juta	1,39	399	26,25	1,6
Coco	1,33	108,26 - 2,51	2,5-4,5	13,7 - 41,0

As trincas são exemplos de defeitos agudos presentes em um material. A concentração de tensões que existe, de acordo com as características geométricas de uma trinca, leva à tensão limite de resistência à tração do material, que é atingida localmente na ponta da trinca. A ruptura de um material cimentício é resultado da disseminação de microtrincas ou defeitos pré-existentes na matriz (PEREIRA, 2006).

Quando se tem fibras em uma matriz cimentícia, a propagação das trincas é dificultada, pois as fibras absorvem e dissipam parte da energia que seria aproveitada na formação de novas superfícies de fratura, fazendo com que as trincas cursem um trajeto maior, sendo capaz de ganhar resistência mecânica e tenacidade (BENTUR e MINDESS, 2007).

De acordo com Balaguru *et al.* (1992), o volume de fibra está relacionado a três tipos de mecanismos de ruptura, após a fissuração da matriz. A Figura 2.3 mostra as

curvas de tensão de tração *versus* deformação para matrizes frágeis reforçadas por fibras.

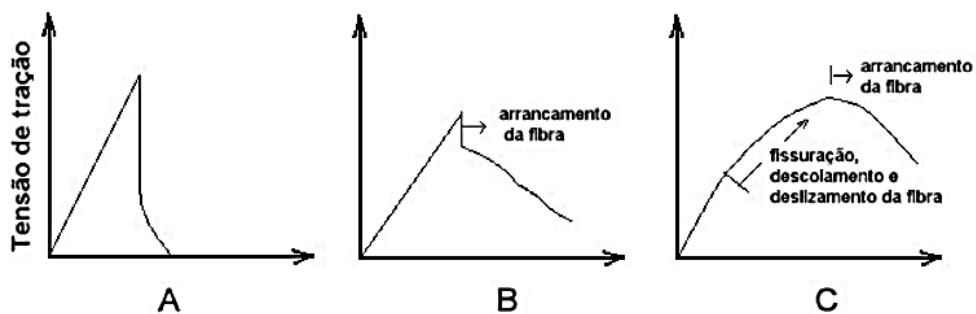


Figura 2.3 - Curvas de tensão *versus* deformação para matrizes frágeis com reforço de fibras: V_f baixo (A), V_f intermediário (B) e V_f elevado (C) (BALAGURU *et al.*, 1992).

Com base na Figura 2.3 percebe-se que em (A) há a ruptura do compósito imediatamente após a fratura da matriz, podendo estar relacionado ao baixo volume de fibras; em (B) ocorre a fissuração da matriz e, logo em seguida, a capacidade de carga diminui. No entanto, o compósito mantém suportando cargas menores que a carga máxima. Neste caso, a carga está sendo transferida do compósito para as fibras que atravessam as fissuras, ou seja, a maior capacidade de carga vem das fibras que transferem a carga para o outro lado da matriz através das fissuras. À medida que a deformação aumenta, as fibras são arrancadas da matriz, resultando em uma menor capacidade de carga. O compósito caracterizado em (B) não leva ao aumento de resistência mecânica, mas gera ganho de tenacidade. Em (C) há uma queda na rigidez da curva por causa da perda da contribuição da matriz. Após a fissuração, ocorre uma inclinação dependente da fração de fibras (V_f) e da capacidade de aderência da fibra com a matriz. Vão surgindo mais fissuras, ao passo que a carga é aumentada até que as fibras começam a ser arrancadas da matriz e, conseqüentemente, a capacidade de carga começa a reduzir. Quando são utilizados compósitos reforçados por fibras, o comportamento de ruptura ocorre conforme descrito em (B) e (C) da Figura 2.3.

Os materiais compósitos com reforço de fibras têm maior diferencial no estágio pós-fissurado, pois as fibras aumentam a capacidade de absorção de energia do material, uma vez que a deformação necessária para causar fissuras na matriz cimentícia é menor que a deformação necessária para a ruptura das fibras. Na pós-fissuração rompe a aderência entre as fibras e a matriz e o processo de transferência de tensões é controlado pelas tensões de atrito (BASTOS, 1999).

Assim como o concreto convencional o geopolimérico apresenta comportamento frágil e, por isso, necessita de reforço por fibras para melhorar suas propriedades mecânicas.

2.4 FIBRAS DE AÇO

As fibras de aço são unidades descontínuas de diferentes formatos, dimensões e tipos de aço e que podem ser classificadas como fibras de alto módulo de elasticidade, elevada resistência à tração e excelente aderência, além de boa compatibilidade com o meio alcalino. Por possuírem tais características, são mais designadas para reforço de concretos do que as fibras de asbesto, sintéticas e de vidro. As fibras de aço tem o papel de reduzir a propagação de trincas estruturais devido ao carregamento no concreto, pois aumentam a resistência mecânica à tração, ao desgaste superficial e ao impacto. Vale lembrar que também são responsáveis por aumentar a resistência a abalos sísmicos e a vibrações de máquinas (BENTUR e MINDESS, 2007).

São muitos os modos de fabricação das fibras de aço, sendo o mais comum o corte de arame trefilado em aço de baixo teor de carbono. Quando se trata da geometria das fibras, as de aço possuem elevada variedade seja na forma transversal circular, achatada, ondulada ou onduladas apenas nas extremidades (Figura 2.4). O fator de forma ou razão de aspecto (razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra l/d) varia entre 20 a 100 (ACI 544.1R-96, 2009). Quando se aumenta o comprimento da fibra ou se reduz a seção transversal, a esbeltez é maior. De maneira geral, quanto maior a esbeltez da fibra, maior a capacidade dela resistir após a fissuração do concreto.

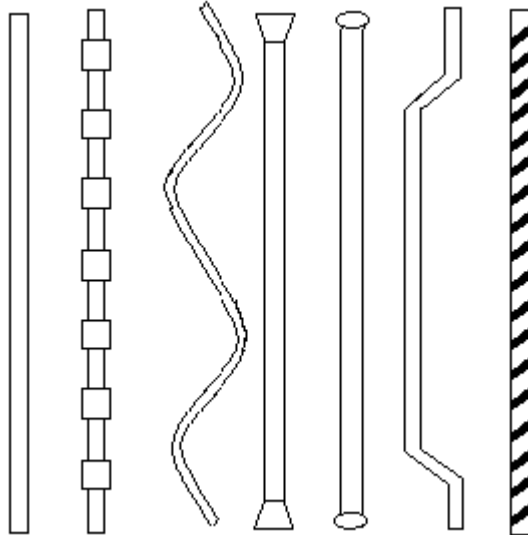


Figura 2.4 - Tipos de fibras de aço.

2.4.1.1 Eficiência da fibra

Como dito anteriormente, o desempenho dos materiais compósitos cimentícios está diretamente ligado ao teor de fibras, ao módulo de elasticidade das fibras, aderência entre a fibra e à matriz, à resistência, ao fator de forma, ao tipo e ao comprimento das fibras. O comprimento crítico (l_{cr}) está associado à diminuição do desempenho provocado pela utilização de fibras descontínuas de comprimento reduzido. A transferência de tensão entre a matriz e a fibra aumenta linearmente dos extremos para o centro da fibra. A tensão se torna máxima quando a tensão que a fibra é submetida se iguala à tensão de cisalhamento entre a fibra e a matriz (BASTOS, 1999).

A Figura 2.5 mostra as possíveis situações de distribuição de tensão na fibra em relação ao comprimento crítico, em que l = comprimento da fibra.

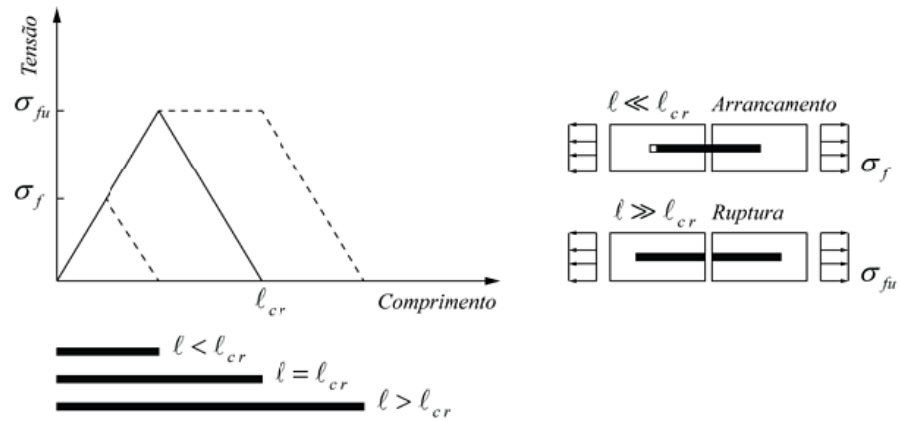


Figura 2.5 - Distribuição de tensão ao longo da fibra e modo de ruptura, em função do comprimento crítico (PEREIRA, 2017).

Para um $l < l_{cr}$ não há comprimento suficiente para geração de tensão igual ou superior à tensão de ruptura da fibra. Então a fibra não é utilizada de forma eficiente. Neste cenário, com o aumento da deformação e conseqüente abertura da fissura, a fibra que atua como ponte de transferência de tensão será arrancada do lado que possuir menor comprimento embutido. Para um $l > l_{cr}$ tem-se tensão ao decorrer da maior trinca que alcança a sua resistência à tração, utilizando todo o potencial da fibra. O aumento do comprimento da fibra tem efeito no aumento da eficiência da resistência mecânica e na alteração do modo de fratura.

O comprimento mínimo suficiente para que a tensão de cisalhamento proveniente do atrito entre fibra e matriz seja igual à resistência de ruptura da fibra é o comprimento crítico (l_{cr}) (BENTUR e MINDESS, 2007).

Figueiredo (2011) salienta que a resistência da matriz em que a fibra está inserida tem influência no modo de ruptura do compósito. A aderência é maior quanto maior for a resistência mecânica da matriz, fazendo com que a tensão de cisalhamento ao longo das fibras atinja a resistência de ruptura no processo de abertura das fissuras.

Ganesan *et al.*, 2014 observou, em seu estudo, o efeito do aumento do volume de fibras em vigas de concreto geopolimérico reforçadas. Eles constataram que a utilização de fibras melhora o enrijecimento da matriz submetida à tensões e que com o aumento da fração volumétrica de fibras diminui o espaçamento e a largura das fissuras. Ranjbar *et al.*, 2016 estudaram as propriedades mecânicas de geopolímeros à base de cinza volante com micro fibras de aço e concluíram que houve considerável melhora na resistência à flexão e na capacidade de absorção de energia.

2.5 MECÂNICA DA FRATURA

Segundo Rodrigues (1991), foi no século XX que a teoria da mecânica da fratura surgiu para estudar as falhas nos materiais frágeis; no entanto, com os avanços na mecânica computacional chegaram as teorias de falhas, que consideram materiais como os metais dúcteis, os cerâmicos, o concreto de cimento e o concreto asfáltico.

Um sólido estando submetido a um carregamento pode ir ao colapso quando há a propagação de uma fissura contida nele. A quantificação das condições e do comportamento à fratura de estruturas contendo trincas ou defeitos semelhantes aos encontrados na prática é o que estuda a Mecânica da Fratura. Mas, para melhor entendimento do processo de fraturamento, faz-se necessário conhecer conceitos ligados ao processo de deformação dos sólidos, assim como os mecanismos físicos locais. Perceptivelmente, existem diferentes modelos de fraturamento devido aos distintos mecanismos físicos de deformação de diferentes materiais.

Griffith (1920) estabeleceu um critério baseando-se no estudo de concentração de tensões para explicar a dependência de escala observada por da Vinci. Ele desenvolveu um critério e recomendou que a resistência das fibras de vidro estava ligada à presença de uma fissura pertencente ao material, mesmo que indiretamente. Foi com um critério energético estabelecido que se buscou explicar a relação entre o tamanho máximo da fissura e a resistência do material, ou seja, a propagação de uma trinca em um corpo ocorre se a energia total do sistema diminuir com a propagação da trinca. Esse conceito foi desenvolvido para materiais frágeis e foi intitulado como Teoria de Griffith.

A quantificação da propagação de trincas, assim como o estudo do campo de tensões na ponta de uma trinca além de tentar prever a resistência residual de elementos estruturais trincados a fim de antecipar a ruptura frágil do material, faz com que a mecânica da fratura seja utilizada tanto no controle de qualidade quanto no decorrer da vida útil do material.

A mecânica da fratura é dividida em Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL), ligada à resolução de limitações na aplicação de conceitos tradicionais de resistência dos materiais, quando estes apresentam descontinuidades internas e superficiais, como trincas em estruturas parcialmente frágeis, estando no estado plano de deformações e relacionado ao estado triaxial de tensões, e a Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP), que amplia as aplicações do critério de K_{IC} da MFEL em materiais dúcteis, em que a presença de uma zona plástica de tamanho considerável

em relação às dimensões da peça invalida as considerações de tensões elásticas na ponta da trinca controlando o processo de fratura.

2.5.1 Tipos de ruptura

De acordo com Broek (1996), são três os modos básicos de sollicitação na ponta da trinca, conforme ilustrado na Figura 2.6. O modo I é a forma de abertura da trinca com deslocamentos perpendiculares ao plano da trinca. O modo II, ou modo de cisalhamento, produz deslocamentos relativos entre as superfícies da trinca no plano da trinca, perpendicularmente à frente da trinca (espessura da chapa). O modo III, ou rasgamento, é devido ao cisalhamento fora do plano, podendo causar deslocamentos relativos na direção perpendicular ao plano da chapa.

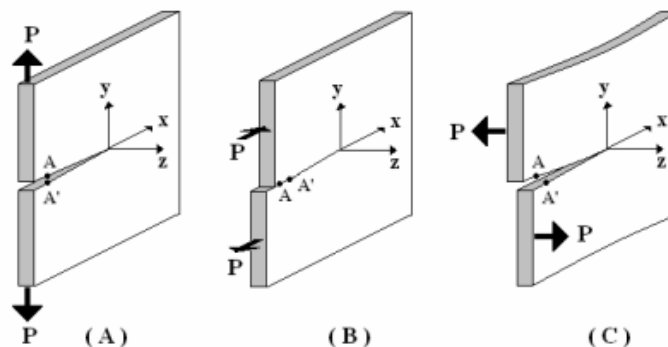


Figura 2.6 - Modos de sollicitação na ponta da trinca: Modo I (A), Modo II (B); e Modo III (C) (FERREIRA e HANAI, 2017).

Consoante com a MFEL, esses modos estão ligados a um fator de intensidade de tensão específico que comanda a distribuição de tensões nos pontos ao redor da ponta da trinca. Se um elemento estrutural apresentar trincas, basta combinar os modos de sollicitação para obter uma solução; no entanto, o modo de fratura mais recorrente em peças com trincas é o modo I, que acontece quando se tem tensão aplicada por tração direta na região da trinca. Os modos II e III correspondem à forma de corte da trinca.

2.5.2 Mecânica da fratura elástica linear (MFEL)

A MFEL só pode ser aplicada em casos em que exista uma relação linear entre o carregamento e a deformação, tendo uma discreta zona plástica na frente da trinca. Conseqüentemente, a MFEL é utilizada apenas para representar a propagação da trinca. Pode-se obter a tenacidade à fratura (K_{Ic}) e o comportamento de propagação

por fadiga com base na variação do fator de intensidade de tensão K , a partir da análise de tensões na ponta da trinca pela MFEL. As trincas longas que acometem estruturas de engenharia podem ser estudadas em laboratório com a utilização de pequenos corpos de prova, devido à similaridade de termos das expressões em ambos os casos, pois, de acordo com a MFEL, ambas as trincas terão quase que idênticos campos de tensão-deformação (HIRSCH, 2009)

2.5.2.1 Fator de intensidade de tensão K_I

Para a determinação da fadiga e da carga estática máxima dos componentes, faz-se necessário o estudo das tensões quando se refere às trincas. O fator de intensidade de tensão K_I (para modo de fratura I) descreve, na ponta da trinca, as tensões que tendem ao infinito. Quando a falha ocorre em um material frágil, o fator de K_I chega a um valor crítico (K_{Ic}), que é o valor de “tenacidade à fratura” do material, sendo esta uma propriedade do material, independente das cargas aplicadas e da geometria (EFFTING, 2004). A MFLE é aplicada às trincas ideais de raio nulo na ponta, isto é, todos os defeitos no componente são tratados como trincas agudas. É importante ressaltar que o corpo de prova só é adequado para a determinação de K_{Ic} se possuir trinca aguda.

Os parâmetros de falha de diversos materiais podem ser descritos pelo fator de intensidade de tensão K , dentre eles tem-se o concreto de cimento Portland (RILEM, 1991; LEE *et al.*, 2018), o concreto asfáltico (MARASTEANU *et al.*, 2006), o concreto geopolimérico (NAZARI *et al.*, 2015), a argamassa polimérica (REIS, 2006) e os metais (ASTM E399, 2002). O fator de intensidade de tensão (K) é um dos mais importantes conceitos da mecânica da fratura, pois é o que indica a amplitude da singularidade na ponta da trinca.

