



Matheus Roberto Martins Batista

Análise de Vigas de Concreto Geopolimérico ao Cisalhamento

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

Dissertação orientada pelo Professor Dênio Ramam Carvalho de
Oliveira.

Belém – Pará – Brasil

2024



Matheus Roberto Martins Batista

Análise de Vigas de Concreto Geopolimérico ao Cisalhamento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil julgada pela comissão examinadora seguinte.

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Orientador
Universidade Federal do Pará – UFPA

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Examinador Interno
Universidade Federal do Pará – UFPA

Prof. Dr. José Neres da Silva Filho
Examinador Externo
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

Dr. João Carlos Lisboa de Lima
Examinador Interno
Universidade Federal do Pará – UFPA

Belém, dezembro de 2024



ANÁLISE DE VIGAS DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO AO CISALHAMENTO

AUTOR:

MATHEUS ROBERTO MARTINS BATISTA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 09 / 12 / 2024.

Documento assinado digitalmente
gov.br DENIO RAMAM CARVALHO DE OLIVEIRA
Data: 10/12/2024 18:18:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE NERES DA SILVA FILHO
Data: 10/12/2024 16:55:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Neres da Silva Filho
Membro Externo (UFRN)

Documento assinado digitalmente
gov.br JOAO CARLOS LISBOA DE LIMA
Data: 10/12/2024 09:17:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Dr. João Carlos Lisboa de Lima
Membro Externo (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 10/12/2024 17:33:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

B333a Batista, Matheus Roberto Martins.
Análise de Vigas de Concreto Geopolimérico ao Cisalhamento /
Matheus Roberto Martins Batista. — 2024.
xi, 69 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. Cisalhamento. 2. Concreto geopolimérico. 3. Vigas. 4.
Metacaulim. 5. Análise experimental. I. Título.

CDD 624

*À minha esposa e aos meus pais, pelo amor,
apoio e inspiração em cada etapa desta jornada.*

Resumo

BATISTA, M. R. M. (2024). **Análise de vigas de concreto geopolimérico ao cisalhamento.**

Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2024.

Diante da crescente busca por alternativas sustentáveis na construção civil, este estudo justifica-se pela necessidade de reduzir os impactos ambientais associados ao uso de concreto convencional, como as elevadas emissões de CO₂ e o consumo de recursos naturais. Esta dissertação analisa o comportamento de vigas de concreto armado convencional (VCC) e concreto geopolimérico (VCG) à base de metacaulim sob esforços de cisalhamento, avaliando sua viabilidade técnica e ambiental. O programa experimental incluiu quatro vigas, com dimensões de 120 x 200 x 1300 mm, variando a taxa de armadura transversal entre 0,2% e 0,6%. Os resultados experimentais foram comparados com as previsões das normas NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (ACI, 2019) e EUROCODE 2 (EN, 2023), que demonstraram ser conservadoras na estimativa da resistência ao cisalhamento do concreto geopolimérico, com relação experimental-teórica entre 1,41 e 2,10. Todas as vigas falharam por cisalhamento na diagonal tracionada dentro do friso planejado de 30 graus, confirmando os modos de ruptura previstos. A viga de concreto geopolimérico com maior taxa de armadura (VCG2) apresentou desempenho superior, com carga de ruptura 56% maior que sua contraparte convencional (VCC2), evidenciando a eficácia do concreto geopolimérico para resistir a esforços cortantes. Conclui-se que o concreto geopolimérico, além de apresentar desempenho estrutural similar ao concreto convencional, é uma alternativa técnica e ambientalmente viável, com potencial para reduzir impactos ambientais ao incorporar resíduos industriais e minimizar emissões de CO₂. Esses resultados reforçam sua viabilidade para aplicações estruturais, contribuindo para o avanço de materiais sustentáveis na construção civil.

Palavras-chaves

Cisalhamento; Concreto geopolimérico; Concreto armado; Vigas; Metacaulim; Análise experimental.

Abstract

BATISTA, M. R. M. (2024). **Shear analysis of geopolymeric concrete beams.** Master's Thesis, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil. 2024 (in Portuguese).

Given the growing demand for sustainable alternatives in civil construction, this study is justified by the need to reduce the environmental impacts associated with conventional concrete, such as high CO₂ emissions and the consumption of natural resources. This dissertation analyzes the behavior of reinforced conventional concrete beams (VCC) and geopolymers concrete beams (VCG) based on metakaolin under shear forces, evaluating their technical and environmental feasibility. The experimental program included four beams with dimensions of 120 x 200 x 1300 mm, varying the transverse reinforcement ratio between 0.2% and 0.6%. The experimental results were compared with the predictions of the NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (ACI, 2019), and EUROCODE 2 (EN, 2023) standards, which were shown to be conservative in estimating the shear strength of geopolymers concrete, with an experimental-to-theoretical ratio ranging from 1.41 to 2.10. All beams failed due to shear in the tensioned diagonal within the planned 30-degree notch, confirming the predicted failure modes. The geopolymers concrete beam with a higher reinforcement ratio (V_{CG2}) showed superior performance, with a rupture load 56% higher than its conventional counterpart (V_{CC2}), demonstrating the effectiveness of geopolymers concrete in resisting shear forces. It is concluded that geopolymers concrete, in addition to exhibiting structural performance similar to conventional concrete, is a technically and environmentally viable alternative, with the potential to reduce environmental impacts by incorporating industrial waste and minimizing CO₂ emissions.

Keywords

Shear; Geopolymer concrete; Reinforced concrete; Beams; Metakaolin; Experimental analysis.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Treliça clássica de Ritter-Mörsch (MÖRSCH, 1922).....	6
Figura 2.2 - Forças existentes em viga fissurada (LINO, 2018).....	7
Figura 2.3 - Detalhamento das vigas, CHANG (2009).....	17
Figura 2.4 - Padrão de fissuras da viga S1-3, CHANG (2009).....	17
Figura 2.5 - Detalhamento das vigas, AMBILY (2012)	18
Figura 2.6 - Sistema de ensaio, AMBILY (2012).....	18
Figura 2.7 - Padrão de fissuras das vigas, AMBILY (2012).	19
Figura 2.8 – Detalhamento de uma das vigas, SARKER (2015).....	20
Figura 2.9 - Padrão de fissuras da viga S1-1, SARKER (2015).....	20
Figura 2.10 - Detalhamento das vigas, YACOB (2016).....	21
Figura 2.11 - Padrão de fissuras de viga sem estribo, YACOB (2016).....	21
Figura 2.12 - Padrão de fissuras de viga com estribo, YACOB (2016).....	22
Figura 2.13 - Detalhamento das vigas, KUMAR (2021).....	23
Figura 2.14 - Sistema de ensaio, KUMAR (2021).....	23
Figura 2.15 - Padrão de fissuras de viga sem fibra de aço TGPC, KUMAR (2021).....	23
Figura 2.16 - Padrão de fissuras de viga com fibra de aço HTGPC5, KUMAR (2021).....	23
Figura 2.17 - Detalhamento das vigas, OZTURK & ARSLAN (2022).....	24
Figura 2.18 - Padrão de fissuras de viga sem estribo G25R, OZTURK & ARSLAN (2022).	25
Figura 2.19 - Padrão de fissuras de viga com estribo G25S20, OZTURK & ARSLAN (2022).	25
Figura 2.20 – Dimensão das lajes, AZEVEDO (2023).....	26
Figura 2.21 – Esquema de ensaio, AZEVEDO (2023).....	26
Figura 3.1 - Corte longitudinal das vigas V_{CC1} e V_{CG1}	33
Figura 3.2 - Corte longitudinal das vigas V_{CC2} e V_{CG2}	33
Figura 3.3 - Cortes transversais das vigas V_{CC1} , V_{CC2} , V_{CG1} e V_{CG2}	34
Figura 3.4 - Ensaios de propriedades mecânicas do concreto	37
Figura 3.5 - Instrumentação das vigas	39
Figura 3.6 – Extensômetros elétricos de resistência na armadura longitudinal	39
Figura 3.7 - Extensômetros elétricos de resistência na armadura transversal.....	40
Figura 3.8 - Extensômetro elétrico de resistência no concreto	40
Figura 3.9 - Armação das vigas V_{CC1} e V_{CG1}	41
Figura 3.10 - Armação das vigas V_{CC2} e V_{CG2}	41