Para a análise da resistência à fissura dos concretos geopoliméricos, calculou-se o fator de intensidade de tensão ($MN.mm^{1/2}$) de acordo com a Equação 2.1 utilizada para vigas ensaiadas à flexão de três pontos com um único entalhe conforme Guinea (1998):

$$K_I = \psi \sigma \sqrt{h} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \quad (2.2)$$

$$\psi = \frac{\sqrt{\alpha}}{(1-\alpha)^{3/2}(1+3\alpha)} \left[p + \frac{4}{\beta}(q-p) \right] \quad (2.2)$$

$$p = 1.99 + 0,83\alpha - 0,31\alpha^2 + 0,14\alpha^3 \quad q = 1,9 + 0,41\alpha + 0,51\alpha^2 - 0,17\alpha^3 \quad (2.3)$$

Onde:

M é o momento fletor (N.mm);

b é a largura do corpo-de-prova;

h é a altura do corpo-de-prova;

ψ é uma função de forma para qualquer valor de α (a_0/h) β (L_0/h) $\geq 2,5$;

a_0 é a extensão inicial da trinca (25mm);

L_0 é o comprimento do corpo-de-prova.

2.5.2.2 Energia G

A taxa de liberação de energia elástica armazenada (G_I) é a energia total que um corpo de prova absorve no decorrer do ensaio. Esta energia é a necessária para a propagação de uma trinca de área unitária. Conforme Shah (1995):

$$G_I = \frac{(K_I)^2}{E} \quad (2.4)$$

2.5.3 Mecânica da fratura elastoplástica (MFEP)

De acordo com Effting (2004), a comparação entre os modelos elástico-lineares e os não lineares evidencia que os modelos não lineares revelam dados mais próximos aos reais quando se trata do comportamento da mecânica da fratura de estruturas trincadas de materiais de alta dureza e baixa resistência mecânica. Quando

se tem materiais com deformação linear confinada em apenas uma pequena região plástica ao redor da ponta da trinca, a aplicação da MFLE tem resultados satisfatórios (Figura 2.7). Contudo, a MFLE não deve ser aplicada quando se tem uma região representativa em relação à espessura do corpo. Para esses casos utiliza-se a MFEP que, como dito anteriormente, traduz de maneira mais eficaz o comportamento não linear dos materiais. Materiais quase frágeis como o concreto possuem grande zona de fratura e uma pequena zona de endurecimento plástico e, por isso, necessitam de modelos não lineares para análise de suas fraturas (SILVA, 2017). Neste estudo é utilizado o modelo quase-frágil não linear para análise do concreto geopolimérico.

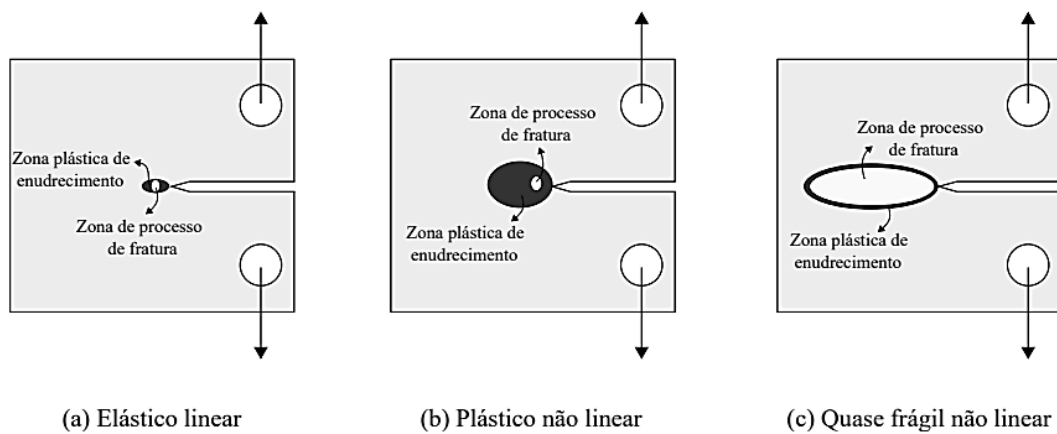


Figura 2.7 - Tipos de zona não lineares em diferentes tipos de materiais (SILVA, 2017).

Na Figura 2.8 c observa-se que um material quase frágil (concreto) possui uma não linearidade antes da tensão máxima. Silva (2017) explica que antes da tensão máxima (tensão de pico) as microfissuras situam-se nas macrofissuras e estas se multiplicam criticamente na tensão de pico, e que perante testes de deslocamento controlado, constata-se que o deslocamento durante a fase pós pico equivale à abertura da fissura principal.

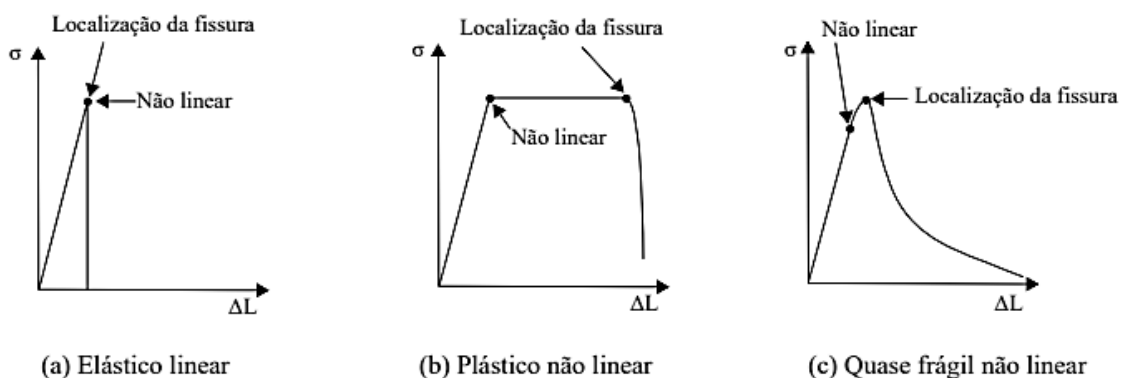


Figura 2.8 - Tipos de zonas não lineares em diferentes tipos de materiais (SILVA, 2017).

2.5.3.1 CMOD (CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT)

A Figura 2.9 mostra a análise de um sólido com uma pré-fissura, solicitado ao carregamento em regime fechado em que os deslocamentos registram a aplicação de carga. Dessa forma, seja carregando ou descarregando, o sistema de ensaio monitora sistematicamente a carga aplicada com o intuito de evitar o colapso brusco. Esse ensaio é chamado de ensaio sob controle de deslocamentos e pode ser levado a efeito igualmente sob condições do CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) ou deslocamento de abertura da entrada do entalhe.

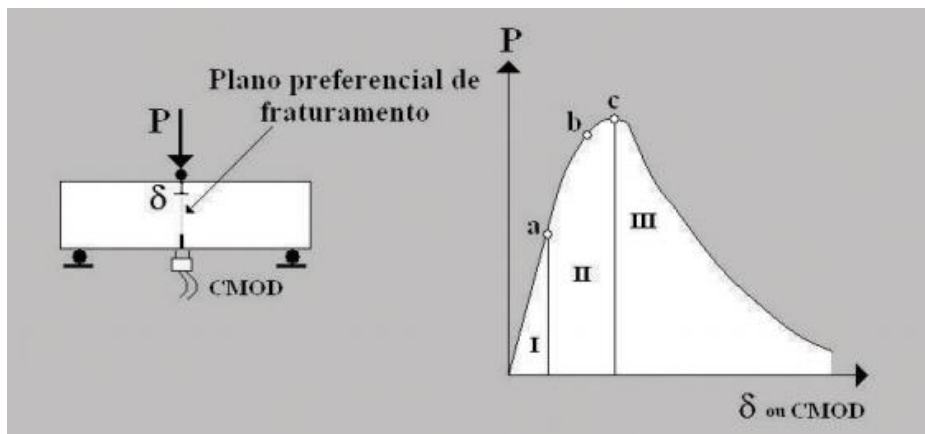


Figura 2.9 - Sólido pré-fissurado solicitado à fratura e diagrama P versus CMOD até a ruptura (FERREIRA e HANAI, 2017).

Subdivide-se o diagrama de ruptura em três fases distintas. Na primeira fase a microfissuração fica dispersa no volume dos sólidos. Considera-se então elástico-linear; na segunda fase, a começar pelo ponto **a**, a microfissuração se torna mais expressiva, principalmente no plano preferencial de fraturamento, com o crescimento da carga.

À medida que a carga vai crescendo, vai se formando uma zona de acumulação de danos (microfissurações) e, então, a resposta de deslocamento do sólido se desvia gradualmente da linearidade até encontrar o ponto **b**. Começa, então, a união das microfissuras formando uma fissura maior, caracterizando a localização da deformação.

O crescimento da fissura é estável até alcançar o ponto **c**, ou seja, para que haja o crescimento da fissura, há a necessidade de aumento do carregamento externo. A partir do ponto **c** há uma propagação instável da fissura e com isso a fase III do diagrama só poderá ser obtida experimentalmente se forem diminuídos o

carregamento, para não haver ruptura abrupta. Isto é possível pelo controle de parâmetro de deslocamento (ou de deformação).

No diagrama P- δ o ramo descendente é chamado de amolecimento e define a ruptura dos materiais quase-frágeis.

O CMOD para um corpo de prova entalhado submetido a um ensaio de flexão de três pontos em que $0 \leq \alpha \leq 1$ e $\beta \geq 2,5$, pode ser calculado conforme proposto por Guinea (1998) pela Equação 2.5:

$$CMOD = \frac{4\sigma a}{E} \eta \quad (2.5)$$

Em que a é o comprimento da trinca e η é um fator dimensional obtido pela equação:

$$\eta = 0,8 - 1,7\alpha + 2,4\alpha^2 + \frac{0,66}{(1-\alpha)^2} + \frac{4}{\beta}(-0,04 - 0,58\alpha + 1,47\alpha^2 - 2,04\alpha^3) \quad (2.6)$$

O módulo de elasticidade E , para o estado plano de deformações, foi calculado de acordo com Rilem TC 89 FMT (1990):

$$E = \frac{6L_0 a_0 \chi}{C_i h^2 b} \quad (2.7)$$

Onde

C_i é a flexibilidade inicial para a curva Carga-CMOD;

L_0 é a distância entre os apoios;

A_0 é o comprimento inicial da trinca (igual ao comprimento do entalhe);

χ é uma função geométrica dada por:

$$\chi = 0,76 - 2,28\alpha + 3,87\alpha^2 - 2,4\alpha^3 + \frac{0,66}{(1-\alpha)^2} \quad (2.8)$$

E o comprimento da trinca (a) é obtido pela equação:

$$a = h \left\{ \frac{(C_s Eb)^{1/2}}{[C_s Eb + (C_s Eb)^{1/2} + \lambda(C_s Eb)^{1/3} + \vartheta]^{1/2}} \right\} \quad (2.9)$$

$$\delta = 0,98 + 3,77\beta \quad \lambda = -\frac{9,1 + 2,9\beta^2}{1 + 0,168\beta} \quad \vartheta = -3,2\beta + 8,9\beta^2 \quad (2.10)$$

2.5.3.2 CTOD (CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT)

Weels, em 1961, sugeriu que o comportamento à fratura nos arredores de uma trinca aguda pode-se caracterizar pelo deslocamento de abertura entre as faces da trinca, medida na ponta da trinca (CTOD, *Crack Tip Opening Displacement*), como mostra a Figura 2.10.

Por existir uma zona plástica de tamanho representativo na ponta da trinca, permite-se que as duas superfícies se separem sem que haja o crescimento da trinca. Espera-se que, para existir o crescimento de uma trinca, é preciso que a abertura na ponta da trinca (CTOD) atinja um valor crítico (CTOD_c), que é dependente do material, da temperatura, da taxa de deformação (para materiais sensíveis a esse parâmetro) e do estado de tensões que existe na ponta da trinca (FORTES, 2003).

O valor crítico de CTOD pode ser entendido como o CTOD de iniciação ou de propagação estável da trinca, o CTOD de início instável da trinca, ou o CTOD de carga máxima, dependendo do critério de falha que se adote.

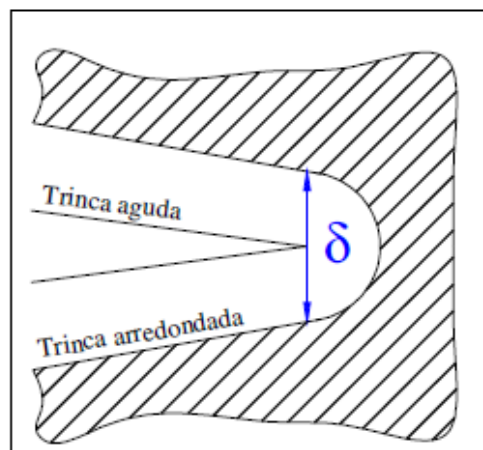


Figura 2.10 - Abertura da ponta da trinca ou CTOD (MEDINA, 2014).

Pelo fator de intensidade de tensão (K_I), no modo I de abertura da trinca, pode-se obter o CTOD. A equação 2.11 foi proposta por Shah (1995).

$$CTOD = \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{32 (\Delta a)}{\pi}} \quad (2.11)$$

Onde:

Δa é o comprimento nominal da trinca ($a - a_0$); E é o módulo de elasticidade encontrado experimentalmente.

2.5.3.3 INTEGRAL J

É a integral de linha que independe do caminho de integração em torno da trinca e que descreve o campo de tensão-deformação na raiz de uma trinca sujeita a um carregamento elastoplástico (Figura 2.11). J foi proposta por Rice (1968) e mede a variação de energia que é armazenada no material com o crescimento da trinca e pode ser tomada em qualquer ponto, seja esse distante ou não da trinca, pois as deformações sobre a raiz da trinca podem ser deduzidas considerando-se o prolongamento do mecanismo de fratura atrelado à fratura por fadiga elástica linear com conduta elastoplástica.

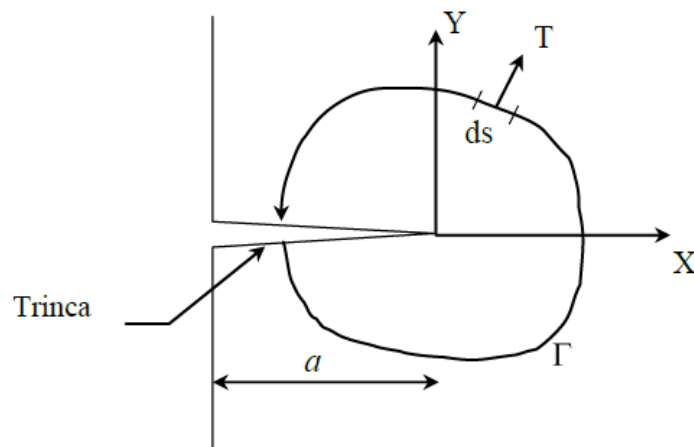


Figura 2.11 - Representação de um caminho de integração (EFFTING, 2004).

A forma usual de se avaliar a integral J é feita pelos métodos de aproximação de engenharia, baseados no método dos elementos finitos (MEF), e com ele a integral J pode ser calculada para qualquer geometria de trinca e condição de carregamento. Contudo, outros modelos simplificados representando estatisticamente as incertezas dos carregamentos, o tamanho da trinca, e as propriedades do material também são utilizados (EFFTING, 2004).

Estes modelos possuem equações fechadas da integral J em função do carregamento, do tamanho da trinca e das propriedades dos materiais de uma estrutura. Entretanto, são feitas muitas aproximações e há também as limitações dos métodos usados para estimar a integral J .

$$J = \frac{\eta_p U}{b(h - a)} \quad (2.12)$$

$$U = \int_0^\delta P \delta \quad (2.13)$$

Sendo η_p igual a 2, para corpos de prova submetidos à flexão de três pontos, b e h são a largura e a altura do corpo de prova, respectivamente. A energia U é calculada pela integral da curva carga-deflexão obtida no ensaio de flexão de três pontos em que P é a carga e δ a deflexão correspondente.

2.5.3.4 CURVA-R

A curva-R é a curva que representa a resistência à fratura R em função do crescimento da fissura (Figura 2.12). De acordo com Caland (2001), as curvas-R fazem parte da caracterização da resistência do material à fratura no decorrer da propagação estável de uma fissura. A análise das curvas possibilita a averiguação do aumento da rigidez à medida que a fissura aumenta de modo estável quando submetida a um carregamento constante. É válido ressaltar que as características geométricas, a temperatura e a taxa de carregamento do corpo de prova influenciam as curvas. Portanto, o feitiço da curva-R está diretamente ligado ao comportamento à fratura do material.

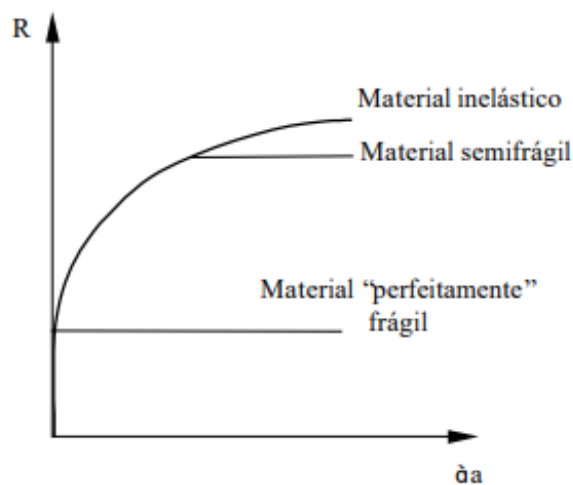


Figura 2.12 - Modelos de curva-R (CALAND, 2001).