Figura 3.11 - Forma das vigas.....	41
Figura 3.12 - Concretagem das vigas V_{CC1} e V_{CC2}	41
Figura 3.13 - Vigas V_{CC1} e V_{CC2} após cura.....	42
Figura 3.14 - Concretagem das vigas V_{CG1} e V_{CG2}	42
Figura 3.15 - Vigas V_{CG1} e V_{CG2} após cura.....	42
Figura 3.16 - Diagrama de corpo livre do ensaio de flexão em três pontos.	43
Figura 3.17 - Vista lateral do esquema de ensaio.	46
Figura 3.18 - Vista lateral do esquema de ensaio.	46
Figura 3.19 - Programa experimental da viga V_{CC1}	47
Figura 3.20 - Programa experimental da viga V_{CG1}	47
Figura 3.21 - Programa experimental da viga V_{CC2}	47
Figura 3.22 - Programa experimental da viga V_{CG2}	48
Figura 4.1 - Curva tensão-deformação das barras de aço.	50
Figura 4.2 - Deslocamento vertical no meio do vão.	51
Figura 4.3 - Deslocamento vertical no ponto de aplicação da carga.	52
Figura 4.4 - Deformação da armadura transversal.....	52
Figura 4.5 - Deformação da armadura longitudinal.....	53
Figura 4.6 - Deformação do concreto.	54
Figura 4.7 - Estado final da viga V_{CC1}	56
Figura 4.8 - Estado final da viga V_{CC2}	56
Figura 4.9 - Estado final da viga V_{CG1}	56
Figura 4.10 - Estado final da viga V_{CG2}	57
Figura 4.11 – Mapa de fissuração da viga V_{CC1}	58
Figura 4.12 – Mapa de fissuração da viga V_{CG1}	58
Figura 4.13 – Mapa de fissuração da viga V_{CC2}	58
Figura 4.14 – Mapa de fissuração da viga V_{CG2}	58
Figura 5.1 - Resultados experimentais e estimados das cargas últimas.....	61

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Características das Vigas	32
Tabela 3.2 - Composição química do Metacaulim.	35
Tabela 3.3 - Dosagem do Concreto Geopolimérico.....	35
Tabela 3.4 - Dosagem do Concreto Convencional	36
Tabela 3.5 - Previsões normativas	44
Tabela 3.6 - Modo de ruptura estimado	45
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do concreto convencional e geopolimérico.....	49
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço	50
Tabela 4.3 - Modo de ruptura observado	55
Tabela 5.1 - Resultado experimental e previsões normativas.....	60
Tabela 5.2 - Comparação entre estimativas e resultados	60

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVO	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 CISALHAMENTO EM VIGAS	6
2.1.1 Treliça de Ritter-Mörsch.....	6
2.1.2 Treliça Generalizada	7
2.1.3 Transferência de Esforços Cortantes Pós-Fissuração em Vigas de Concreto	8
2.1.3.1 <i>Efeito Pino</i>	8
2.1.3.2 <i>Engrenamento de Agregados</i>	8
2.1.3.3 <i>Efeito de arco</i>	9
2.2 CONCRETO GEOPOLIMÉRICO.....	9
2.2.1 Cimento Alcali-Ativado.....	9
2.2.2 Geopolímero	10
2.2.3 Composição.....	10
2.2.4 Trabalhabilidade	11
2.2.5 Resistência a Compressão.....	12
2.2.6 Módulo de Elasticidade.....	13
2.2.7 Durabilidade.....	14
2.2.8 Metacaulim	15
2.3 TRABALHOS REALIZADOS COM CONCRETO GEOPOLIMÉRICO	16
2.3.1 CHANG (2009).....	16
2.3.2 AMBILY (2012)	18
2.3.3 SARKER (2015)	19
2.3.4 YACOB (2016).....	20
2.3.5 KUMAR (2021)	22
2.3.6 OZTURK & ARSLAN (2022).....	24
2.3.7 AZEVEDO (2023)	25

2.4 ESTIMATIVAS NORMATIVAS.....	27
2.4.1 NBR 6118 (ABNT, 2023).....	28
2.4.2 ACI 318 (ACI, 2019).....	29
2.4.3 EUROCODE 2 (EN, 2023).....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS	32
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	34
3.2.1 Concreto.....	34
3.2.2 Aço.....	38
3.3 INSTRUMENTAÇÃO.....	38
3.4 SISTEMA DE ENSAIO	42
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	49
4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	49
4.1.1 Concreto.....	49
4.1.2 Aço.....	49
4.2 DESLOCAMENTOS	50
4.3 DEFORMAÇÕES	52
4.4 MODO DE RUPTURA E FISSURAÇÃO	54
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
5.1 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS)	59
5.2 ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU)	59
6 CONCLUSÃO	62
6.1 CONSIDERAÇÕES.....	62
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Existe uma crescente demanda por alternativas ao concreto convencional devido ao impacto ambiental gerado durante sua fabricação, como a contaminação da água e a poluição do ar. Apesar do progresso significativo da indústria do cimento na redução das emissões de CO₂ através de melhorias tecnológicas, como a calcinação do calcário para a produção de clínquer, esses avanços encontram limitações. Segundo THAMILSELVI (2017), uma tonelada de cimento requer duas toneladas de matéria-prima e emite cerca de 0,87 toneladas de dióxido de carbono. Em termos globais, aproximadamente 1,5 bilhão de toneladas de CO₂ são emitidas devido à produção de concreto, representando cerca de 6% das emissões totais, conforme CASTEL (2016). Esse cenário de desenvolvimento não sustentável aumenta a demanda por conservação de energia e desenvolvimento de novos materiais.

Nesse contexto, o concreto geopolimérico ganha relevância devido à sua capacidade de reutilizar resíduos e à possibilidade de reduzir as emissões de carbono comparado ao concreto convencional. O estudo de MEYRELLES *et al.* (2024) destacou a importância da avaliação do ciclo de vida para entender os impactos ambientais dos concretos geopoliméricos. A pesquisa comparou as emissões de CO₂ entre concretos geopoliméricos e convencionais, evidenciando uma redução de até 60% nas emissões de gases de efeito estufa com o uso do geopolímero. Essa significativa diminuição é atribuída ao fato de que a produção do concreto geopolimérico demanda menos energia e utiliza resíduos industriais, como a cinza volante, o que contribui para a diminuição do impacto ambiental. Os resultados reforçam o potencial do concreto geopolimérico como uma solução eficaz para promover a sustentabilidade na construção civil, especialmente em contextos que exigem materiais de baixo impacto ambiental, alinhando-se com as iniciativas globais de preservação ambiental.

Os geopolímeros são comumente produzidos a partir do metacaulim, um subproduto da indústria de caulin. A utilização do metacaulim na produção de geopolímeros não só reduz a quantidade de resíduos gerados por essa indústria, mas também diminui a necessidade de extração de matérias-primas naturais, como o calcário, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental.

Portanto, é crucial compreender profundamente as características desse material para que ele possa gradualmente substituir o concreto tradicional. Uma dessas características é a resistência ao cisalhamento. Essa propriedade é extremamente relevante, pois a ruptura de

elementos estruturais devido ao cisalhamento é, frequentemente, abrupta. Assim, garantir a ductilidade desses elementos, independentemente do material empregado, é de alta prioridade. Para que o concreto geopolimérico possa se tornar um substituto viável do concreto tradicional, é necessário que ele apresente essa característica, o que estudos recentes têm demonstrado. No entanto, a variabilidade nas dosagens, nos materiais aglomerantes, nos ativadores alcalinos, entre outros fatores, precisa ser mais bem estudada.