A curva resistência à fratura (curva-R) é uma função que representa a variação da taxa de liberação de energia armazenada (G_I) com o comprimento da trinca (Δa). De acordo com OUYANG e SHAH (1990) a curva-R pode ser calculada:

$$R = \rho \omega (\Delta a)^{d_2} \quad (2.14)$$

$$\omega = 1 - \frac{d_2 \varphi - \varphi + 1}{d_1 \varphi - \varphi + 1} \left(\frac{\varphi a_o - a_o}{a - a_o} \right)^{d_1 - d_2} \quad (2.15)$$

$$d_1, d_2 = \frac{1}{2} + \frac{\varphi - 1}{\varphi} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\varphi - 1}{\varphi} - \left(\frac{\varphi - 1}{\varphi} \right)^2} \quad (2.16)$$

$$\varphi = \vartheta + \sqrt{\vartheta^2 + 1} \quad (2.17)$$

$$\rho = \frac{(K_I)^2 (d_1 \varphi - \varphi + 1)}{E \varphi (d_1 - d_2) (\varphi a_o - a_o)^{d_2}} \quad (2.18)$$

$$\vartheta = \frac{\pi E^2 f_1^2 CTOD}{32 a_o (K_I)^2 f_2^2} \quad (2.19)$$

Onde:

Os valores de d_1 e d_2 representados na Equação 2.16 são calculados considerando (+) e (-), respectivamente;

ρ e ω são determinados pelo modelo biparamétrico de fratura .

f_1 é uma função geométrica para o fator de intensidade de tensão (K_I) e f_2 é uma função geométrica para o deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD). De acordo com Pires *et al.*, (2017) os valores para as funções são 1,123 e 1,420, respectivamente, para casos de vigas entalhadas no centro do vão com a razão (L_o/h) (distância entre os apoios/altura total da viga) igual a 4.

2.6 CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS RESIDUAIS E EQUIVALENTES

Foi feita, de acordo com a EN 14651 (2005), a avaliação do aumento de resistência residual devido à adição de fibra pelo cálculo das tensões (f_j), em função

de CMOD igual a 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm para j igual a 1, 2, 3 e 4, respectivamente, assim como a resistência à tração na flexão residual ($f_{r,j}$), utilizada para medir a capacidade de carga que resta em deflexões especificadas pós-fissuração.

Os valores são calculados a partir da Equação 2.20.

$$f_{r,j} = \frac{3 F_{r,j} l}{2 b h_{sp}^2} \quad (2.20)$$

sendo,

$f_{r,j}$ = resistência à tração na flexão residual correspondente ao CMOD_j;

$F_{r,j}$ = força correspondente à CMOD_j;

l = distância entre os apoios;

b = largura do corpo de prova;

h_{sp} = distância entre a ponta do entalhe e o topo do corpo de prova.

Conforme proposto pela RILEM TC 162-TDF: recomendação final (2003), são calculadas tensões que equivalem aos fatores de tenacidade e que medem o desempenho do material em relação à absorção de energia de fratura. O cálculo é feito a partir da área sob a curva tensão-deflexão. A $f_{eq,2}$ e o $f_{r,1}$ são a resistência à flexão equivalente e a resistência à tração na flexão residual até um deslocamento δ_2 e CMOD₁ = 0,5 mm, respectivamente, ambos no estado de limite de serviço. Já a $f_{eq,3}$ e o $f_{r,4}$ são a resistência à flexão equivalente e a resistência à tração na flexão residual até um deslocamento δ_3 e CMOD₄ = 3,5 mm, respectivamente, para análises no estado limite último. Os parâmetros foram obtidos conforme as Equações 2.21 e 2.22.

$$f_{eq,2} = \frac{3l}{2b(h_{sp})^2} \frac{D_{BZ,2}^f}{0,5} \quad (2.21)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3l}{2b(h_{sp})^2} \frac{D_{BZ,3}^f}{2,5} \quad (2.22)$$

em que $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ são a resistência à flexão equivalente (MPa) correspondente à absorção de energia $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ (N·mm), respectivamente, calculados considerando as áreas da Figura 2.13. Não foi considerado a parcela D_{BZ}^f do concreto sem fibras. Apenas o desempenho das fibras na absorção de energia de fratura foi analisado.

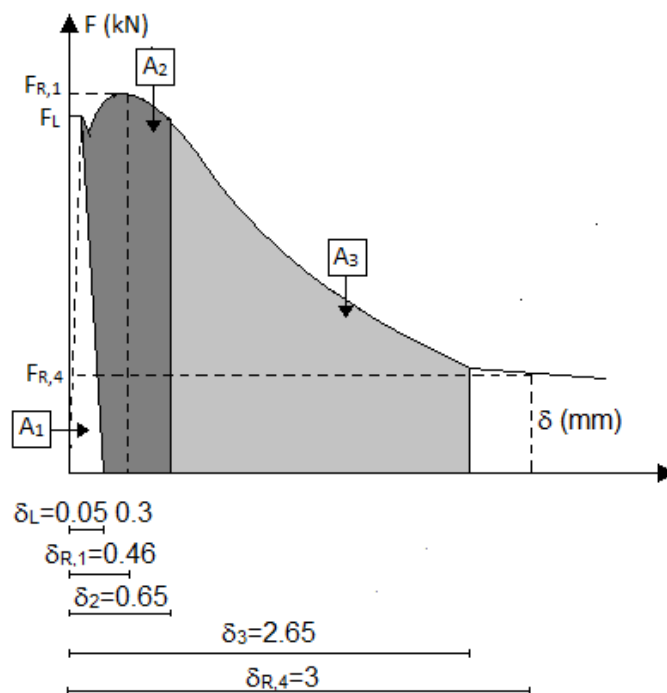


Figura 2.13- Áreas sob a curva carga-deflexão para obtenção dos parâmetros de resistência à tração na flexão (adaptado da RILEM TC162-TDF).

2.7 MECÂNICA DA FRATURA APLICADA EM GEOPOLÍMEROS

Kumar *et al.* (2017) avaliaram os parâmetros de fratura de concreto geopolimérico a base de cinzas volantes e escória de alto forno com reforço de fibras de aço com gancho na extremidade. Eles concluíram que o fator crítico de intensidade de tensão aumentou consideravelmente com a inserção de fibras, mostrando que para que a trinca se propague em um concreto reforçado com fibra há a necessidade de uma tensão maior. A resistência à flexão também aumentou com o reforço fibroso e a energia de fratura foi diretamente proporcional a resistência à compressão.

Pan *et al.* (2011) estudaram a energia de fratura de vigas entalhadas de concreto geopolimérico e compararam com os de cimento Portland e observaram que concreto geopolimérico possui uma menor energia de fratura do que o OPC e que para o nível de resistência estudada o CCG apresentou maior fragilidade devido a sua resistência à compressão.

Dias e Thaumaturgo (2005) estudaram a influência de diferentes frações volumétricas de fibras de basalto na tenacidade à fratura de concretos geopoliméricos e foram obtidos os valores de K_{Ic} e $CTOD_c$ de 18 vigas entalhadas e ensaiadas à flexão de 3 ponto. Eles concluíram que os concretos geopoliméricos são menos

vulneráveis a presença de trincas e apresentaram propriedades de fratura melhores que o cimento Portland.

Sanjayan *et al.* (2015) utilizaram a Análise por Elementos Finitos (*FEA*) para avaliar a resistência à fratura de pastas geopoliméricas reforçadas com fibras de aço de diâmetro de 0,5 mm e comprimento de 30 mm. Os reforços foram feitos com a substituição de 2, 3 e 5% em volume de pasta geopolimérica por fibras de aço. O estudo evidenciou que aumentar o volume de fibras de aço traz efeitos positivos à tenacidade à fratura; contudo, eles sugerem que com uma temperatura maior de cura há o enfraquecimento da ligação fibra-matriz, reduzindo a tenacidade.

Silva (2000) estudou as microestruturas e propriedades desenvolvidas a partir da ativação alcalina de misturas de cimento Portland de alto-forno, metacaulim e um polisilicato aquoso. Ele objetivou a análise do desenvolvimento da resistência mecânica, da microestrutura e do arranjo iônico-molecular e obteve um cimento polimérico inorgânico de altíssima resistência inicial curável a temperatura ambiente, polisiloxossilato (PPS), que foi reforçado por microfibras de wollastonita natural em volumes de 0 a 5%, visando melhorar a tenacidade à fratura do produto final. Ele concluiu que os cimentos álcali-ativados desenvolveram altas resistências iniciais, mas que a resistência diminuiu com o tempo devido à formação de fases hidratadas metaestáveis. As fibras promoveram resultados eficientes na melhoria das propriedades mecânicas do PPS, com ganho de tenacidade (K_{Ic} e $CTOD_c$) da ordem de 26% para volume de fibras igual a 2%, quando comparado ao ganho de 8% do cimento Portland de referência. Todas as propriedades mecânicas foram melhoradas, exceto a resistência ao desgaste por abrasão superficial, que diminuiu com a adição da wollastonita.

Sarker *et al.* (2013) avaliaram o comportamento de concreto geopolimérico a base de cinza volante a partir dos parâmetros de fratura. Os autores concluíram que a energia de fratura do CCG foi semelhante a do concreto OPC e ambas cresceram ao passo que a resistência à compressão aumentava. Já o fator de intensidade de tensão do CCG foi maior do que o do OPC para mesma resistência à compressão, mostrando que o concreto geopolimérico necessita de uma maior tensão para a formação de trincas. O CCG possui maior força de adesão e tração, pois possui zona de transição mais densa.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o programa experimental para analisar as propriedades mecânicas do concreto geopolimérico reforçado por diferentes frações volumétricas de fibras de aço. Para o estudo do concreto foi adotado um único tamanho de fibra com gancho nas extremidades, nas frações de 0 (referência), 0,25 e 0,50% em volume de concreto.

A caracterização do concreto geopolimérico, no estado endurecido, foi feita por meio dos ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos e, também, ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos. Foram ensaiados três corpos de prova para cada tipo de matriz de referência. Os valores apresentados são o resultado da média aritmética de cada dosagem.

A identificação dos corpos de prova se deu a partir da presença do seu percentual volumétrico. Foram nomeados da seguinte maneira:

CPX_0 para aqueles cuja matriz era de referência;

CPX_25 para aqueles cuja fração volumétrica era de 0,25%;

CPX_50 para aqueles cuja fração volumétrica era de 0,50%, com X variando de 1 a 9.

Todo o processo de moldagem e ensaio foi feito no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da PUC-Rio.

3.1 MATERIAIS

São apresentadas neste item as matérias-primas utilizadas na fabricação do concreto geopolimérico.

3.1.1 Metacaulim

O metacaulim, adição mineral de alta reatividade composta por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) com estrutura amorfa à semicristalina.

Na Figura 3.1 e na Tabela 3.1 são mostradas o DRX e as características físicas e químicas do metacaulim, sendo estes dados fornecidos pelo fabricante, Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

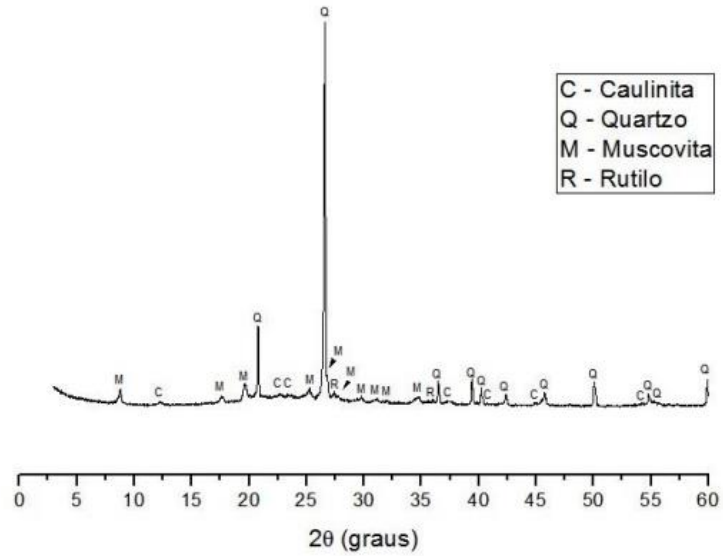


Figura 3.1 - Difratoograma de raios X do metacaulim (OLIVEIRA, 2018).

Tabela 3.1 - Características físicas e químicas do metacaulim.

Óxido	Quantidade
SiO ₂ (%)	54,14
Al ₂ O ₃ (%)	37,60
Fe ₂ O ₃ (%)	1,64
SO ₃ (%)	1,53
K ₂ O (%)	3,60
TiO ₂ (%)	1,41
Outros	0,08
Perda ao fogo (%)	2,9
Massa específica (g/cm ³)	2,55

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na fabricação do concreto geopolimérico foi areia lavada do rio Paraíba do Sul adquirida na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ. A areia apresentou módulo de finura de 1,03 e diâmetro máximo de 1,7 mm. A curva granulométrica da areia se encontra nas Figuras 3.2.

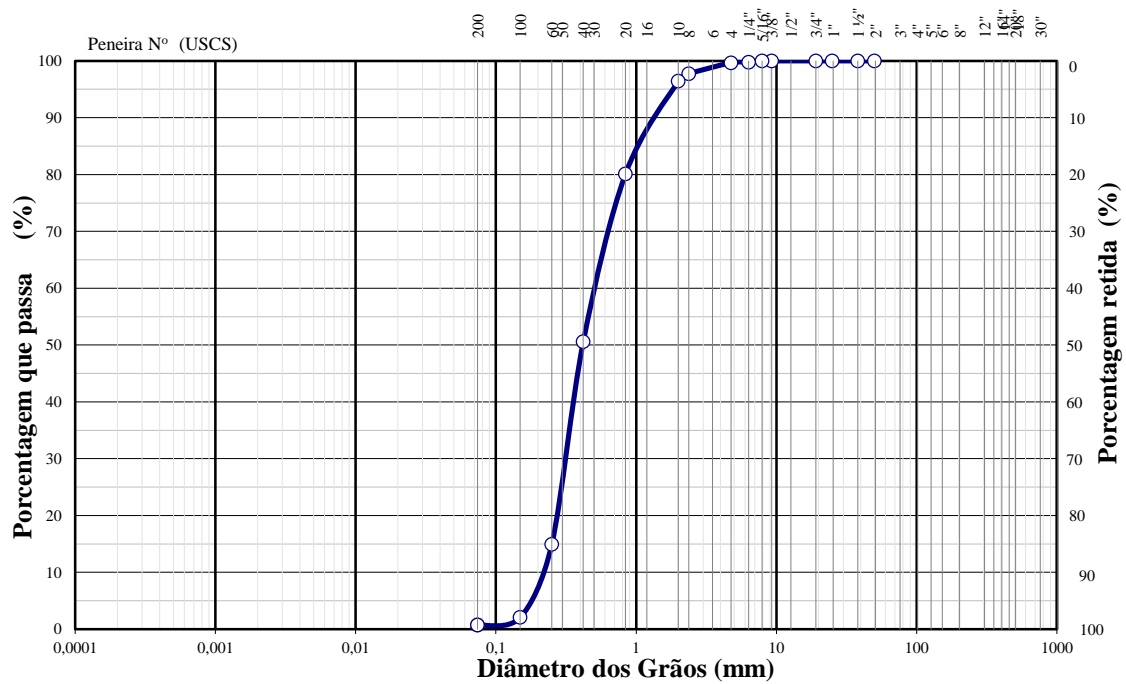


Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia.

3.1.3 Agregado graúdo

Foi utilizada brita 0 adquirida no comércio da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ. A brita 0 apresentou diâmetro máximo de 19,1 mm e módulo de finura de 5,62 mm. A curva granulométrica da brita 0 se encontra na Figura 3.3.

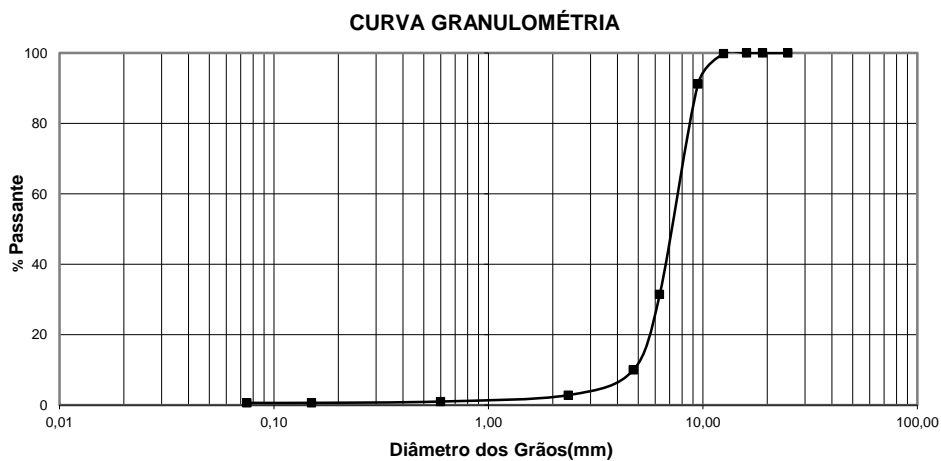


Figura 3.3 - Curva granulométrica da brita 0.

3.1.4 Silicato de sódio alcalino

O silicato de sódio alcalino foi adquirido junto à Distribuidora de Produtos Químicos São Lázaro Ltda. As especificações do silicato se encontram na Tabela 3.3 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.2 – Laudo do fabricante do silicato de sódio alcalino.

Análise	Unidade	Especificação	Resultado
Densidade (25°C)	g/cm ³	1,560 a 1,580	1,576
Baumé (25°C)	Bé	52,00 a 53,00	53,00
Viscosidade (25°C)	cP	900 a 1300,00	930
Na ₂ O	%	14,50 a 15,30	15,07
SiO ₂	%	31,50 a 33,50	32,52
Relação (SiO ₂ /Na ₂ O)	p/p	2,15 a 2,20	2,16
Total de sólidos	%	46,50 a 48,50	47,59

3.1.5 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio alcalino foi adquirido junto à Distribuidora de Produtos Químicos São Lázaro Ltda. As especificações do hidróxido de sódio estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Laudo de análise química do NaOH.