Além disso, outras propriedades dos geopolímeros, como durabilidade, resistência à compressão, absorção de água e resistência química, são aspectos fundamentais a serem avaliados. A durabilidade, por exemplo, é crucial para assegurar a longevidade das estruturas construídas com esse material, garantindo que as vigas e outros elementos não se degradem rapidamente ao longo do tempo. A resistência à compressão é igualmente importante, pois reflete a capacidade do material de suportar as cargas aplicadas, sendo essencial para a sua aplicação em diversas estruturas. Já a absorção de água e a resistência química são fatores determinantes para a estabilidade e a durabilidade do concreto geopolimérico em diferentes ambientes, especialmente em locais com alta agressividade ambiental, como áreas sujeitas a corrosão, ataques químicos ou variações de umidade. Portanto, o estudo dessas propriedades é fundamental para garantir que os geopolímeros possam ser amplamente adotados na construção civil, oferecendo uma alternativa sustentável e eficiente ao concreto convencional.

Dado os diversos benefícios dos geopolímeros, como a redução das emissões de carbono, maior durabilidade, aproveitamento de resíduos industriais e elevada resistência, o estudo dos geopolímeros cimentícios (CGP) e sua aplicação em elementos estruturais se configura como uma área de pesquisa extremamente promissora. Dessa forma, para que os geopolímeros sejam amplamente adotados na construção civil, é fundamental entender o comportamento estrutural dos elementos de concreto armado que utilizam esse tipo de ligante. Portanto, compreender as propriedades estruturais do concreto geopolimérico, com destaque para sua resistência ao cisalhamento, é essencial para viabilizar sua ampla adoção na construção civil. Apesar de sua relevância como alternativa sustentável, ainda existem lacunas quanto à normatização e à previsão de seu comportamento estrutural. Esta pesquisa busca preencher parte dessas lacunas, fornecendo informações experimentais e comparativas com os modelos normativos disponíveis, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre concretos geopoliméricos e sua aplicação segura e eficiente.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por alternativas sustentáveis na construção civil tem sido impulsionada pela necessidade de reduzir o impacto ambiental da indústria da construção, que é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa e de consumo de recursos naturais. Nesse contexto, os geopolímeros destacam-se como uma alternativa viável ao concreto convencional, uma vez que sua produção requer menos energia e emite menos CO₂. Além disso, os geopolímeros têm a capacidade de incorporar resíduos industriais, o que não apenas reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, mas também contribui para a economia circular. Isso significa que esses materiais podem ser reaproveitados de forma segura e eficiente, reduzindo a demanda por matérias-primas virgens e minimizando o impacto ambiental associado à extração e processamento desses materiais.

No entanto, apesar das vantagens dos geopolímeros, ainda existem desafios a serem superados, como a falta de normatização e padronização em relação aos métodos de produção e às propriedades mecânicas. Portanto, este trabalho também busca contribuir para o desenvolvimento de diretrizes técnicas que possam orientar a produção e o uso dos geopolímeros de forma segura e eficiente. Assim, a pesquisa sobre o comportamento estrutural dos geopolímeros, especialmente em relação à resistência ao cisalhamento, é fundamental para promover a adoção desses materiais na construção civil de forma sustentável. Espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir para o avanço da ciência e tecnologia de materiais de construção sustentáveis, beneficiando não apenas o setor da construção, mas também o meio ambiente e a sociedade como um todo.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é investigar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico à base de metacaulim, comparando-as com vigas de concreto armado convencional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar os resultados experimentais com os modelos normativos de cálculo estrutural obtidos pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (ACI, 2019) e EUROCODE 2 (EN, 2023).
- Avaliar a adequação dos modelos normativos para prever o comportamento das vigas de concreto geopolimérico.
- Contribuir para o conhecimento sobre o uso de concretos geopoliméricos em aplicações estruturais, especialmente no que diz respeito à resistência ao cisalhamento.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, além das referências, conforme descrito a seguir:

No Capítulo 1, são apresentados a introdução, a justificativa e os objetivos da pesquisa, abordando o contexto ambiental e a relevância do concreto geopolimérico como alternativa sustentável ao concreto convencional. Também são discutidas as motivações para o estudo e os objetivos que guiaram a realização da pesquisa.

O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, abordando os conceitos fundamentais de cisalhamento em vigas, os modelos teóricos utilizados para previsão de resistência, as características do concreto geopolimérico e as propriedades do metacaulim. Além disso, são apresentados estudos relevantes na literatura sobre o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico.

No Capítulo 3, são detalhados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, incluindo a caracterização das vigas ensaiadas, a preparação e a dosagem do concreto geopolimérico e convencional, os procedimentos experimentais adotados para os ensaios de compressão, tração, módulo de elasticidade e deslocamentos, além do sistema de instrumentação e monitoramento utilizado para coleta de dados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados, destacando as propriedades dos materiais, os deslocamentos, as deformações e os modos de ruptura das vigas. São analisados os mapas de fissuração e os comportamentos estruturais observados durante os ensaios.

No Capítulo 5, é realizada a análise dos resultados, comparando os dados experimentais com as previsões normativas segundo a NBR 6118, a ACI 318 e o EUROCODE 2. São discutidos o desempenho das vigas em termos de Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU), assim como as discrepâncias entre os modelos normativos e os resultados experimentais.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, destacando os principais achados e a viabilidade do concreto geopolimérico como material estrutural, alinhado às questões de sustentabilidade. Também são feitas sugestões para trabalhos futuros, indicando possibilidades de aprofundamento e aplicação dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CISALHAMENTO EM VIGAS

A ruptura de vigas sob efeito de força cortante é comumente brusca, por isso o correto dimensionamento é importante. Em função disso, a NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece a obrigatoriedade da garantia de ductilidade de tal maneira que a falha da viga seja avisada visualmente, assim como diversas outras normas. De acordo com WIGHT & MACGREGOR (2012), nas vigas de concreto armado o efeito da flexão é necessário para obter as dimensões da seção e a armadura. Após essa etapa a viga é então verificada ao cisalhamento, o que não reflete o fato de que a resistência ao efeito cortante deve ser maior do que à flexão, devido à ruptura frágil. Embora os modelos clássicos e generalizados forneçam uma base sólida para o cálculo de vigas de concreto armado, sua aplicabilidade ao concreto geopolimérico pode apresentar desafios, devido às diferenças na composição e no comportamento mecânico do material.

2.1.1 Treliça de Ritter-Mörsch

O cálculo para o projeto de vigas sob cisalhamento das principais normas do mundo tem como base a treliça clássica elaborada por RITTER (1899) e MÖRSCH (1920 e 1922). Este modelo consiste em considerar a viga como fissurada, e análoga a uma treliça com banzo superior comprimido, banzo inferior tracionado, diagonais comprimidas como bielas de concreto com inclinação de $\theta = 45^\circ$ e as diagonais tracionadas como a armadura transversal com inclinação $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. A Figura 2.1 apresenta as considerações da treliça de Ritter-Mörsch.