Parâmetro	Valor (%)	Especificação (%)
NaOH	99,00	98,50 mín
Na ₂ CO ₃	0,24	0,50 máx
NaCl	0,027	0,05 máx
Fe ₂ O ₃	0,0028	0,005 máx

3.1.1 Água

A água utilizada na produção do concreto geopolimérico foi proveniente da rede de água pública existente no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da PUC-Rio.

3.1.2 Fibras de aço

As fibras de aço possuem ganchos nas extremidades para garantir melhor ancoragem à matriz e foram fornecidas pela empresa Belgo Bekaert Arames e pertencem à família Dramix®3D, cujas propriedades são mostradas na Tabela 3.4 e na Figura 3.4.

Tabela 3.4 - Propriedades físicas e mecânicas da fibra de aço.

Fibra de aço Dramix 3D 45/30 BL	
Comprimento (l)	30 mm
Diâmetro (d)	0,62 mm
Fator de forma (l/d)	45
Massa específica	7,85 g/cm ³
Módulo de elasticidade	210 GPa
Resistência à tração	1270 MPa

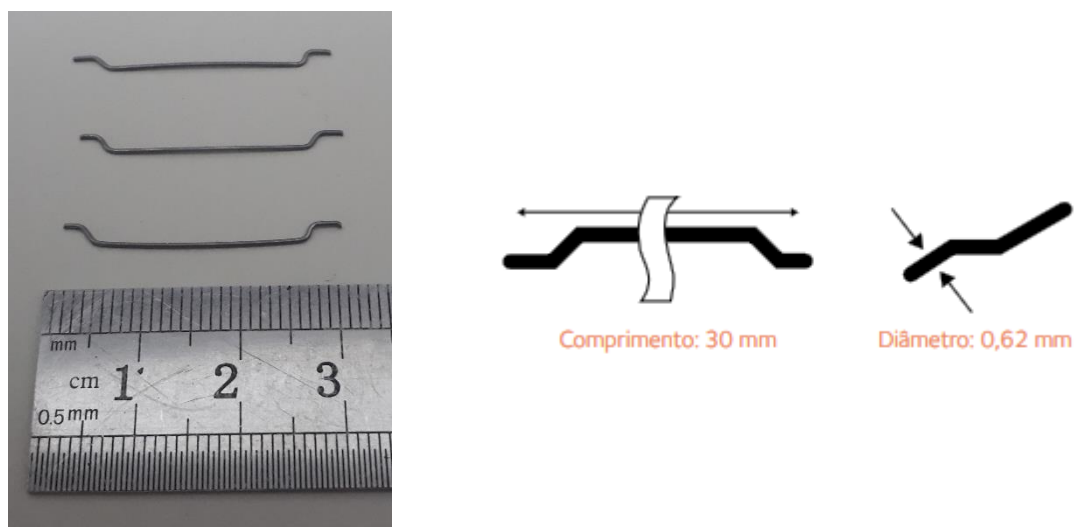


Figura 3.4 - Geometria da fibra de aço 45/30 BL. Fonte: Catálogo Dramix ArcelorMittal.

3.1.3 Solução alcalinizadora

A solução alcalinizadora era composta por 61,5% de silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3), 16,12% de hidróxido de sódio (NaOH) e 22,3% de água e tiveram ambos os produtos químicos adquiridos junto à Distribuidora de Produtos Químicos São Lázaro Ltda.

3.1.4 Concreto geopolimérico

A dosagem do concreto utilizada foi de 1:1,75:2,25:0,62:0,16:0,21 (metacaulim:areia:brita 0:silicato de sódio alcalino:hidróxido de sódio:água) para obtenção de uma resistência à compressão em torno de 30 MPa, visando à comparação com concretos de cimento Portland reforçados com fibra de aço semelhantes presentes na literatura. A solução alcalinizadora foi preparada horas antes da concretagem.

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (\varnothing 100 mm x 200 mm) para a determinação da resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, bem como corpos de prova prismáticos (150 mm x 150 mm x 550 mm) para determinação dos parâmetros de fratura, conforme especificações presentes na norma europeia EN 14651 (2005). Todos os corpos de prova foram curados em condição ambiente de laboratório (Figura 3.5). Na Tabela 3.6 são mostradas as quantidades de material para o volume de 1,0 m³.

Tabela 3.5 - Quantidade de material para confecção de 1,0 m³ de concreto geopolimérico.

Dosagem do concreto geopolimérico			
Fração volumétrica das fibras	0%	0,25%	0,50%
Metacaulim	340,2 kg	340,2 kg	340,2 kg
Areia	595,4 kg	595,4 kg	595,4 kg
Brita	765,5 kg	765,5 kg	765,5 kg
Solução alcalinizadora	357,9 kg	357,9 kg	357,9 kg
Fibras de aço	-	28,5 kg	57,0 kg
Relação água/metacaulim	1,05		
Relação água/materiais secos	21,0%		

O processo de mistura do concreto geopolimérico foi feito de acordo com a sequência abaixo:

- a) na betoneira misturou-se a areia e o metacaulim;
- b) em seguida adicionou-se a solução alcalinizadora e misturou-se por 1 min;
- c) com a betoneira em movimento adicionou-se metade da brita 0 e depois metade da fibra;
- d) na sequência adicionou-se as outras metades da brita 0 e da fibra até a obtenção de uma mistura homogênea, em torno de 5 min de mistura.

Todos os corpos de prova foram vibrados em mesa vibratória após serem totalmente preenchidos.



(a)



(b)

Figura 3.5- Corpos de prova nos moldes metálicos (a) e após o desmolde (b).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade longitudinal

Para a realização dos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade foram moldados corpos de prova cilíndricos de $\phi 100$ mm x 200 mm. Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina Controls modelo MCC8 com capacidade de

2000 kN e taxa de carregamento de 0,25 MPa/s, de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018) e a ABNT NBR 8522 (2017), respectivamente.

Para a obtenção do módulo de elasticidade foram utilizados dois transdutores de deslocamento acoplados na parte central do corpo de prova (Figura 3.6). Os parâmetros utilizados na realização do ensaio são mostrados na Tabela 3.6. Os corpos de prova foram rompidos aos 21 dias.

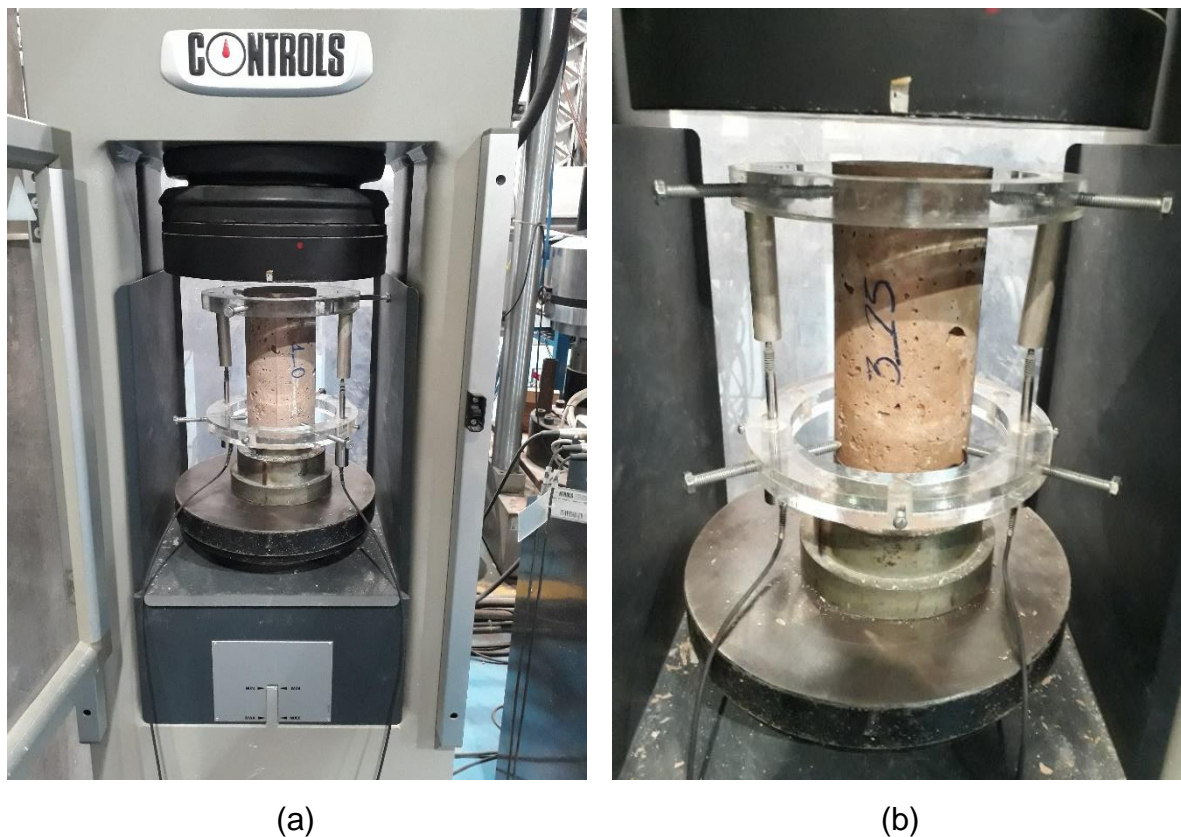


Figura 3.6 – Corpo de prova para ensaio de compressão axial e para determinação do módulo de elasticidade.

Tabela 3.6 - Parâmetros do ensaio de compressão axial e na determinação do módulo de elasticidade.

Geometria	
Diâmetro do corpo de prova	100 mm
Altura do corpo de prova	200 mm
Comprimento de leitura	170 mm
Máquina de ensaio	
Velocidade do atuador	0,25 MPa/s
Frequência de aquisição	5 Hz

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi executado em corpos de prova cilíndricos de dimensão $\phi 100$ mm x 200 mm com 2 taliscas de madeira de dimensões iguais a 5 mm x 10 mm x 210 mm coladas em sua lateral e devidamente centralizadas, de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011).

A máquina utilizada foi uma Controls modelo MCC8 com capacidade de 2000 kN e taxa de carregamento de 0,25 MPa/s. Os parâmetros e o detalhamento do ensaio são mostrados na Tabela 3.7 e na Figura 3.7, respectivamente.

Tabela 3.7- Parâmetros utilizados no ensaio de tração por compressão diametral.

Geometria	
Diâmetro do corpo de prova	100 mm
Altura do corpo de prova	200 mm
Máquina de ensaio	
Velocidade do atuador	0,25 MPa/s
Frequência de aquisição	5 Hz



(a)

(b)

Figura 3.7 Corpo de prova para ensaio de tração por compressão diametral.

3.2.3 Ensaio de flexão em prisma

Nos ensaios de flexão em prismas os corpos de prova possuíam dimensões iguais a 150 mm x 150 mm x 550 mm, moldados em formas metálicas de base nivelada e, posteriormente, foram entalhados conforme prescrito na norma EN 14651 (2005). O entalhe feito tinha 25 mm de altura e aproximadamente 3 mm de largura, feito por meio de uma serra circular para corte de concreto. Para instrumentação do ensaio utilizou-se um *clip gauge* da MTS e modelo 632.02B-20, que foi acoplado em um suporte previamente colado ao corpo de prova com massa adesiva plástica com, no mínimo, 1 hora de antecedência à realização do ensaio. Os prismas foram posicionados na máquina em um suporte com roletes de forma que a distância entre os eixos dos roletes fosse de 500 mm e equidistantes de 250 mm do eixo central de aplicação da carga. A distância entre o eixo do rolete e a extremidade do prisma era de 25 mm. Posteriormente, conectou-se o *clip gauge* em seu suporte metálico antes do início do ensaio, conforme mostram as Figuras 3.8 a 3.10.

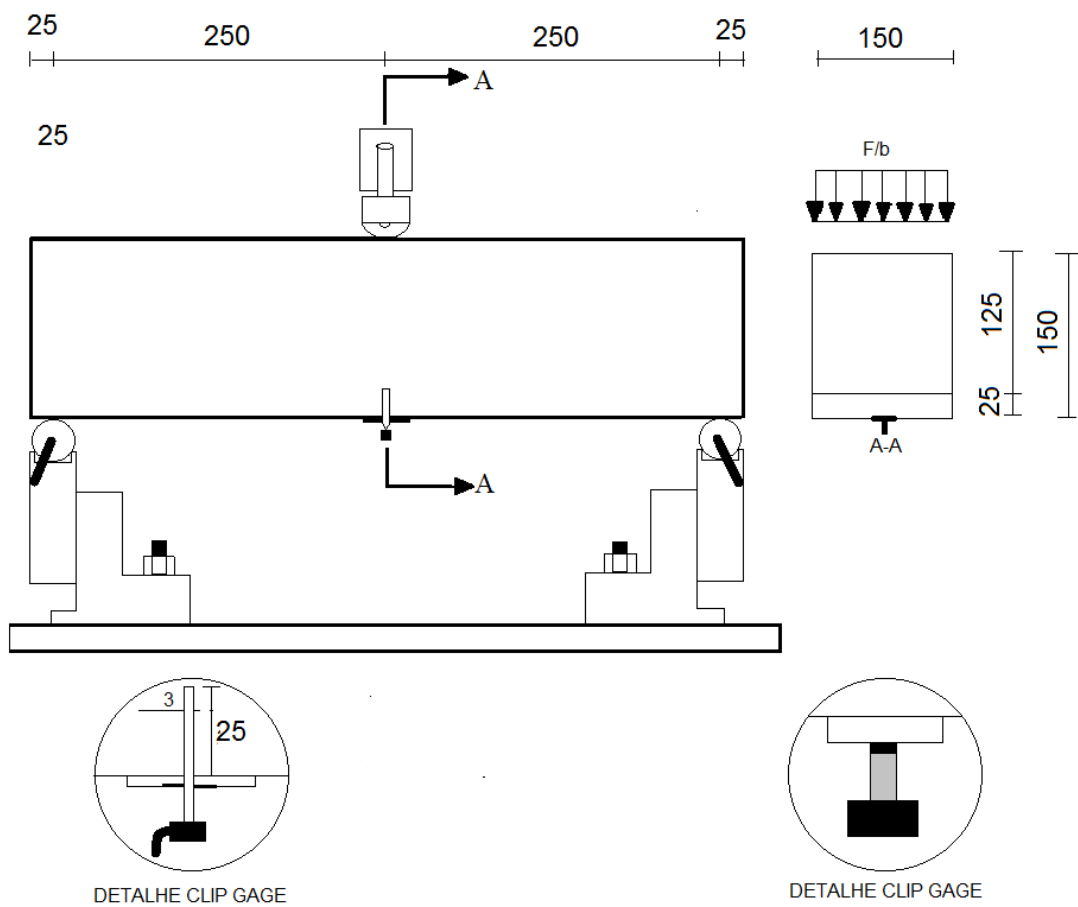


Figura 3.8 -Esquema de ensaio dos corpos de prova prismáticos para determinação dos parâmetros de fratura - dimensões em mm (adaptado EN 14651, 2005).



Figura 3.9 - Clip gauge acoplado ao corpo de prova.

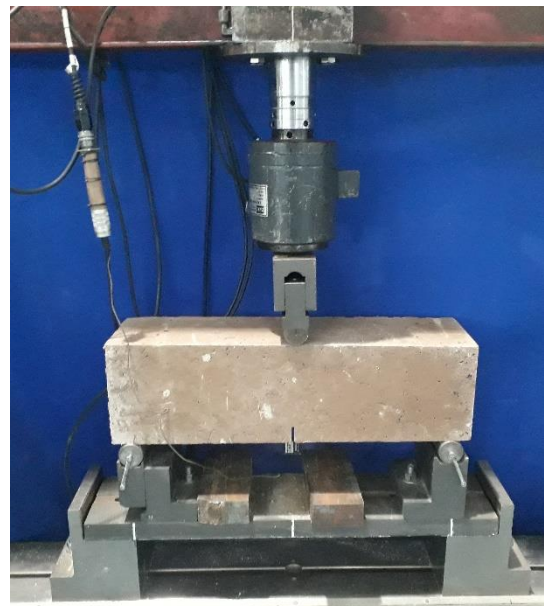


Figura 3.10 – Corpo de prova no atuador hidráulico.

Para execução do ensaio de flexão a três pontos utilizou-se um atuador hidráulico com capacidade de 100 kN modelo 204.63 montado sobre um pórtico rígido e controlado por uma estação central da MTS®. A execução do ensaio foi feita por meio do controle do *clip gauge* a uma taxa de 0,05 mm/min até CMOD de 1 mm e 0,2 mm/min para CMOD até 4 mm e frequência de 5 Hz. Os parâmetros utilizados na realização do ensaio são mostrados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Parâmetros do ensaio de flexão a três pontos em prismas.

Geometria	
Base do corpo de prova	150 mm
Altura do corpo de prova	150 mm
Comprimento do corpo de prova	550 mm
Altura do entalhe	25 mm
Espessura do entalhe	3 mm
Máquina do ensaio	
Velocidade do atuador	0,05 mm/min
Frequência de aquisição	5 Hz

A utilização do entalhe na região central da viga induz a formação da fissura nessa região e, conseqüentemente, a propagação ocorre apenas nessa seção transversal. Assim, a deformação é localizada e há menor dissipação de energia ao longo do corpo de prova. Por isso, a energia que é absorvida para a propagação de fissura pode ser relacionada à fratura ao redor do entalhe, bem como a energia dissipada estará correlacionada à resposta do compósito em questão (SHAH *et al.*, 2004, LIMA, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados: a caracterização do concreto geopolimérico (CCG), os resultados dos ensaios de compressão e tração por compressão diametral. São também apresentados os resultados dos ensaios de flexão a três pontos das vigas entalhadas e os valores obtidos dos parâmetros de fratura do CCG.