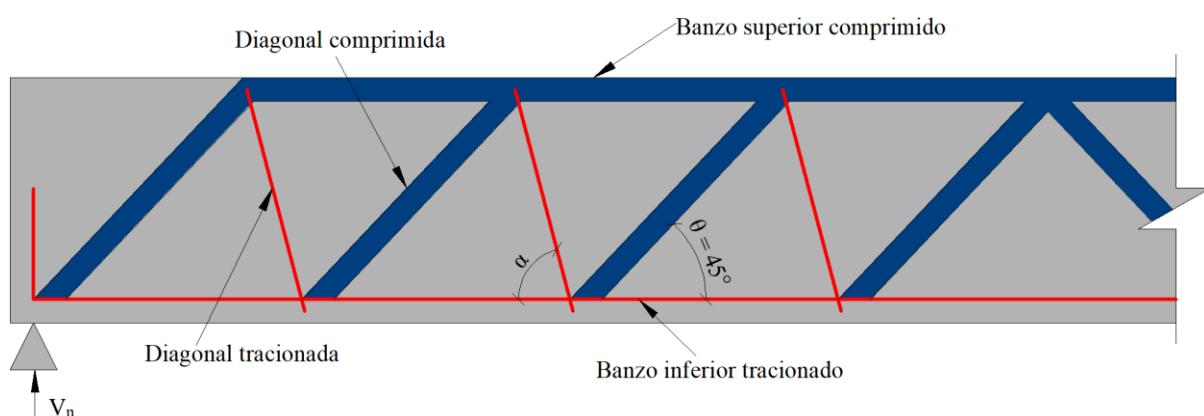


Figura 2.1 - Treliça clássica de Ritter-Mörsch (MÖRSCH, 1922).

2.1.2 Treliça Generalizada

Os autores SCHLAICH & SCHAFER (1987) propuseram ajustes ao modelo da treliça clássica, pois ele apresentava resultados conservadores quando comparados com dados experimentais, esse modelo ficou conhecido como “treliça generalizada”. Nesse modelo os banzos não eram mais paralelos e sim inclinados na direção do apoio, as bielas são conectadas no banzo superior, tornando a treliça hiperestática e o ângulo das bielas (θ) deixa de ser fixo em 45° .

Para efeito de cálculo das tensões solicitantes, este modelo é habitualmente apresentado como isostático, sendo a única diferença em relação ao modelo da treliça clássica, o ângulo das bielas θ . As forças atuantes em uma viga fissurada sob o cisalhamento estão apresentadas na Figura 2.2.

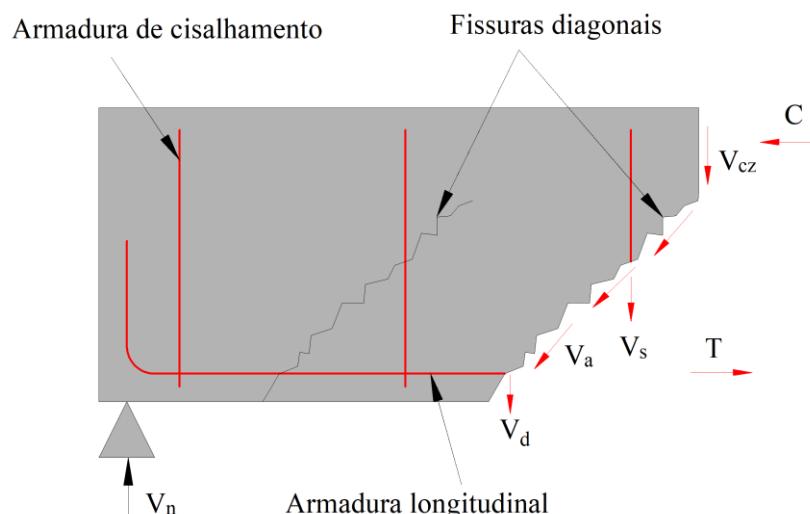


Figura 2.2 - Forças existentes em viga fissurada (LINO, 2018).

Onde:

V_n – Resistência ao cisalhamento;

V_d – Parcela de resistência referente ao efeito pino da armadura longitudinal;

V_a – Parcela de resistência referente ao intertravamento dos agregados entre as faces da fissura;

V_{cz} – Parcela de resistência referente ao concreto não fissurado adjacente a fissura;

V_s – Parcela de resistência referente à armadura transversal;

$$V_n = V_d + V_{ay} + V_{cz} + V_s \quad (2.1)$$

Onde:

V_{ay} – Componente vertical de V_a ;

Usualmente os termos V_d , V_{ay} e V_{cz} são agrupados sob uma única grandeza: resistência ao cisalhamento devido ao concreto na biela (V_c).

Além dos modelos teóricos, é essencial compreender os mecanismos que entram em ação após a fissuração inicial das vigas, garantindo sua capacidade residual de suportar esforços cortantes.

2.1.3 Transferência de Esforços Cortantes Pós-Fissuração em Vigas de Concreto

Após a fissuração inicial nas vigas de concreto, a transferência de esforços cortantes se torna um fenômeno crucial para a análise do comportamento estrutural das vigas. Após a fissuração inicial, o concreto perde sua capacidade direta de resistir aos esforços cortantes, exigindo a redistribuição das tensões por meio de mecanismos alternativos, como o efeito pino, o engrenamento de agregados e o efeito arco. Esses mecanismos permitem que a viga continue a suportar os esforços cortantes, mas com uma redução significativa na capacidade de resistência. Esses mecanismos são particularmente importantes para vigas submetidas a altos níveis de carregamento, onde a análise baseada exclusivamente na resistência inicial ao cisalhamento pode subestimar a capacidade real da estrutura.

2.1.3.1 Efeito Pino

O efeito pino refere-se à interação entre as partículas de agregado no concreto após a fissuração. Quando as fissuras se abrem, os agregados no concreto podem atuar como "pinos", ajudando a transferir os esforços cortantes de uma seção para outra, de modo que as partículas de agregado se intercalam nas fissuras. Esse fenômeno pode ser visto como uma forma de reforço adicional, onde o movimento relativo das partes fissuradas é restrito pela interação entre os agregados. O efeito pino é mais significativo em concretos com agregados de maior tamanho e melhor compactação, permitindo uma maior transferência de esforço cortante através da mecânica de tração e compressão localizadas nos agregados.

2.1.3.2 Engrenamento de Agregados

O engrenamento de agregados é um processo em que os agregados, após a fissuração, permanecem engatados uns aos outros, dificultando o deslizamento relativo entre as partes

fissuradas. Esse efeito contribui para a transferência de esforços cortantes ao permitir que a seção fissurada atue parcialmente como uma "treliça" de agregados interconectados, que ajudam a distribuir as tensões cortantes e a impedir o colapso imediato da viga. A eficiência do engrenamento depende da distribuição e do tamanho dos agregados, bem como da intensidade e orientação das fissuras.

2.1.3.3 *Efeito de arco*

O efeito arco ocorre quando uma viga fissurada começa a funcionar como uma estrutura de arco sob carregamento. Esse efeito é caracterizado pela transferência de esforços cortantes por meio de forças horizontais que se formam ao longo da linha de fissura. As fissuras atuam como "flexíveis", permitindo que as forças se transferem entre as seções da viga, gerando um efeito de arco que distribui os esforços cortantes de maneira mais eficiente. Esse comportamento é mais pronunciado em vigas que experimentam altos níveis de fissuração e em situações de grandes deformações, onde a geometria das fissuras e o desenvolvimento do momento curvatura podem contribuir para a redistribuição dos esforços cortantes.

2.2 CONCRETO GEOPOLIMÉRICO

2.2.1 Cimento Alcali-Ativado

Cimento álcali ativado é um material cimentício alternativo ao cimento Portland tradicional, que se destaca por suas características sustentáveis e propriedades mecânicas. Este tipo de cimento é produzido pela ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, como cinzas volantes, escórias de alto-forno, metacaulim, entre outros. A ativação alcalina envolve o uso de soluções alcalinas (hidróxidos ou silicatos de sódio e potássio) para iniciar reações químicas que formam um gel ligante capaz de conferir resistência ao material final. A fabricação do cimento álcali ativado começa com a escolha de materiais de partida, que são, em sua maioria, subprodutos industriais. Esses materiais são misturados com soluções alcalinas, como hidróxido de sódio (NaOH) ou silicato de sódio (Na_2SiO_3), que promovem a dissolução dos componentes amorfos de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Esse processo gera um gel de aluminosilicato que atua como ligante. De acordo com PROVIS & VAN DEVENTER (2009), a ativação ocorre em temperaturas ambiente ou ligeiramente elevadas, tornando o processo mais sustentável em comparação com a produção de cimento Portland, que requer altas temperaturas para a calcinação do calcário.