Os parâmetros obtidos nos ensaios mecânicos foram tratados estatisticamente por meio da análise de variâncias, para avaliar a influência da fração volumétrica de fibras nos CCG. Também foi realizada a comparação múltipla de médias (método de Tukey) para apontar as médias que diferem ou não entre si.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O concreto geopolimérico foi dosado para atingir resistência à compressão (f_{ck}) de 30 MPa. Foram confeccionados 3 cp's cilíndricos para cada fração volumétrica de fibras (V_f), cujo fator de forma era igual a 45 e comprimento nominal igual a 30 mm. A Tabela 1.1 mostra os valores de resistência média à compressão (f_{cm}) aos 21 dias de idade. Os CCG foram rompidos nesta idade, pois, segundo Mazza (2010) e Skaf (2008) o processo de polimerização do geopolímero faz com que 70% da resistência mecânica seja atingida nas primeiras 12 horas. Mehta e Siddique (2017) observaram ao estudar o concreto geopolimérico que 92% da resistência à compressão é atingida aos 3 dias de idade e que 97% é atingida aos 7 dias, portanto não há variação significativa de resistência a partir dos 21 dias para os CCG.

Tabela 4.1 - Valores médios de resistência à compressão dos CCG.

V_f (%)	f_{cm} (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
0	32,5	3,21	9,88
0,25	32,9	0,85	2,59
0,50	38,9	1,44	3,72

sendo,

D.P. – desvio-padrão populacional;

C.V. – coeficiente de variação.

Observa-se que o concreto com $V_f = 0,25\%$ obteve aumento de 1,3% em relação ao CCG sem fibras. Já o concreto com $V_f = 0,50\%$ apresentou ganho de

resistência mecânica de 19,5% em relação ao concreto sem reforço fibroso. O baixo incremento de resistência observado no CCG com 0,25% de fibra evidencia que o baixo volume de fibras empregado não é significativo para o ganho de resistência.

Bernal *et al.* (2010) constataram que a resistência à compressão do CCG reforçado com fibras de aço diminuiu com a inserção das fibras. Já Islam *et al.* (2017) observaram que não houve aumento significativo de resistência à compressão com a inserção de fibras de aço. E Noushini *et al.* (2018) observaram que não houve diminuição significativa de resistência usando fibras de polipropileno nos CCG.

4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON

O módulo de elasticidade (E_{CI}) foi obtido conforme descrito no item 3.2.1 e a partir dele foi calculado o coeficiente de Poisson (ν). O concreto geopolimérico sem adição de fibras apresentou módulo de elasticidade médio de 22,3 GPa. Já os concretos com 0,25 e 0,50% de fibras exibiram módulos médios iguais a 20,0 GPa e 19,9 GPa, respectivamente. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos CCG.

V_f (%)	E_{CI} (GPa)	ν
0	22,3	0,25
0,25	20,2	0,25
0,50	20,0	0,25

Mesmo que os valores encontrados para os módulos mostrem, aparentemente, que há diminuição, as análises estatísticas feitas pelos métodos análise de variância complementado pelo teste de comparação de médias de Tukey indicam que os módulos são iguais. As fibras atuam no trecho pós pico do material, elas tornam o material mais tenaz e não interferem consideravelmente nas propriedades mecânicas do mesmo, como poderá ser observado no item 4.5.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A média da resistência à tração por compressão diametral (f_{tm}) em função de V_f dos três corpos de prova ensaiados à tração por compressão é mostrada na Tabela 4.3. Os valores de resistência foram, em média, 10% da resistência à compressão. Quando analisados estatisticamente, há diferença entre as resistências de 0 e 0,50% e 0,25 e 0,50% de fibras. Os valores de 0 e 0,25% se mostraram iguais.

Tabela 4.3 - Resistência à tração por compressão diametral dos CCG.

V_f (%)	f_{tm} (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
0	3,5	0,19	5,43
0,25	3,5	0,11	3,18
0,50	4,1	0,27	6,66

4.4 VIGAS ENTALHADAS

O ensaio de flexão a três pontos em corpos de prova prismáticos com entalhe foi feito conforme o item 3.2.3.

4.4.1 Carga versus flecha (P- δ)

Na Tabela 4.4 e na Figura 4.1 são apresentados os valores médios de carga obtidos para todas as frações volumétricas de fibras de aço no ensaio de flexão de três pontos de prismas entalhados. Após a análise das curvas carga-deflexão é possível concluir que ao se adicionar fibras à matriz houve acréscimo da carga de máxima ($P_{m\acute{a}x}$). A maior carga média atingida foi de 13,1 kN para $V_f = 0,50\%$ e o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$ foi para o CCG sem reforço fibroso, de somente 9,5 kN, evidenciando que a matriz sem fibras resistiu menos à aplicação de carga durante o ensaio. Quanto ao deslocamento pós-pico, o maior e o menor valor observados foram no do CCG com $V_f = 0,5\%$ e $V_f = 0,25\%$, respectivamente, mostrando que os CCG continuaram deformando e que a ruptura ocorreu de forma tenaz.

Tabela 4.4 - Carga média máxima atingida no ensaio no ensaio de flexão de prismas entalhados.

V_f (%)	P (kN)
0	9,5
0,25	11,1
0,50	13,1

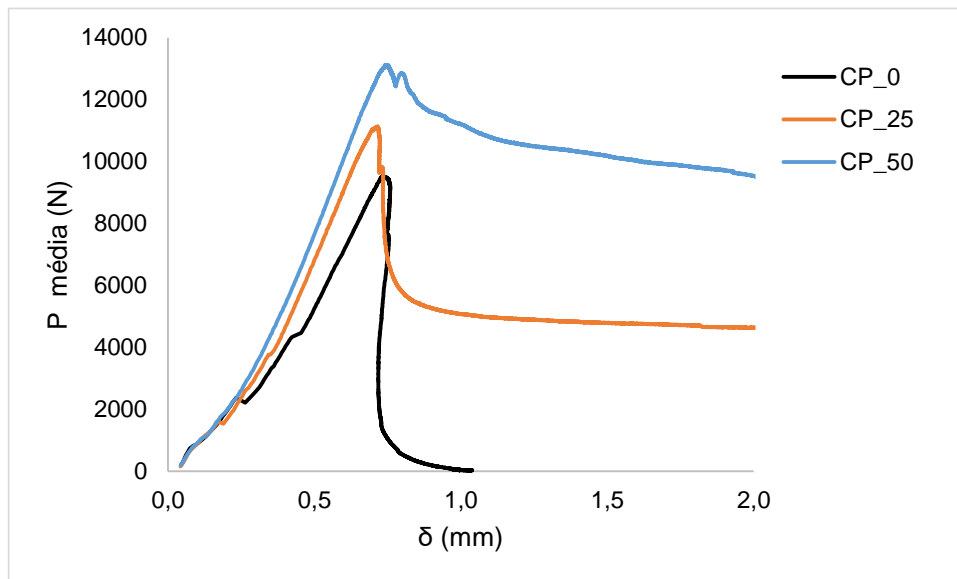


Figura 4.1- Carga-deflexão média dos CCG.

Pode-se observar pela análise das curvas que a rigidez dos cp's com reforço fibroso foi levemente superior que o sem reforço, o que significa que o incremento do volume de fibras interferiu minimamente na rigidez do material.

4.4.2 Resistência à tração na flexão

Os resultados a seguir mostram o comportamento pré-pico e pós-pico dos CCG. Foram confeccionados 3 cp's para cada fração volumétrica e ensaiados aos 21 dias de idade. Todo o ensaio foi feito de acordo com o item 3.2.3.

A análise do comportamento à flexão é de suma importância para concretos que recebem reforço por fibras, dado que, em grande parte, o mesmo está submetido a algum tipo de carga de flexão e a fibra, por sua vez, atua garantindo maior resistência à flexão e/ou tenacidade à fratura.

O limite de proporcionalidade (LP) foi calculado conforme a norma EN 14651 (2005), parâmetro que corresponde à maior tensão (f_l) no intervalo de CMOD entre 0

e 0,05 mm. A força (F_l) e o $CMOD_{FL}$ são a carga e a abertura da fissura correspondentes à tensão f_l . O LP é o ponto no qual a curva carga-deflexão deixa de estar no regime elástico e passa para o sistema elastoplástico (KOHOUT, 2001).

O cálculo das tensões foi feito a partir da Equação 4.1.

$$f_l = \frac{3 F_l l}{2 b h_{sp}^2} \quad (4.1)$$

sendo,

f_l = tensão de tração correspondente ao $CMOD_j$;

F_l = força correspondente à $CMOD_j$;

l = distância entre os apoios;

b = largura do corpo de prova;

h_{sp} = distância entre a ponta do entalhe e o topo do corpo de prova.

- Corpos de prova sem reforço fibroso

A resistência à tração na flexão média obtida no corpo de prova sem reforço fibroso (Figuras 4.2 e 4.3) foi de 3,1 MPa, 9,4% da resistência média à compressão aos 21 dias de idade.

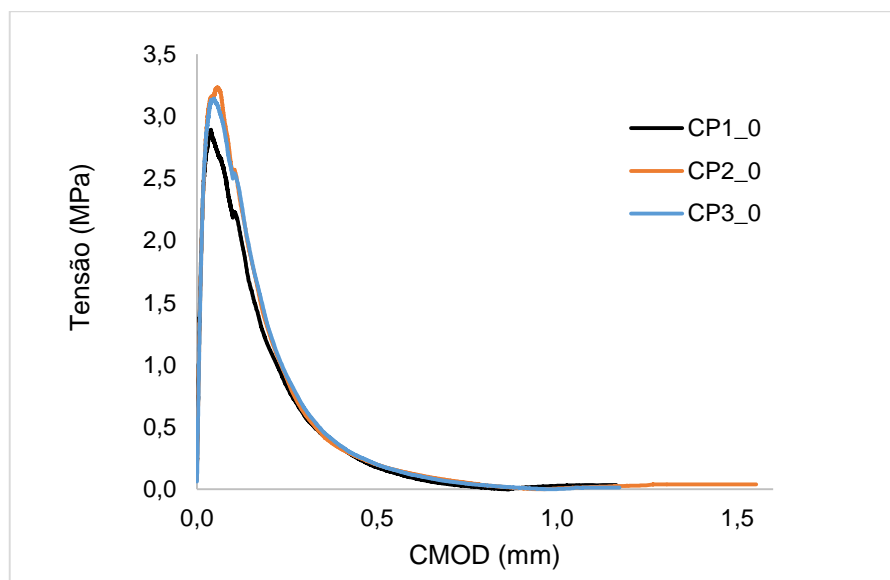


Figura 4.2- Tensão à tração na flexão *versus* CMOD dos CCG sem fibras.



Figura 4.3- Concreto geopolimérico sem reforço fibroso.

Analisando-se as Figuras 4.2 e 4.3 conclui-se que os corpos de prova que não receberam reforço por fibras de aço apresentaram comportamento linear até o pico e que a queda de carga, assim como a propagação da trinca, foi rápida, ocasionando ruptura abrupta (sem aviso prévio) do cp's, demonstrando que não resistem ao acréscimo de carga após a abertura da fissura. O mesmo fato foi observado por Kumar *et al.* (2017) quando estudou a fratura de concretos geopoliméricos à base de cinza volante e escória granulada de alto-forno reforçados por fibras de aço. É válido ressaltar que os corpos de prova com $V_f = 0\%$ apresentaram pequena abertura da boca da trinca, atingindo CMOD médio igual a 1,2.

- Corpos de prova com 0,25% de fibras de aço

Os prismas com $V_f = 0,25\%$ apresentaram resistência à tração na flexão média de 3,6 MPa, aproximadamente 11% da resistência média à compressão aos 21 dias de idade (Figura 4.4). Constata-se que há perda de resistência após a carga máxima ser atingida; no entanto, houve aumento significativo nas propriedades de flexão e o concreto continuou a deformar até $CMOD = 4$ mm.

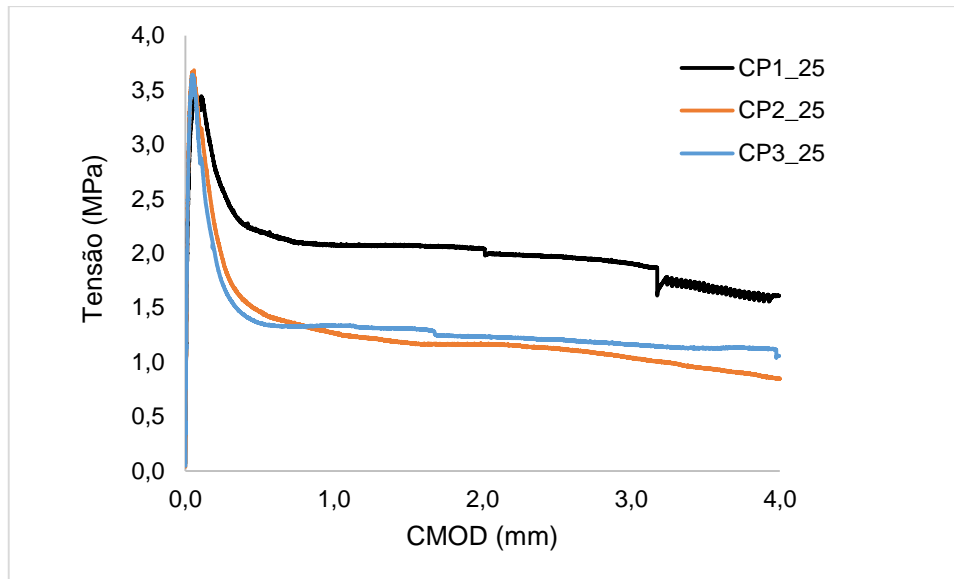


Figura 4.4- Tensão à tração na flexão *versus* CMOD dos CCG com $V_f = 0,25\%$.

- Corpos de prova com 0,50% de fibras de aço

De acordo com a Figura 4.5 constata-se que os corpos de prova com $V_f = 0,50\%$ apresentaram resistência média à tração na flexão de 4,3 MPa, sendo que essa resistência equivale a 10,3% da resistência média à compressão.

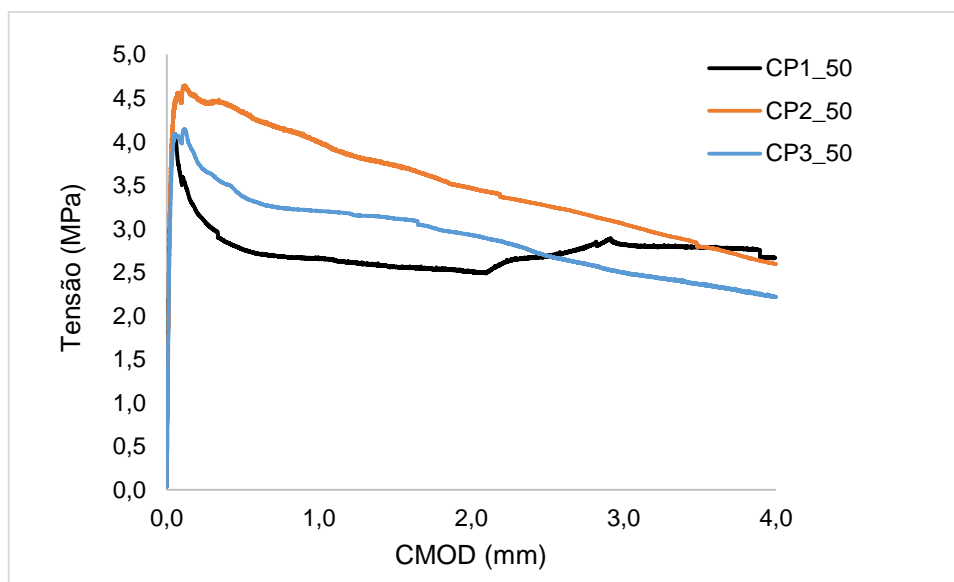


Figura 4.5- Tensão à tração na flexão *versus* CMOD dos CCG com $V_f = 0,50\%$.

Observa-se que, com o aumento da fração volumétrica de fibras, houve aumento da resistência até o pico. A Figura 4.5 mostra o comportamento do CCG com $V_f = 0,50\%$ e a Figura 4.7 mostra maior resistência residual com o aumento da V_f .



Figura 4.6 - Comportamento do CCG com $V_f = 0,50\%$ para $CMOD = 4mm$.

Constata-se também que o concreto possui maior deformação até $CMOD$ igual a 4 mm e que continua suportando carga. Isso pode ser explicado pela maior presença de fibras que ajuda na redução da perda de resistência após alcançar a resistência de pico, pois atuam como pontes sobre as fissuras. Este fenômeno diminui a velocidade de propagação e a concentração de tensões na extremidade da fissura, uma vez que a transferência de tensão proporcionada pelas fibras está relacionada ao seu arrancamento, mesmo para baixas frações volumétricas de fibras. Então, fica evidente que as fibras melhoraram a tenacidade dos CCG.

Estatisticamente não há diferença de ganho de resistência à tração na flexão entre as frações volumétricas de 0 e 0,25%. O ganho de resistência é observado quando comparadas 0 e 0,50% e 0,25 e 0,50% de volume de fibras nos CCG.

Bernal *et al.* (2010) observaram que as fibras aumentaram consideravelmente a resistência à tração na flexão. Noushini *et al.* (2018) ao estudarem concretos geopoliméricos reforçados com diferentes fibras de polipropileno e poliolefina também concluíram que as fibras sintéticas aumentaram a resistência à flexão dos CCG.