2.2.2 Geopolímero

Segundo DAVIDOVITS (1979), geopolímeros são uma classe específica de cimentos álcali ativados, conhecidos por sua estrutura química tridimensional de aluminosilicatos (Al-Si-O). Enquanto todos os geopolímeros são cimentos álcali ativados, nem todos os cimentos álcali ativados possuem as características estruturais que definem os geopolímeros. Do ponto de vista ambiental, os geopolímeros são particularmente relevantes devido à possibilidade de incorporar resíduos industriais em sua fabricação. Esta característica contribui para a redução da utilização de matérias-primas e para a diminuição da quantidade de resíduos depositados em aterros (SCRIVENER, 2018). Apesar dos benefícios, a adoção de geopolímeros enfrenta desafios técnicos relacionados à padronização das propriedades do material, que podem variar significativamente em função da composição das matérias-primas e das condições de cura. Além disso, a ausência de normas técnicas consolidadas para testes e aplicação de geopolímeros ainda representa uma barreira para sua adoção em larga escala (DUXSON, 2007).

2.2.3 Composição

O Concreto Geopolimérico (CGP) consiste em uma combinação de ativadores e diferentes fontes de aluminosilicatos e agregados, podendo até ser misturado com o Concreto Portland (CP), segundo HASSAN (2019). Os aluminosilicatos são obtidos através de materiais pozolânicos ricos em sílica e alumina. As pozolanas podem ser resíduos industriais ou agrícolas, como escória de alto forno, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, entre outros, que são usados para mitigar o impacto ambiental causado por essas indústrias, de acordo com BASARI (2018). Tais fontes de aluminosilicatos podem ser usadas separadamente ou em conjunto.

Os ativadores alcalinos são o segundo componente crucial do CGP. Eles atuam ajudando a liberação de sílica e alumina dos materiais pozolânicos. Segundo XU (2000), os ativadores alcalinos mais comuns são o silicato de sódio e hidróxido de sódio, outros como hidróxido de potássio e silicato de potássio também podem ser utilizados. O processo de geopolimerização ocorre rapidamente se o meio alcalino contém hidróxidos e silicatos solúveis. A reatividade e concentração são as características principais dos ativadores alcalinos no processo de geopolimerização. Segundo JUENGER (2001), a quantidade de ativadores alcalinos deve ser considerada com cautela, pois após certa concentração ocorre degradação da resistência

mecânica do CGP. De acordo com FERDOUS (2013), para atingir determinada resistência e trabalhabilidade é necessário levar em conta diversas variáveis, como alcalinidade da mistura, composição e tipos de aluminosilicatos, proporção de aluminatos para silicatos e proporção de silicatos para hidróxidos. Portanto, o equilíbrio entre essas variáveis é essencial para otimizar as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade do concreto geopolimérico.

2.2.4 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto geopolimérico (CGP) é um atributo fundamental que determina a eficácia com que o material pode ser misturado, transportado, aplicado e compactado, minimizando fenômenos indesejados como segregação ou sangramento. Esta propriedade é essencialmente influenciada por variáveis como a viscosidade da mistura, o teor de umidade e a relação água/sólidos.

Os parâmetros que governam a trabalhabilidade no CGP diferem consideravelmente daqueles em concretos de cimento Portland, em virtude das distintas reações químicas e características dos materiais componentes. Estudos de CHINDAPRASIRT (2007) revelam que a trabalhabilidade do CGP, avaliada por meio do teste de abatimento, pode variar de 110 ± 5 mm a 135 ± 5 mm, dependendo da concentração e proporção dos ativadores alcalinos utilizados. Esses valores têm implicações diretas nas propriedades do concreto após a cura. Adicionalmente, JUMRAT (2011) indica que a fluidez da mistura é afetada pelas relações aluminosilicatos por solução alcalina e $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$; um aumento nessas relações aumenta a demanda por água na mistura, afetando a trabalhabilidade.

A seleção e a granulometria dos agregados são outros fatores críticos que impactam a trabalhabilidade do CGP, como destacado por REDDY (2018). Aumentos na relação agregado graúdo/agregado miúdo tendem a incrementar a segregação, enquanto uma redução desta relação favorece altos valores de *slump*. A combinação estratégica de agregados de diferentes diâmetros é recomendada para otimizar a trabalhabilidade. O uso de aditivos, como retardantes de pega, também desempenha um papel significativo na melhoria da trabalhabilidade do CGP, conforme explorado por UMNIATI (2017). Tais aditivos podem influenciar tanto as fases iniciais quanto as finais do processo de endurecimento, com impactos moderados na resistência do material. DUXSON (2007) e PROVIS & VAN DEVENTER (2014) enfatizam que ajustes na formulação do CGP, incluindo as proporções de silicato de sódio para hidróxido de sódio e a concentração de sólidos, são essenciais para

modular a viscosidade e ajustar o tempo de pega, facilitando assim a manipulação do material. O emprego de superplastificantes, conforme discutido por PALOMO (2013), é uma prática comum para aprimorar a fluidez e facilitar a compactação do concreto geopolimérico.

2.2.5 Resistência a Compressão

O concreto geopolimérico (CGP) destaca-se por sua alta resistência à compressão, atribuída à formação de uma matriz densa e homogênea de aluminosilicatos. Este processo envolve a dissolução dos precursores em uma solução alcalina, liberando íons de silício e alumínio, que se policondensam formando uma rede tridimensional de aluminosilicatos (PROVIS & VAN DEVENTER, 2009). A cura pode ocorrer à temperatura ambiente ou com aquecimento moderado, acelerando a formação da rede geopolimérica e o desenvolvimento da resistência (DUXSON, 2007). Diversos fatores influenciam a resistência à compressão do CGP, incluindo a relação Si/Al, com maior razão tendendo a produzir uma estrutura mais forte e menos porosa (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ & PALOMO, 2005); a concentração da solução alcalina, com concentrações mais altas de hidróxido de sódio e silicato de sódio promovendo melhor formação do gel de aluminosilicato (LLOYD & RANGAN, 2010); e o condicionamento de cura, onde a cura térmica (entre 60-90°C) acelera a reação de geopolimerização, resultando em resistências iniciais mais altas (ALZEER & MACKENZIE, 2012). Estudos mostram que o CGP pode superar a resistência à compressão do concreto Portland tradicional, com resistências superiores a 60 MPa para CGPs curados a 85°C por 24 horas (ALZEER & MACKENZIE, 2012) e até 80 MPa com otimização da composição da mistura e condições de cura (LLOYD & RANGAN, 2010).

A cura térmica, frequentemente aplicada para melhorar as propriedades mecânicas dos geopolímeros, acelera as reações geopoliméricas, como discutido por VAN JAARSVELD (2019). A aplicação de calor durante a cura (entre 60°C e 80°C) promove uma maior conexão cruzada da estrutura de Si-Al-O, aumentando a resistência à compressão, embora a duração do tratamento térmico deva ser cuidadosamente controlada para evitar efeitos adversos. A influência dos aditivos também é significativa, como a incorporação de nano-sílica relatada por LEE (2021). As partículas de nano-sílica atuam como nucleadores dentro da matriz geopolimérica, auxiliando na formação de uma rede mais densa e uniforme, o que se traduz em um aumento na resistência à compressão.

Para o concreto geopolimérico à base de metacaulim, em específico, a resistência à compressão é influenciada por fatores intrínsecos relacionados à composição do material precursor e às condições de processamento. DUXSON (2018) ressaltam que a pureza e a fina granulometria do metacaulim facilitam a dissolução completa dos componentes aluminosilicatos na presença de soluções alcalinas, o que é essencial para a formação eficaz da rede geopolimérica e o desenvolvimento de alta resistência à compressão. A proporção $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ no metacaulim é um parâmetro crítico que afeta diretamente a resistência à compressão do CGP, segundo PROVIS (2020). Uma razão molar equilibrada promove a formação de uma estrutura de gel geopolimérico mais homogênea e resistente, otimizando as interações moleculares e maximizando a densidade da matriz geopolimérica.

2.2.6 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto geopolimérico é a propriedade mecânica que indica a rigidez do material e sua capacidade de se deformar linearmente quando submetido a cargas. Esta propriedade no CGP é influenciada por fatores como a natureza dos precursores aluminosilicatos, a composição da matriz geopolimérica, o processo de cura e a adição de aditivos ou modificadores. Estudos têm mostrado que diferentes tipos de aluminosilicatos podem afetar significativamente o módulo de elasticidade do CGP. Por exemplo, um estudo realizado por DUXTON (2007) evidenciou que o uso de metacaulim, devido à sua alta reatividade e fina granulometria, contribui para a formação de uma matriz geopolimérica densa e homogênea, resultando em valores superiores de módulo de elasticidade em comparação com precursores menos reativos, como certas cinzas volantes.

A cura térmica é outro fator que influencia substancialmente o módulo de elasticidade dos CGPs. De acordo com a pesquisa de PROVIS (2014), tratamentos térmicos promovem a consolidação da estrutura de silicato de alumínio hidratado, reduzindo a porosidade e aumentando a rigidez do material. Este estudo demonstra que a cura em temperaturas entre 60°C e 80°C pode aumentar o módulo de elasticidade ao acelerar a polimerização e melhorar a integridade estrutural da matriz geopolimérica. A adição de nanopartículas, como a nano-sílica, tem sido estudada por sua capacidade de atuar como locais de nucleação e promover a densificação da matriz geopolimérica. Um estudo de LEE (2021) revelou que a incorporação de nano-sílica em CGPs com metacaulim pode levar a um aumento significativo no módulo de elasticidade, atribuído ao preenchimento de poros e à melhoria da conexão entre a

matriz e os agregados. A relação água/alcalino também desempenha um papel fundamental na determinação do módulo de elasticidade do CGP. Segundo ZHU (2020), uma proporção menor de água conduz a uma matriz mais compacta, contribuindo para uma maior rigidez. Além disso, a escolha dos agregados é essencial; agregados com alta rigidez e boa interação interfacial com a matriz geopolimérica melhoram a transferência de carga e aumentam o módulo de elasticidade.

ALBAKRI (2013) examinou o comportamento mecânico de concretos geopoliméricos à base de metacaulim e destacou a relação entre a composição da mistura e o módulo de elasticidade. Este estudo encontrou que o módulo de elasticidade pode ser significativamente influenciado pela proporção do silicato de sódio e pela cura térmica, que alteram a microestrutura do material e, por consequência, suas propriedades elásticas. O tratamento térmico, em particular, ajuda a acelerar as reações geopoliméricas, resultando em uma matriz mais consolidada e menos porosa, o que contribui para um aumento do módulo de elasticidade.

NOUSHINI (2016), HARDJITO (2005), FAROOQ (2020) e HUNG (2017) indicam que, em geral, o CGP pode apresentar um módulo de elasticidade menor do que o concreto de cimento Portland (CP), devido aos efeitos dos aluminosilicatos e outros processos envolvidos na geopolimerização. Em contrapartida, HAQ (2016) aponta que o enriquecimento de NaOH pode promover um aumento linear no módulo de elasticidade, sugerindo que ajustes na composição química e nas condições de cura podem influenciar positivamente esta propriedade.

2.2.7 Durabilidade

A durabilidade do concreto geopolimérico é a característica que define sua longevidade e resistência a condições ambientais adversas, como ataques químicos, ciclos de congelamento e degelo e exposição a altas temperaturas. Concretos geopoliméricos à base de metacaulim são especialmente resistentes à sulfatos e a outros ataques químicos. Segundo DUXTON (2007), a estrutura microporosa densa e a natureza quimicamente estável do CGP com metacaulim reduzem significativamente a permeabilidade do concreto a íons prejudiciais. A pesquisa de BARBOSA (2000) também confirma que o CGP mostra excelente desempenho em ambientes ricos em sulfatos, superando o concreto de cimento Portland em termos de durabilidade e integridade estrutural. Outra vantagem notável do CGP é sua estabilidade

térmica. Como apontado por TEMUJJIN (2009), o CGP à base de metacaulim mantém sua integridade estrutural mesmo quando exposto a temperaturas acima de 800°C, o que é atribuído à sua capacidade de reter uma estrutura geopolimérica estável e resistente ao calor. Esta propriedade é crucial para aplicações em construções sujeitas a altas temperaturas ou em áreas propensas a incêndios.

A performance do CGP em condições de congelamento e degelo também é destacada na literatura. Conforme estudo de CRIADO (2005), o CGP à base de metacaulim exibe excelente resistência aos ciclos de congelamento e degelo, atribuída à sua baixa absorção de água e alta densidade. Isso minimiza a formação de cristais de gelo internos, que podem causar fissuras e degradação em concretos convencionais. A sustentabilidade é uma consideração importante na avaliação da durabilidade do CGP. Além de suas propriedades inerentes, o CGP contribui para a sustentabilidade ambiental por utilizar materiais industriais de resíduo, como metacaulim, e por não necessitar de altas temperaturas de cura, reduzindo a energia consumida no processo de produção. Segundo DAVIDOVITS (1994), isso não apenas melhora a pegada de carbono do material, mas também aumenta sua vida útil devido à redução da retração e da fissuração ao longo do tempo. De acordo com GUNASEKARA (2016), a durabilidade do CGP pode ser determinada por propriedades como absorção de água, perda de massa, perda de resistência e penetração de cloreto. Assim, o CGP tem consideravelmente mais durabilidade que o CP, de acordo com as fontes REHMAN (2020) e DEEPAK (2020).

2.2.8 Metacaulim

O metacaulim é um material pozolânico de alta eficácia, amplamente utilizado tanto na fabricação de concreto geopolimérico quanto em aplicações de cimento Portland, para aprimorar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos. Produzido pela calcinação controlada do caulim natural em temperaturas que variam de 650°C a 800°C, o processo resulta na desidroxilação parcial do caulim, formando uma estrutura amorfa de sílica-alumínio. Essa transformação confere ao metacaulim características como alta brancura e finura, essenciais para suas funções como aditivo pozolânico.

De acordo com DUXSON (2007), o metacaulim se destaca por sua elevada reatividade, atribuída à sua ampla superfície específica e à presença de sílica e alumina em formas altamente reativas. Esta reatividade é crucial, especialmente na produção de concretos

geopoliméricos, pois facilita a formação de cadeias poliméricas densas e homogêneas de silicato e aluminato. PROVIS & VAN DEVENTER (2009) ressaltam que o metacaulim é particularmente valioso por sua habilidade em contribuir significativamente para a formação e otimização da matriz geopolimérica, proporcionando um equilíbrio ideal entre as unidades de silicato e aluminato. Esta capacidade é fundamental para a criação de uma estrutura geopolimérica estável e durável.

Além disso, o metacaulim aprimora a durabilidade do concreto. BARBOSA (2000) demonstraram que sua inclusão no concreto reduz a permeabilidade do material, aumenta a resistência contra ataques químicos, a penetração de íons cloreto e melhora a resistência a sulfatos e ambientes ácidos. Tais propriedades tornam o metacaulim um aditivo extremamente valioso para concretos expostos a condições ambientais adversas.