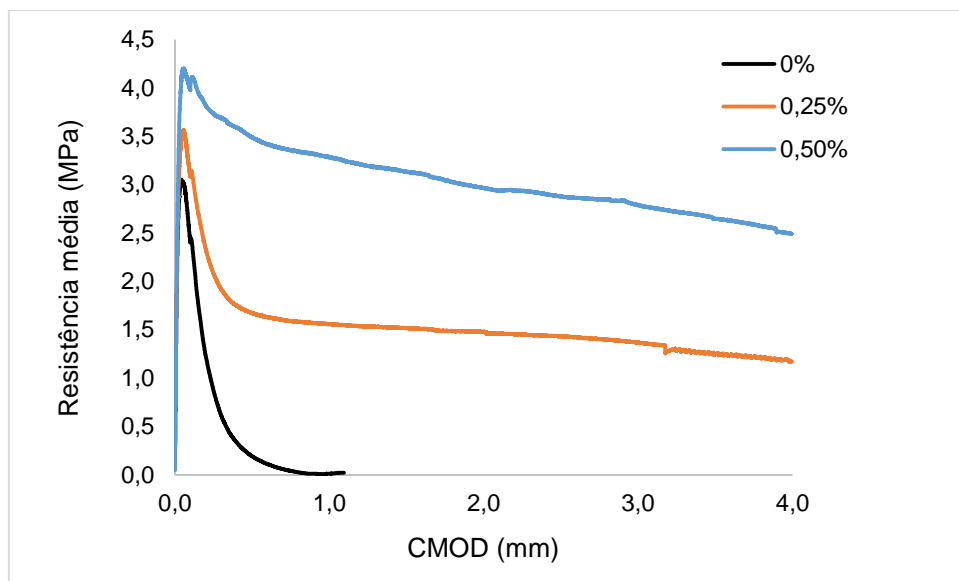


Figura 4.7- Resistência média à tração na flexão dos CCG.

A Figura 4.7 mostra também, que o comportamento dos corpos de prova com e sem reforço por fibras é caracterizado pela perda de resistência após a ruptura da matriz geopolimérica. No entanto, quando os cp's contendo fibras são comparados com a matriz sem reforço por fibras, há aumento nas resistências última (Tabela 4.5). Este fato também foi observado por Silveira *et al.* (2018) e Lee *et al.* (2018) quando estudaram concretos convencionais reforçados por fibras de aço. O fator de forma das fibras está diretamente ligado ao aumento das resistências de pico e residual.

Tabela 4.5 - Valores de CMOD, de resistência no LP e de resistência última dos cp's prismáticos com entalhe.

V_f (%)	CMOD_{FL} (mm)	f_L (MPa)	f_U (MPa)
0	0,0389	3,054	3,054
0,25	0,0493	3,541	3,567
0,50	0,0498	4,176	4,200

Foi feita, de acordo com a EN 14651 (2005), a avaliação do aumento de resistência residual devido à adição de fibra pelo cálculo das tensões (f_j) assim como a resistência à tração na flexão residual ($f_{r,j}$), utilizada para medir a capacidade de carga que resta em deflexões especificadas pós-fissuração. Já a resistência à flexão equivalente (f_{eq}) foi calculada conforme RILEM TC 162 TDF (2003) para as

deslocamentos até os pontos δ_2 e δ_3 . Essas tensões são fatores de tenacidade que medem o desempenho do material em relação à absorção de energia de fratura. Para o cálculo desses valores considera-se que há distribuição de tensão linear sobre a seção do prisma. Os valores encontrados são mostrados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Tensão residual à flexão para CMOD igual à 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm dos CCG.

V_f (%)	f₁ (MPa)	f₂ (MPa)	f₃ (MPa)	f₄ (MPa)	C.V. (%)
CPX_0	0,19	-	-	-	-
CPX_25	1,67	1,52	1,43	1,25	11,96
CPX_50	3,49	3,13	2,88	2,65	11,84

sendo,

f₁ – tensão correspondente à abertura de fissura de 0,5 mm;

f₂ – tensão correspondente à abertura de fissura de 1,5 mm;

f₃ – tensão correspondente à abertura de fissura de 2,5 mm;

f₄ – tensão correspondente à abertura de fissura de 3,5 mm.

Tabela 4.7 - Resistências à tração na flexão residual e à flexão equivalente dos CCG.

V_f (%)	F_L (kN)	f_L (MPa)	f_{R,1} (MPa)	f_{R,2} (MPa)	f_{R,3} (MPa)	f_{R,4} (MPa)	f_{eq,2} (MPa)	f_{eq,3} (MPa)
0	9542,8	3,05	-	-	-	-	-	-
0,25	11064,4	3,57	1,6748	1,5174	1,4327	1,2746	1,6982	1,3710
0,50	13048,8	4,20	3,4901	3,1325	2,8768	2,6452	3,4605	2,2806

onde,

F_L carga correspondente ao limite de proporcionalidade;

f_L é a resistência correspondente ao limite de proporcionalidade;

f_{R,1}, f_{R,2}, f_{R,3} e f_{R,4} correspondem a resistência à tração na flexão residual para CMOD = 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5mm, respectivamente;

$f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ correspondem a resistência à flexão equivalente para deflexão δ_2 e δ_3 , respectivamente.

A resistência à flexão equivalente (f_{eq}) é um fator de tenacidade que considera o efeito que a fibra tem no comportamento de absorção de energia de fratura, por isso não foi considerada a energia armazenada pela fratura do concreto simples para avaliação da resistência à flexão equivalente. A $f_{eq,2}$ é para projetar no estado de serviço a uma deformação menor e a $f_{eq,3}$ no estado limite último para uma maior deformação. A relação $f_{eq,2}/f_{eq,3}$ é igual a 1,23 e 1,24 (cada uma representando os 3 cp's ensaiados para cada V_f) para os corpos de prova com 0,25 e 0,50% de fibras, respectivamente. Mesmo que os valores das flexões equivalentes diminuam dentro da mesma fração volumétrica à medida que a deflexão aumenta, constata-se pela Tabela 4.7, que as flexões equivalentes são crescentes para o aumento de V_f , logo as fibras de aço utilizadas são eficientes no controle de fissuração do CCG.

De acordo com a Tabela 4.7 acima, verifica-se que a resistência à tração na flexão residual aumentou com o acréscimo da fração volumétrica de fibra empregada. O mesmo ocorreu para a resistência à flexão equivalente, mostrando que as fibras foram eficientes em melhorar o desempenho do concreto, ou seja, o concreto deformou até a abertura de fissura de 4 mm e continuou a suportar carregamento. É possível observar também que os concretos com 0,25 e 0,50% de fibras apresentaram diminuição da resistência residual a medida que a deslocamento aumentava, entretanto foi mantida uma força significativa até o fim do ensaio. Igualmente ao que foi encontrado neste estudo, Kumar *et al.* (2017) constataram redução na resistência à flexão residual após o pico para as misturas com fibras, em torno de 4 a 24%. Porém, em contrapartida, concluíram que houve aumento de resistência à flexão com o aumento de V_f .

A análise das tensões residuais evidencia que no estado limite último ($f_{R,3}$ e $f_{R,4}$) são menores do que as tensões no estado limite de serviço ($f_{R,1}$ e $f_{R,2}$), fato comum para fibras de aço. Koenig *et al.* (2019) observaram o inverso com o concreto geopolimérico à base de escória alcalina ativada reforçado com fibras de aço, constatando um comportamento suave de pós-endurecimento, que foi justificado pela possível retração em maior grau das escórias alcalinas ativadas e, também, pela formação de microfissuras antes mesmo do carregamento mecânico.

O *FIB Model Code* 2010/CEB-FIP classifica a tenacidade dos concretos reforçados por fibras a partir da razão entre as resistências residuais $f_{R,3}/f_{R,1}$ (tensão

residual no estado de limite último/tensão residual no estado de limite de serviço). Para determinar se o reforço por fibras pode substituir o reforço convencional no estado último de serviço a relação $f_{R,3}/f_{R,1} > 0,5$ tem que ser atendida.

Tabela 4.8 – Valores da razão $f_{R,3}/f_{R,1}$ dos CCG.

V_f (%)	f_{R,1} (MPa)	f_{R,3} (MPa)	f_{R,3/} f_{R,1}
0	-	-	-
0,25	1,6748	1,4327	0,85
0,50	3,4901	2,8768	1,21

Como pode ser observado os valores da razão $f_{R,3}/f_{R,1}$ são maiores que o mínimo estabelecido pelo *FIB Model Code/CEB-FIP*, isso evidencia que a utilização de fibras de aço como reforço estrutural nos CCG é apropriada. O mesmo foi observado por Lima (2019) quando estudou fibras de polipropileno e fibras de aço em compósitos cimentícios.

4.4.3 Parâmetros de fratura dos CCG

O estudo da tenacidade dos CCG foi feito a partir do cálculo dos parâmetros de fratura obtidos após o ensaio de flexão a três pontos em prismas entalhados. Foram utilizadas as curvas carga-CMOD para calcular a flexibilidade inicial (C_i) para o cálculo do comprimento crítico da trinca. Os diagramas mostraram que houve aumento de carga com o acréscimo de CMOD para ambos os concretos com reforço fibroso (Figura 4.8).

Diferentemente do diagrama carga-deflexão, os concretos apresentaram rigidez semelhante na curva carga-CMOD. Já no trecho pós-pico os concretos reforçados com fibras apresentaram menor perda de resistência e maior abertura da boca da trinca (CMOD).

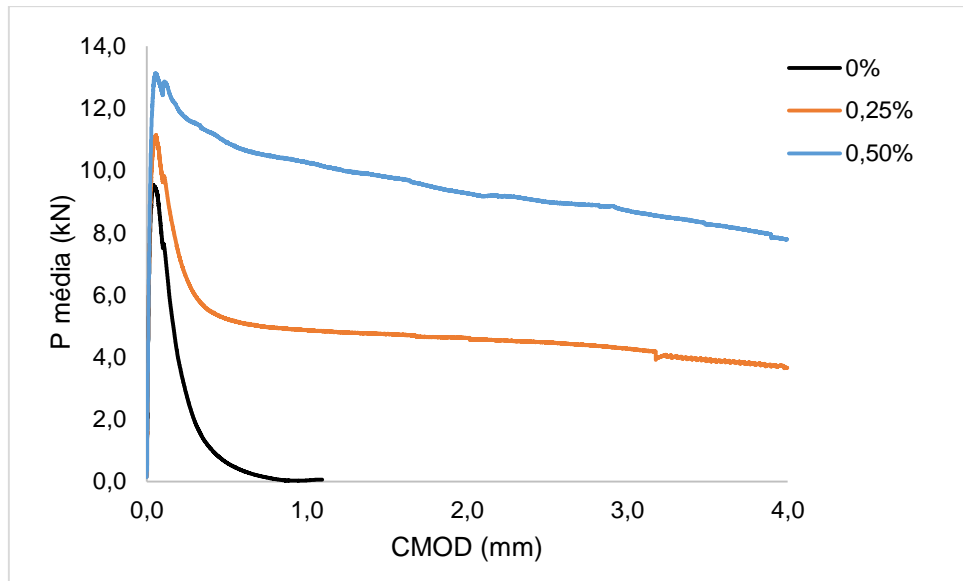


Figura 4.8 - Curvas carga versus CMOD dos CCG.

Na Tabela 4.9 são mostrados os valores obtidos para o fator de intensidade de tensão crítico (K_{IC}), deslocamento crítico de abertura da boca da trinca ($CMOD_C$) e abertura crítica da ponta da trinca ($CTOD_C$). Os resultados foram obtidos a partir das equações propostas por OUYANG e SHAH (1990) e GUINEA (1998), como mencionado nos itens 2.5.2.1, 2.5.3.1 e 2.5.3.2, e servem para verificar a influência das frações volumétricas de fibras na tenacidade dos concretos geopoliméricos.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.9 e na Figura 4.9, houve aumento no fator de intensidade de tensão crítico (K_{IC}) com o aumento de V_f , ou seja, o valor da carga crítica aplicada para atingir a fratura do material aumentou. Esse crescimento foi de 16,6% e 38,9% para V_f igual a 0,25 e 0,50%, respectivamente, em relação ao concreto sem fibras.

Tabela 4.9 -Valores de K_{Ic} , $CTOD_c$ e $CMOD_c$ dos CCG.

V_f (%)	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$C_i \times 10^{-6}$ (mm)	$C_s \times 10^{-6}$ (mm)	a_c (mm)	E (GPa)	$CMOD_c$ (mm)	$CTOD_c$ (mm)	K_{Ic} (MPa·mm ^{1/2})
0	9,54	1,84	4,29	54,36	22,3	0,04	0,017	18,36
D.P. (MPa)	0,55	0,096	0,72	2,63	2,27	0,006	0,002	1,05
C.V. (%)	5,72	5,02	10,39	4,00	10,19	15,42	14,92	5,72
0,25	11,15	1,84	5,37	59,48	20,2	0,05	0,022	21,41
D.P. (MPa)	0,34	0,033	3,57	9,93	1,48	0,004	0,014	0,64
C.V. (%)	2,99	1,74	43,12	14,45	7,32	8,22	6,54	2,99
0,50	13,13	1,85	4,64	55,91	20,0	0,06	0,029	25,50
D.P. (MPa)	0,98	0,094	$1,43 \times 10^{-5}$	23,43	2,050	0,028	0,009	1,86
C.V. (%)	7,28	4,90	102,98	31,65	10,28	40,61	32,43	7,28

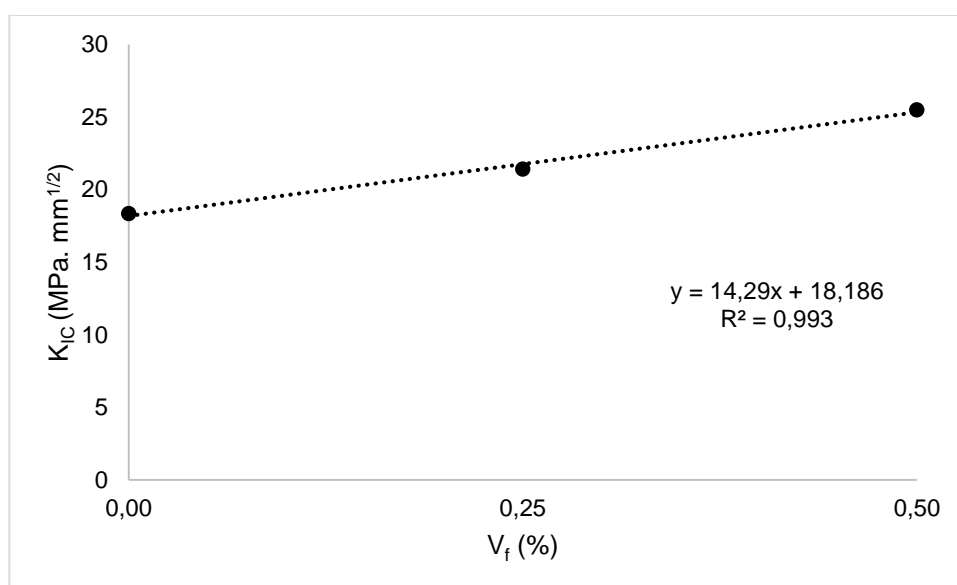


Figura 4.9- Valores médios de K_{Ic} em função de V_f dos CCG.

Kumar *et al.* (2017) também observaram que o K_{IC} aumentou consideravelmente com a adição de fibras nos concretos geopoliméricos. Quando comparado ao concreto de cimento Portland (CCP) reforçado com fibras, o CCG apresentou maiores valores de K_{IC} com o aumento de V_f , evidenciando que há maior ganho de tenacidade no concreto geopolimérico, conforme também constatou Dias (2001).

Os valores de $CTOD_C$ em função da fração volumétrica de fibras também são mostrados na Figura 4.10. Foram encontrados valores crescentes de $CTOD_C$ à medida que V_f aumentou. Houve acréscimo de 29,4% e 70,6% no valor do $CTOD_C$ para V_f igual a 0,25 e 0,50%, respectivamente, em relação ao concreto sem fibras. Esses valores elevados de $CTOD_C$ mostram que houve pouca tensão de fechamento na ponta da trinca e, conseqüentemente, maior comprimento nominal crítico da trinca (Δa_c).

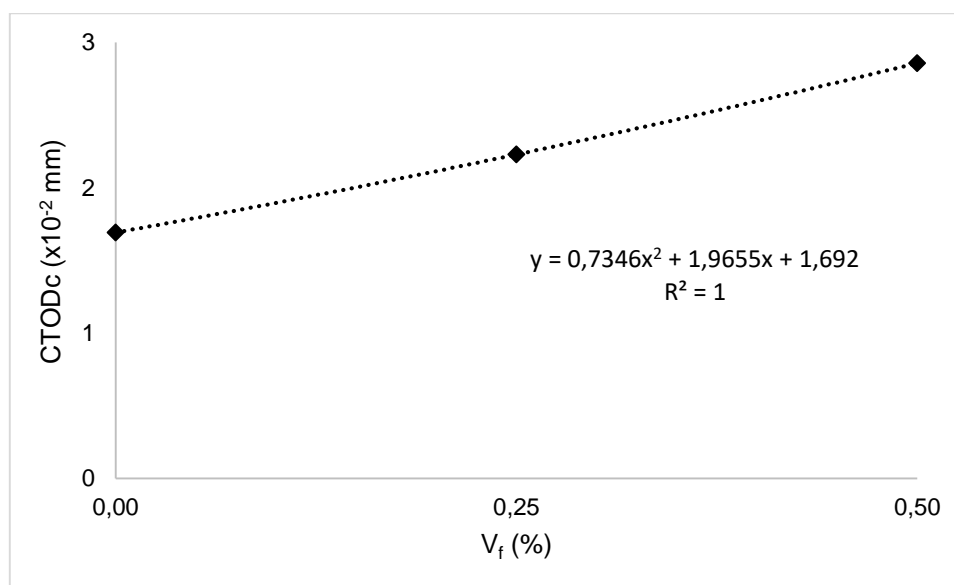


Figura 4.10- Valores médios de $CTOD_C$ em função de V_f dos CCG.