Apesar de o metacaulim poder aumentar a viscosidade da mistura de concreto, sua fina granulometria e natureza amorfa podem melhorar a trabalhabilidade, reduzindo a demanda por água. WILD (1996) observaram que, quando utilizado em proporções adequadas, o metacaulim facilita o adensamento do concreto e aprimora o acabamento das superfícies de concreto. Este equilíbrio entre viscosidade e trabalhabilidade é essencial para otimizar o uso do concreto em diversas aplicações construtivas.

2.3 TRABALHOS REALIZADOS COM CONCRETO GEOPOLIMÉRICO

A seguir, são apresentados os principais estudos que analisaram o comportamento ao cisalhamento de vigas e lajes de concreto geopolimérico. Esses trabalhos destacam diferentes variáveis, como tipo de aglomerante, taxa de armadura, uso de fibras e padrões de ruptura, contribuindo para uma melhor compreensão das propriedades estruturais do concreto geopolimérico.

2.3.1 CHANG (2009)

O autor estudou o comportamento ao cisalhamento em vigas de concreto geopolimérico a base cinzas volantes de seção 200 mm x 300 mm com comprimento de 2000 mm. Foram moldadas 9 vigas variando a taxa de armadura longitudinal (1,74%, 2,32% e 3,14%) e transversal (0,1%, 0,13% e 0,17%). O vão ensaiado foi de 1680 mm e a razão a/d adotada foi

de 2,5. O detalhamento das vigas é apresentado na Figura 2.3, enquanto o padrão de fissuras da viga S1-3, representativo do comportamento observado, está ilustrado na Figura 2.4.

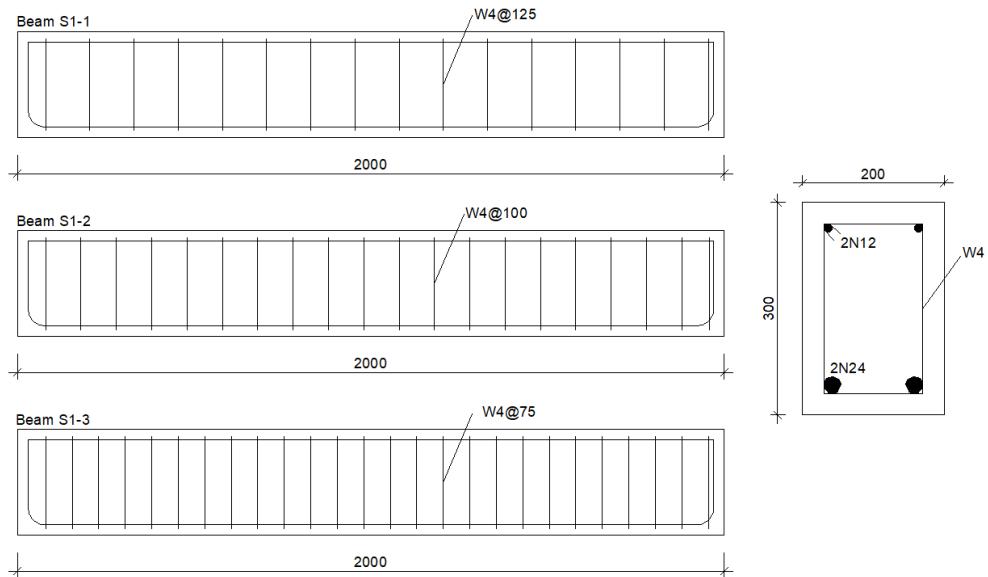


Figura 2.3 - Detalhamento das vigas, CHANG (2009).



Figura 2.4 - Padrão de fissuras da viga S1-3, CHANG (2009).

Com base nos ensaios realizados, o autor destacou as seguintes observações principais:

- Os modos de ruptura encontrados, falha por tração diagonal e por cisalhamento, e padrão de fissuras foram em geral similares aos descritos na literatura para vigas de concreto a base de cimento Portland;
- A resistência ao cisalhamento das vigas cresceu em função da taxa de armadura longitudinal;
- As previsões de resistência ao cisalhamento das normas AS3600-05 e ACI 318-08 foram conservadoras, 1,7 e 2,55 de razão entre a carga prevista e ensaiada, respectivamente;
- O estudo aponta que métodos de previsão de resistência e aderência para vigas de concreto a base de cimento Portland são aplicáveis para vigas de CGP.

2.3.2 AMBILY (2012)

Investigou-se o desempenho ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno e cinzas volantes e de seção T com mesa de (270 x 75) mm e alma de (75 x 300) mm. O comprimento das vigas foi de 2200 mm, vão efetivo de 1850 mm e a razão a/d adotada foi de 1,9. Foram moldadas 8 vigas variando o emprego de 0,75% em volume de fibras de aço e espaçamento dos estribos (0 mm, 120 mm, 180 mm e 240 mm). O detalhamento das vigas pode ser observado na Figura 2.5, o sistema de ensaio utilizado está ilustrado na Figura 2.6, e o padrão de fissuras das vigas é apresentado na Figura 2.7, conforme o estudo.

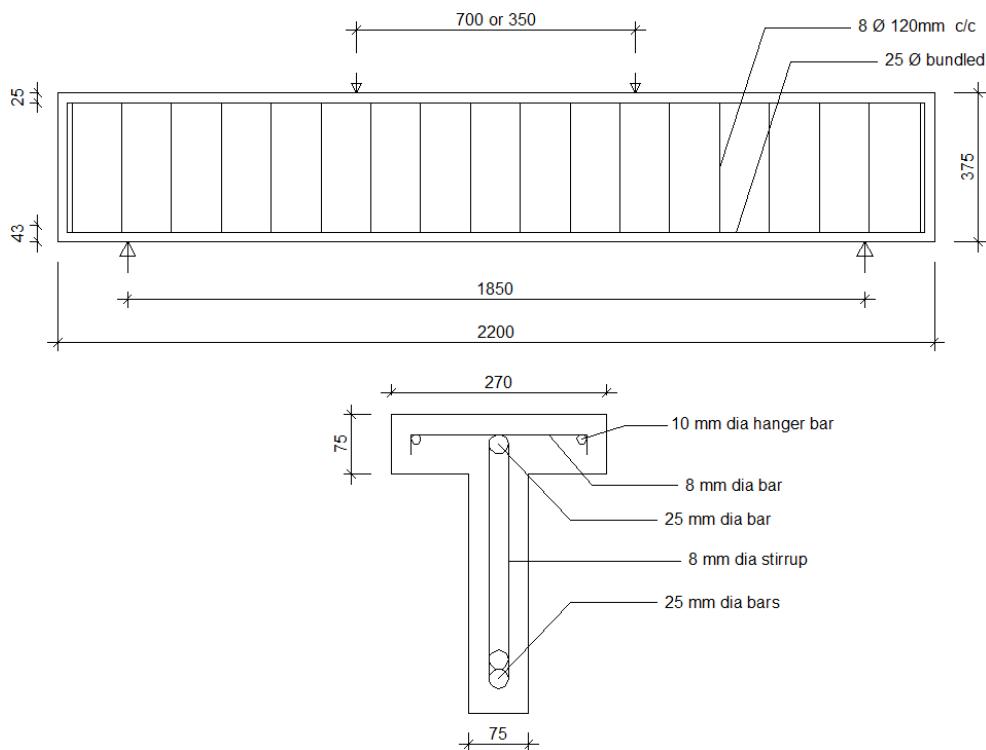


Figura 2.5 - Detalhamento das vigas, AMBILY (2012).



Figura 2.6 - Sistema de ensaio, AMBILY (2012).



Figura 2.7 - Padrão de fissuras das vigas, AMBILY (2012).