A Tabela 4.10 mostra os valores da taxa de liberação de energia armazenada (G_I), da integral J e da resistência à fratura R.

Segundo Lee *et al.* (2018), um corpo de prova submetido à flexão resulta em uma função que descreve uma força correlacionada ao K_{IC} . Essa força é a energia de fratura (G_I) que, igualmente ao K_{IC} , sofreu incremento com o aumento do volume de fibras de aço.

Tabela 4.10 - Valores de G_{Ic} , J_{Ic} e curva-R dos CCG.

V_f (%)	G_{Ic} (N/m)	$U_{máx}$ (N·mm)	J_{Ic} (N/mm)	J_{Ic} (J/m²)	R (N/m)
0	15,28	2938,17	0,46	464,99	40,33
D.P. (MPa)	2,66	717,89	0,03		8,19
C.V. (%)	17,42	0,235	0,46		0,20
0,25	22,89	3337,73	0,55	547,52	62,30
D.P. (MPa)	2,95	609,55	0,03		4,52
C.V. (%)	12,88	0,184	0,23		0,07
0,5	32,98	4063,62	0,71	712,97	72,69
D.P. (MPa)	6,06	993,26	0,37		8,24
C.V. (%)	18,38	0,209	0,95		0,11

Os valores de G_I evidenciam que, com o incremento de V_f , aumentou a energia armazenada pelos CCG. Maiores valores de energia armazenada são encontrados para os CCG reforçados com fibras de aço, ou seja, a energia absorvida pelo material para fraturá-lo aumentou. O aumento foi de 49,8% e 115,8% para os CCG com V_f igual a 0,25 e 0,50%, respectivamente. Esses valores estão relacionados com a boa qualidade da ligação fibra-matriz de concreto geopolimérico, tornando-o um material tenaz.

Sarker *et al.* (2013) também constataram que os valores de energia armazenada são maiores para os CCG do que para os CCP. Isso pode ser explicado pelo caminho que a fissura percorre em um material compósito com aglomerante diferente do convencional.

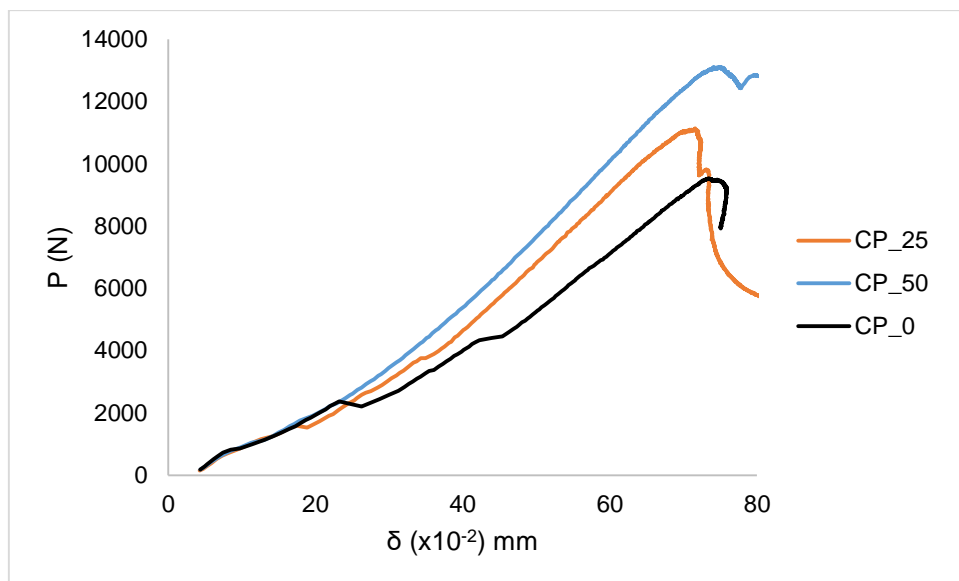


Figura 4.11 - Gráfico carga-deflexão média até a carga máxima atingida.

O valor de J foi calculado a partir da integral da área sob a curva carga-deflexão (Figura 4.11), conforme as Equações 2.12 e 2.13, e equivale à energia absorvida $U_{m\acute{a}x}$ no meio do vão até a carga máxima no ensaio de flexão de três pontos. Nota-se, da análise da Figura 4.11, que a carga $P_{m\acute{a}x}$ aumenta com o incremento de V_f e, conseqüentemente, há aumento de $U_{m\acute{a}x}$, resultando em valores maiores de J para maiores frações volumétricas de fibras de aço. Isso significa que houve maior absorção de energia pelo CCG no decorrer da propagação da fissura.

A resistência à fratura R foi calculada de acordo com o item 2.5.3.4, como proposto por OYANG (1990). Os valores máximos de R foram maiores para os CCG reforçados por fibras de aço. Em relação ao concreto sem fibras houve aumento de 54,5% e 80,2% para V_f igual 0,25 e 0,50%, respectivamente. Esses resultados corroboram a eficiência da matriz geopolimérica com fibras em resistir à propagação de fissura e, conseqüentemente, sua elevada tenacidade à fratura. Como pode ser observado na Figura 4.12.

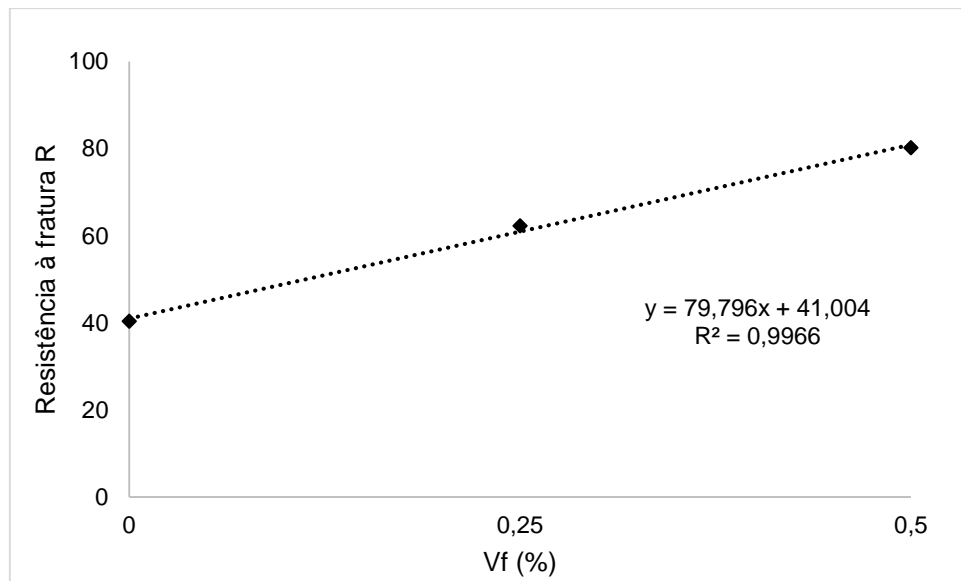


Figura 4.12 - Resistência à fratura R em função de V_f dos CCG.

Na Tabela 4.11 estão os parâmetros de fratura encontrados por diferentes autores e também os valores do presente estudo. É importante ressaltar que as matrizes geopoliméricas e as fibras utilizadas são diferentes, assim como os métodos de cálculo. Como este estudo utilizou fibras de aço em três frações volumétricas diferentes, procurou-se comparar com autores que apresentassem alguma similaridade com a porcentagem de fibras aqui estudada.

É possível verificar que em todos os casos houve aumento dos parâmetros com o aumento da fração volumétrica de fibras. O módulo de elasticidade variou entre as matrizes geopoliméricas e os valores dos parâmetros de fratura encontrados por Deepa Raj *et al.* (2013) são mais expressivos quando há aumento da fração volumétrica de fibras, demonstrando ganho de 299% no G_{IC} . O incremento de carga máxima também foi o maior dentre os autores analisados, ficando em torno de 125%. No entanto, os valores de K_{IC} foram os menores observados.

Esse maior valor de energia de fratura pode ser justificado pela cura do material, pois Deepa Raj *et al.* (2013) curaram os concretos em temperatura ambiente por um dia e, em seguida, em forno a 60°C por mais 24 horas. Conforme observado por Mustafa Al Bakri *et al.* (2011) e Hardjito *et al.* (2004), a cura de geopolímeros à base de cinza volante com solução alcalina de silicato e hidróxido de sódio curados a 60°C melhora as propriedades físicas e mecânicas, levando à uma melhor geopolimerização, melhorando a aderência entre a fibra e a matriz e, conseqüentemente, à maior energia armazenada pelo material até a fratura.

Tabela 4.11 - Comparação de parâmetros de fratura encontrados por diferentes autores.

Parâmetros	DEEPA RAJ <i>et al.</i> (2013)		DIAS (2001)		PIRES <i>et al.</i> (2017)	Presente estudo	
V_f (%)	0	0,50	0	0,50	0	0	0,50
$P_{máx}$ (kN)	2,4	5,4	16,0	17,2	2,3	9,5	13,1
E (GPa)	-	-	29,7	29,7	61,4	22,3	20,0
K_{Ic} (MPa·mm ^{1/2})	6,0	13,5	45,7	58,9	38,6	18,4	25,0
CMOD _c (mm)	-	-	0,05	0,07	-	0,04	0,06
CTOD _c (mm)	-	-	0,024	0,037	0,012	0,017	0,029
G_{Ic} (N/m)	58,9	235,6	70,1	116,9	29,5	15,3	33,0
R_{Ic} (N/m)	-	-	1,7	4,3	29,5	40,3	80,2
J_{Ic} (N/mm)	-	-	-	-	0,36	0,46	0,71

A Tabela 4.12 compara os valores dos parâmetros de fratura do presente estudo com estudos utilizando fibras de aço com gancho nas extremidades em compósitos cimentícios. É importante ressaltar que assim como a Tabela 4.11 as formas de cálculo dos parâmetros foram diferentes.

Como pode ser observado, as frações volumétricas são próximas e os valores de energia armazenada G_{Ic} e a integral J, para a matriz com 30 kg/m³, encontrados por Lee *et al.* (2018) ficaram bem abaixo dos valores encontrados pelos demais autores. Esses baixos valores são resultado do efeito “balling” constatado por Lee *et al.* (2018), ou seja, as fibras não foram bem distribuídas no concreto, resultando em menor trabalhabilidade e, conseqüentemente, não desempenharam o seu papel na melhoria da tenacidade do material.

Tabela 4.12 - Comparação entre os parâmetros de fratura entre o concreto geopolimérico e o concreto de cimento convencional.

Parâmetros	LEE <i>et al.</i> (2018)			LIMA (2019)			Presente estudo		
	0 Kg/m ³	30 Kg/m ³	50 Kg/m ³	0 Kg/m ³	15 Kg/m ³	30 Kg/m ³	0 Kg/m ³	28,5 Kg/m ³	57 Kg/m ³
V_f (%)	0	30	50	0	15	30	0	28,5	57
P_{máx} (kN)	15,4	17,7	17,1	-	16,49	15,77	9,5	11,1	13,1
E (GPa)	-	-	-	-	36,34	33,18	22,3	20,2	20,0
K_{IC} (MPa·mm^{1/2})	7,96	9,2	8,84	-	43,58	36,81	18,4	21,4	25,0
CMOD_c (mm)	-	-	-	-	-	-	0,04	0,05	0,06
CTOD_c (mm)	-	-	-	-	0,022	0,018	0,017	0,022	0,029
G_{IC} (N/m)	1,79	2,4	22,1	-	-	-	15,3	22,9	33,0
R_{IC} (N/m)	-	-	-	-	-	-	40,3	62,3	80,2
J_{IC} (N/mm)	-	0,012	0,011	-	-	-	0,46	0,55	0,71

4.5 VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DOS PARÂMETROS DE FRATURA

Neste item são apresentados os diagramas com as variações entre as propriedades mecânicas e dos parâmetros de fratura dos CCG conforme ilustrado nas Figuras 4.13 e 4.14.

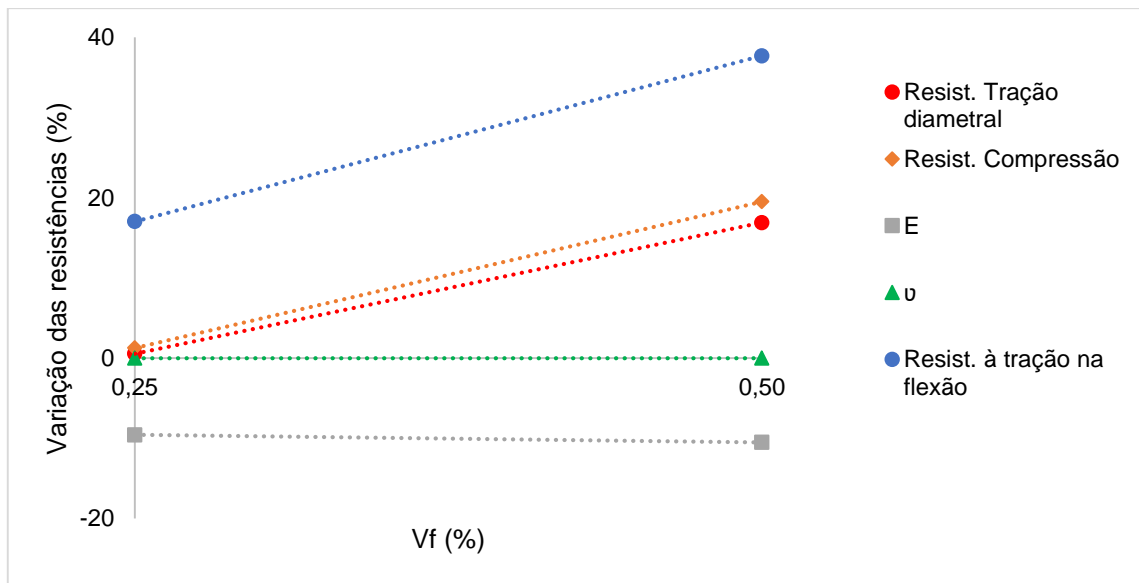


Figura 4.13 - Diagramadas propriedades mecânicas em função da fração volumétrica de fibras.

Ao analisar a Figura 4.13 é possível observar que a propriedade mecânica mais influenciada pelo incremento de fibra foi a resistência à tração na flexão, apresentando aumento de 37,7% para V_f igual a 0,5%. A resistência à compressão aumentou em menor medida (19,5%) seguida da resistência à tração por compressão diametral (16,9%). Já o módulo de elasticidade apresentou uma leve queda (10,5%) e o coeficiente de Poisson permaneceu constante.

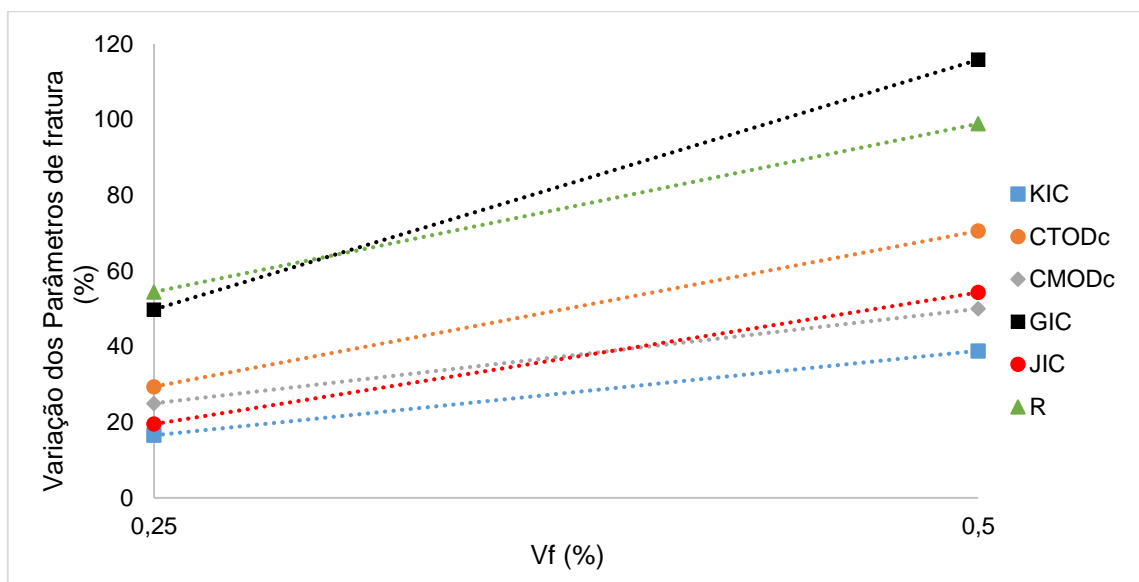


Figura 4.14 - Diagrama dos parâmetros de fratura em função da fração volumétrica de fibras.

Já ao analisar a variação dos parâmetros de fratura (Figura 4.14), conclui-se que a energia de fratura armazenada (G_I) sofreu maior influência do aumento da fração volumétrica de fibras (115,8% para V_f igual a 0,5%), seguido da resistência à fratura R (80,2%), $CTOD_c$ (70,6%), J_{Ic} (54,3%), $CMOD_c$ (50%) e K_{Ic} (38,89%) em relação ao concreto de referência.

Constata-se que os parâmetros de fratura dos CCG foram mais influenciados pelo incremento de V_f do que as propriedades mecânicas. Isso é devido à fibra desempenhar um papel mais importante na contenção da propagação e abertura das fissuras (efeito de ponte, deslizamento e arrancamento das fibras) do que nas propriedades intrínsecas do material.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões, após a análise dos resultados obtidos no programa experimental, e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

O estudo dos parâmetros de fratura do concreto geopolimérico à base de metacaulim reforçado por diferentes frações volumétricas de fibras de aço viabilizou as seguintes conclusões:

- o CCG apresentou aumento significativo de resistência à compressão e à tração por compressão diametral somente para $V_f = 0,50\%$;
- os valores do módulo de elasticidade dos CCG diminuíram com o aumento de V_f ; no entanto, após análise estatística, pelos métodos da variância e Tukey, constatou-se que eram iguais estatisticamente;
- o CCG sem fibras apresentou menor carga máxima de tração na flexão ($P_{m\acute{a}x}$) e menor deformação das vigas entalhadas, resultando em ruptura abrupta;
- o CCG com $V_f = 0,25\%$ apresentou maior queda de resistência após atingir $P_{m\acute{a}x}$; no entanto, continuou deformando até CMOD igual a 4 mm. Já o CCG com $V_f = 0,50\%$ exibiu o melhor comportamento à tração na flexão, com maior $P_{m\acute{a}x}$ e menor queda de resistência após atingir a carga máxima. O comportamento pós-pico evidenciou maior resistência à atuação de carga, além de deformação significativa até CMOD igual a 4 mm. Esse comportamento mostra a boa tenacidade à fratura obtida pelos CCG com fibras;
- a resistência à tração na flexão equivalente (f_{eq}) considera o efeito que a fibra tem no comportamento de absorção da energia até a fratura. Os valores obtidos foram crescentes com o incremento de fibras, evidenciando que as fibras aumentaram a capacidade de resistência à fratura dos CCG;
- constatou-se, pela análise da resistência residual, que as frações volumétricas estudadas foram eficientes e eficazes para aplicações estruturais, conforme previsto no *FIB Model Code/CEB-FIP*;

- os CCG apresentaram valores crescentes de todos os parâmetros de fratura avaliados (K_{IC} , G_{IC} , J_{IC} , $CMOD_C$, $CTOD_C$ e resistência à fratura R) com o aumento da fração volumétrica de fibras;
- o parâmetro K_{IC} aumentou em 16,6% e 38,9%, $CTOD_C$ em 29,4% e 70,6%, G_{IC} em 49,8% e 115,8%, resistência à fratura R em 54,5% e 80,2%, para V_f igual a 0,25 e 0,50%, respectivamente. Observa-se que os aumentos mais representativos foram para $V_f = 0,50\%$;
- quando comparados os resultados presentes na literatura com os obtidos no presente estudo, constata-se que os valores são coerentes e que as fibras têm influência positiva nos CCG.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no presente trabalho, são sugeridos os seguintes estudos futuros:

- é notória a maior viscosidade dos concretos de cimento geopolimérico em relação aos concretos convencionais de cimento Portland. Por isso, é interessante estudar o uso de superplastificantes, a fim de avaliar a trabalhabilidade dos CCG, especialmente aqueles com fibras;
- utilização de outras frações volumétricas de fibras (0,75 e 1,0%, por exemplo) e outras matrizes geopoliméricas (à base de cinza volante, de escória de alto-forno, de cinza da casca de arroz, entre outras), a fim de avaliar o comportamento à fratura desses materiais;
- utilização de fibras de aço com outras razões de aspecto, bem como outros tipos de fibras (de polipropileno, de vidro, de carbono *etc.*), visando comparar os parâmetros de fratura dos CCG;
- utilização de temperaturas de curas diferentes para concretos reforçados com fibras (de aço, polipropileno, vidro, carbono *etc.*) visando comparar os parâmetros de fratura dos CCG,
- utilização de outras normas (RILEM TC 89-FMT, 1989) para ensaio de flexão em vigas entalhadas, bem como a comparação entre diferentes métodos de cálculo (HILLERBORG, 1985, JENQ e SHAH, 1995);
- estudar o comportamento à fratura de concretos geopoliméricos armados com fibras.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.1R-96 Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544 (Reapproved 2009), Detroit, USA, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. NBR 8522. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.

BAI, T.; SONG, Z. G.; WU, Y. G.; HU, X. D.; BAI, H. (2018). **Influence of steel slag on the mechanical properties and curing time of metakaolin geopolymer**. *Ceramics International* 44:15706–15713

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. (1992). **Fiber-reinforced cement composites**. New York. McGraw-Hill, p.72-79.

BARROS, S.; SOUZA, J. R.; GOMES, K. C.; SAMPAIO, E. M.; BARBOSA, N. P.; TORRES, S. M. (2012). **Adhesion of geopolymer bonded joints considering surface treatments**. *The Journal of Adhesion*. 88:4:6.

BASTOS, P. S. S. (1999). Tese de Doutorado. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre-reinforced cementitious composites**. 2. ed. New York: Elsevier Applied Science. 2007

BERNAL, S.; GUTIERREZ, R.; DELVASTO, S.; RODRIGUEZ, E. (2010). **Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers.** *Construction and Building Materials*. 24:208-214.

BHUTTA, A.; BORGES, P. H. R.; ZANOTTI, C.; FAROOQ, M.; BANTHIA, N. (2017). **Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers.** *Cement and Concrete Composites*. 80:31-40.

BROEK, D. (1996). **Elementary engineering fracture mechanics**. 4. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

CALAND, V. S. (2001). Dissertação de Mestrado. **Resultados experimentais dos parâmetros de fraturamento para concretos de alto desempenho.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CUNHA, M. F.; FORTI, B. A.; SILVA B. I. (2010). **Tendências da normalização de metacaulim para utilização em concreto de alto desempenho.** Reunião Anual do Ibracon 52 - Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável, Ceará. Anais: IBRACON 2010, p.46.

DAVIDOVITS, J.; COMRIE, D. C.; PATERSON, J. H.; RITCEY, D. J. (1990). **Geopolymeric concretes for environmental protection.** *ACI Concrete International*.12:30-40.

DAVIDOVITS, J. (1994). **Properties of geopolymer cements,** Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine,131–149.

DAVIDOVITS, J. (2008). **Geopolymer Chemistry e Aplicacion.** Institute Geopolymere, 2 ed.

Disponível em: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/geopolymer-book-chapter1.pdf. Acesso em: 07 de Outubro de 2017.

DEEPA RAJ, S.; RUBY, A.; GANESAN, N.; SASI, D. (2013). **Fracture Properties of Fibre Reinforced Geopolymer Concrete**. *International Journal of Scientific & Engineering Research*.4:75-80.

DIAS, D. P. (2001). Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais. **Cimentos geopoliméricos: estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

DIAS, D. P.; THAUMATURGO, C. (2005). **Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers**. *Cement e Concrete Composites*.27:49:54.

EFFTING, C. (2004). Dissertação de Mestrado. **Mecânica da fratura aplicada aos materiais dúcteis e frágeis**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, Santa Catarina.

EN 14651 (2005). **Test method for metallic fibered concrete-measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)**. European Standard.

FERREIRA, L. E. T.; HANAI, J. B. **Mecânica da Fratura e Fraturamento do Concreto. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3 ed. São Paulo (SP): IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto, 2017, v. 2, p. 1-30.

FIGUEIREDO, A. D. (2011). Tese Livre Docência. **Concreto Reforçado por Fibras**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FORTES, C. (2003). **Mecânica da Fratura**. ESAB BR, Assistência Técnica Consumíveis.

GANESAN. N.; ABRAHAM, R.; DEEPA RAJ, S.; SASI, D. (2014). **Stress-strain behaviour of confined geopolymer concrete**. *Construction and Building Materials*.73:326-331.

GRIFFITH, A. A. (1920). **The Phenomena of Rupture and Flow in Solids.** *Philosophical Transactions, Series A.*221:163-198.

GUINEA, G. V.; PASTOR, J. P.; ELICES, M. **Stress Intensity Factor, Compliance and CMOD for a General Three-Point-Bend Beam.** *International Journal of Fracture.* 89:103-116.

HARDJITO, D.; WALLAH, S. E.; SUMAJOUW, D. M. J.; RANGAN, B. V. (2004). **On the development of fly ash based geopolymer concrete.** *ACI Materials Journal*,101:467:472.

HIRSCH, F. (2009). Dissertação de Mestrado. **Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaio de tração em disco circular com fenda.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP Model Code 1990. Thomas Telford Services, Ltd., London, 1993. CEB-FIP Model Code 2010. First complete draft, Lausanne, Switzerland, 2010.

ISLAM, A.; ALEGARAM, J. U.; JUMAAT, M. Z.; GHAZALI, N. B.; YOSOFF, S.; BASHAR I. I. (2017). **Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete.** *Construction and Building Materials.*152:964-977.

KOENING, A.; WUESTEMANN, A.; GATTI, F.; ROSSI, L.; FUCHS, F.; FESSEL, D.; DATHE, F.; DEHN, F.; MINELLI, F. (2019). **Flexural behaviour of steel and macro-PP fibre reinforced concretes based on alkali-activated binders.** *Construction and Building Materials.* 211:583–593.

KOHOUT, J. (2001). **Simple relation for deviation of grey and nodular cast irons from Hooke's law.** *Materials Science and Engineering.*313:16–23.

KUMAR, J. S. K.; PRABU, B.; SHALINI, A. (2018). **Experimental Investigation of Geopolymer Concrete With Steel Fibers Under Different Curing Exposures.** *International Research Journal of Engineering and Technology*.05:2022-2026.

KUMAR, S. S.; PAZHANI, K. C.; RAVISANKAR, K. (2017). **Fracture behaviour of fibre reinforced geopolymer concrete.** *Current Science*. 113:116-122.

LEE, S. J.; HONG, Y.; EOM, A. H.; WON, J. P. (2018). **Effect of steel fibres on fracture parameters of cementitious composites.** *Composite Structures*. 204:658-663.

LIMA, V. N. (2019). Dissertação de Mestrado. **Fluência e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de aço e polipropileno.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LONGHI, M. A. (2005). Dissertação de Mestrado. **Álcali-ativação do lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

LUUKKONEN, T.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; YLINIEMI, J.; KINNUNEN, P.; ILLIKAINEN, M. (2018). **One-part alkali-activated materials: A review.** *Cement and Concrete Research*.103:21-34.

MARASTEANU, M. O.; Li, X.; CLYNE, T. R.; VOLLER, V. R.; TIMM, D. H. (2006). **Concrete: reinforced beams and columns.** Research report GC3.

NEWCOMB, D. E. (2007). **Low temperature cracking of asphalt concrete pavements, Final Report.** Center for Transportation Studies, University of Minnesota. Minneapolis, MN.

MAZZA, S. C. (2010). Dissertação de Mestrado. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland.** Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia.

MEDINA, J. A. H. (2014). Tese de Doutorado. **Avaliação de previsões de fratura elastoplástica**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEHTA, A.; SIDDIQUE, R. (2017). **Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers**. *Construction and Building Materials*. 141:325–334

MEHTA, K; MONTEIRO, P. J. (2006). **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. McGraw-Hill Publishing.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2014). **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2.ed. São Paulo: Pini.

MUSTAFA AL BAKRI, A. M.; KAMARUDIN, H.; BINHUSSAIN, M.; KHAIRUL NIZAR, I.; ZARINA, Y.; RAFIZA, A. R. (2011). **The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers**. *Physics Procedia*. 22:286:291.

NAZARI, A.; SANJAYAN, J. G. (2015). **Stress intensity factor against fracture toughness in functionally graded geopolymers**. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*.15:1007–1016.

NG, T. S.; AMIN, A.; FOSTER, S. J. (2013). **The behaviour of steel-fibre reinforced geopolymer concrete beams in shear**. *Magazine of Concrete Research* 65:308–318.

NOUSHINI, A.; HASTINGS, M.; CASTEL, A.; ASLANI, F. (2018). **Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete**. *Construction and Building Materials* 186:454–475.

OLIVEIRA, A. M. A. (2018). Dissertação de Mestrado. **Determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas à base de metacaulim ativado por NaOH, KOH e NaOH + KOH**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes-RJ.

OUYANG, C.; MOBASHER, B.; SHAH S. P. (1990). **An R-curve approach for fracture of quasi-brittle materials.** *Cement and Concrete Research*.20:901-916

OUYANG, C.; SHAH, S. P. (1992). **Toughening of High Strength Cementitious Matrix Reinforced by Discontinuous Short Fibers.** *Cement and Concrete Research*. 22:1201-1215.

PALOMO, A.; KRIVENKO, P.; GARCIA-LODEIRO, I.; KAVALEROVA, E.; MALTSEVA, O.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. (2014). **A review on alkaline activation: new analytical perspectives.** *Materiales de Construcción*. 64:1-24.

PAN, Z.; SANJANYAN, J. G.; RANGAN, B. V. (2011). **Fracture properties of geopolymer paste and concrete.** *Magazine of Concrete Research*. 60:763-771.

PEÇANHA, E. F; (2012). Dissertação de Mestrado. **Estudo sobre retração, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto geopolimérico.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes-RJ.

PEREIRA, D. S. T. (2006). Dissertação de Mestrado. **Concreto de cimento geopolimérico reforçado com fibras de aço para pavimentação.** Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

PEREIRA, E. V. (2017). Dissertação de Mestrado. **Influencia das fibras de aço no comportamento mecânico e nos mecanismos de fissuração de concretos autoadensáveis.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PIRES, E. F. C. (2015). Tese de Doutorado. **Propriedades de fratura e análise não-linear de vigas pré-moldadas de concreto geopolimérico: estudo comparativo.** Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro.

PIRES, E. F. C.; AZEVEDO, C. M. C.; PIMENTA, A. R.; SILVA, F. J.; DARWISH, F. A. I. (2017). **Fracture Properties of Geopolymer Concrete Based on Metakaolin, Fly Ash and Rice Husk Ash.** *Materials Research*.20:630-636.

RAMUJEE, K.; POTHARAJU, M. (2017). **Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites**. *Materials Today: Proceedings* 4:2937–2945.

RANJBAR, N.; MEHRALI, M.; MEHRALI, M.; ALEGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z. (2016). **High tensile strength fly ash based geopolymer composite using copper coated micro steel fiber**. *Construction and Building Materials*.112:629-638.

REIS, J. M. L. (2006). **Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete**. *Construction and Building Materials*.20:673:678.

RICE, J. R. (1968). **A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks**. *Journal Applied Mechanics*. 35:375-386.

RILEM Report 5. (1991) **Fracture Mechanics Test Methods for Concrete**. Chapman & Hall, London. *American Society for Testing and Materials*.

RILEM TC 162-TDF. (2000). **Test and design method for steel fibre reinforced concrete. Recommendation**. *Materials and Structures*.33:3–5.

RILEM TC 162-TDF. (2003). **Test and design method for steel fibre reinforced concrete:sigma-epsilon-design method. Final recommendation**. *Materials and Structures*.36:560–7.

RILEM TC 89 FMT. (1990). **Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods: Size-Effect Method for determining fracture energy and process zone size of concrete**. *Materials and Structures*.23:461–5.

RODRIGUES, R. M. (1991). Tese de Doutorado. **Estudo do trincamento de pavimentos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RODRIGUES, T. M. C. G. (2014). Dissertação de Mestrado. **Argamassas e Betões Geopoliméricos: Estado da Arte e Potencial de Industrialização em Portugal**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.

ROCHA, T. (2017) Dissertação de Mestrado. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes-RJ.

SANJAYAN, J. G.; NAZARI, A.; POURALIAKBAR, H. (2015). **FEA modeling of fracture toughness of steel fibre-reinforced geopolymer composites**. *Materials and Design*. 76:215–222.

SARKER P. K.; HAQUE, R.; RAMGOLAM K. V. (2013). **Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete**. *Materials and Design* 44:580-586.

SHAH, S.; KUDER, K.; MU, E. (2004). **Fiber Reinforced Cement-Based Composites: A Forty Year Odyssey**.

SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, C. (1995). **Fracture Mechanics of Concrete- Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials**. John Wiley & Sons, New York.

SILVA, F. J. (2000). Tese de Doutorado. **Compósitos de matriz de cimento polisiloxossilato reforçados por microfibras de wollastonita**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

SILVA, F. H. B. T. (2017). Dissertação de Mestrado. **Análise numérica da fratura no concreto em modo I e modo misto utilizando elemento de junta**. Universidade de Brasília, Brasília.

SILVEIRA, P. H. T. T. (2018). Dissertação de Mestrado. **Estudo do concreto reforçado com fibras de aço e sua aplicação em dormentes ferroviários**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SKAF, T. B. (2008). Dissertação de Mestrado. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

SUMAJOUW M.D.J.; RANGAN B.V.(2006) **Low-calcium fly ash based geopolymer concrete reinforced beams and columns**. Research report GC3. 2006.
<http://www.geopolymer.org/library/>

TRINDADE, A. C. C. (2017). Dissertação de Mestrado. **Desenvolvimento e comportamento mecânico de compósitos geopoliméricos têxteis reforçados com fibra de juta**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WEELS, A. A. (1961). **Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and fast fracture** *Proceedings of the crack propagation. Symposium*. Cranfield, UK, 1:84.

YANG, K. H.; SONG, J. K.; ASHOUR, A. F.; LEE, E. T. (2008). **Properties of cementless mortars activated by sodium silicate**. *Construction and Building Materials*. 22:1981-1989.