Com base nos resultados experimentais e na análise das fissuras, o autor concluiu que:

- Todas as vigas apresentaram boa trabalhabilidade (*slump* de 225 a 250 mm) e a resistência a compressão ficaram no intervalo de 30 MPa a 44 MPa. A primeira fissura visível foi resultado de esforços de flexão na maioria dos casos e apareceram primeiro nas vigas sem fibras de aço ao carregamento atingir 40 kN e nas que possuíam fibras de aço surgiram com 60 kN;
- Os padrões de falha de todas as vigas foram similares entre si. No início do ensaio, fissuras de flexão se formaram no meio do vão das vigas e gradualmente se propagaram em direção aos apoios. No final do ensaio, fissuras de flexão e cisalhamento apareceram próximas aos apoios e se propagaram ao longo da zona comprimida das vigas. E a falha das vigas foi por esmagamento da zona comprimida com ênfase nas regiões diretamente abaixo da aplicação das cargas;
- As vigas sem armadura transversal falharam por esmagamento na alma das vigas e nas vigas com armadura transversal o modo de falha se observou mais dúctil, principalmente quando somado a presença de fibras de aço. Dessa forma, o comportamento das vigas de CGP ensaiadas se assemelha ao comportamento típico de vigas de concreto a base de cimento Portland.

2.3.3 SARKER (2015)

O autor estudou o comportamento ao cisalhamento em vigas de concreto geopolimérico a base de cinzas volantes. Foram moldadas 9 vigas de CGP com comprimento de 2000 mm e seção transversal de (200 x 300) mm. A resistência a compressão variou entre 44 MPa e 56

MPa e a razão a/d adotada foi de 2,5. Duas variáveis foram estudadas: taxa de armação longitudinal (1,74% a 3,14%) e taxa de armação transversal (0,1% a 0,17%). O detalhamento de uma das vigas pode ser observado na Figura 2.8, enquanto o padrão de fissuras da viga S1-1 está ilustrado na Figura 2.9.

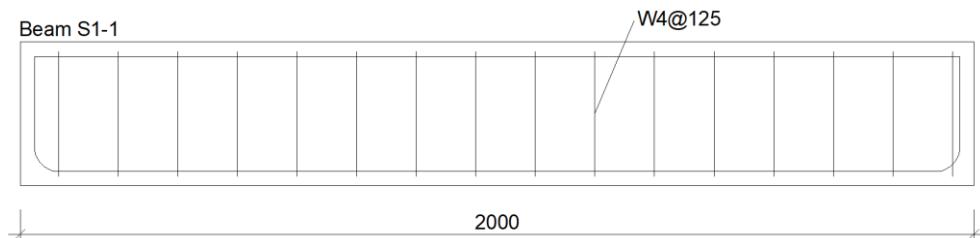


Figura 2.8 – Detalhamento de uma das vigas, SARKER (2015).

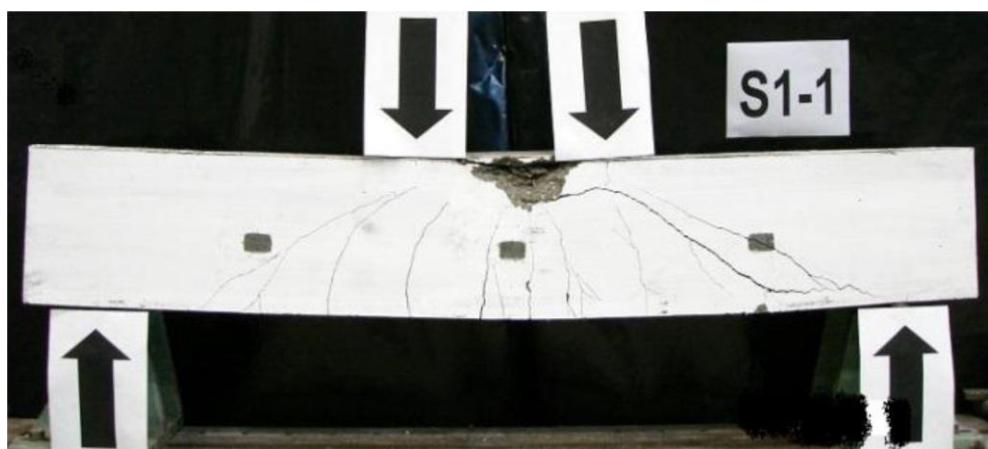


Figura 2.9 - Padrão de fissuras da viga S1-1, SARKER (2015).

Após os ensaios o autor concluiu:

- As rupturas por cisalhamento observadas são semelhantes ao de vigas de concreto a base de cimento Portland e as normas AS 3600 e ACI 318 previram resistências ao cisalhamento conservadoras para as vigas de CGP;
- O autor também estudou o comportamento de flexo-compressão em pilares de CGP e de arrancamento de barras de aço em vigas de CGP. Esses testes reforçaram a hipótese de que as normas de concreto convencional podem ser aplicadas para o concreto geopolimérico, pois a aderência e a deformação desses materiais também são aproximadas.

2.3.4 YACOB (2016)

Investigou-se o desempenho ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico a base de cinzas volantes em relação ao concreto convencional. Foram moldadas 5 vigas de CGP e 1 de concreto a base de cimento Portland. Todas as vigas tiveram vão efetivo de 2130 mm e seção transversal de (203 x 305) mm. Três variáveis foram estudadas: taxa de armação longitudinal (0,7% a 1,57%), taxa de armação transversal (espaçamento de estribos de 0 mm a 254 mm) e razão a/d (2,0 a 2,4). O detalhamento das vigas está ilustrado na Figura 2.10, o padrão de fissuras da viga sem estribo é apresentado na Figura 2.11, e o padrão de fissuras da viga com estribo pode ser visto na Figura 2.12.

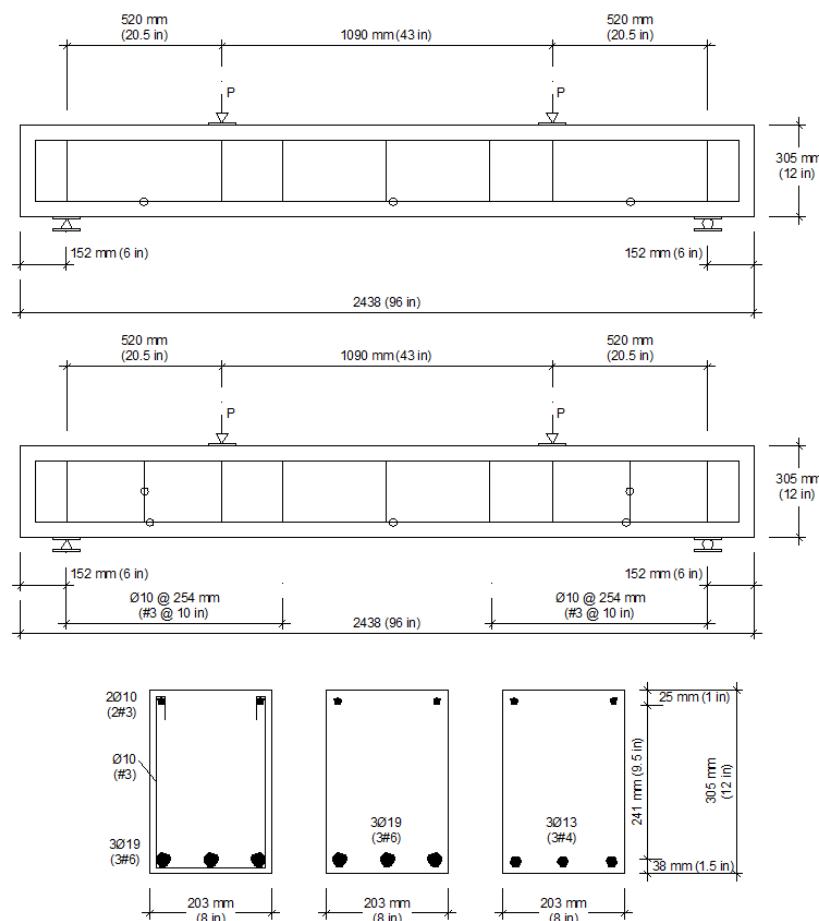


Figura 2.10 - Detalhamento das vigas, YACOB (2016).

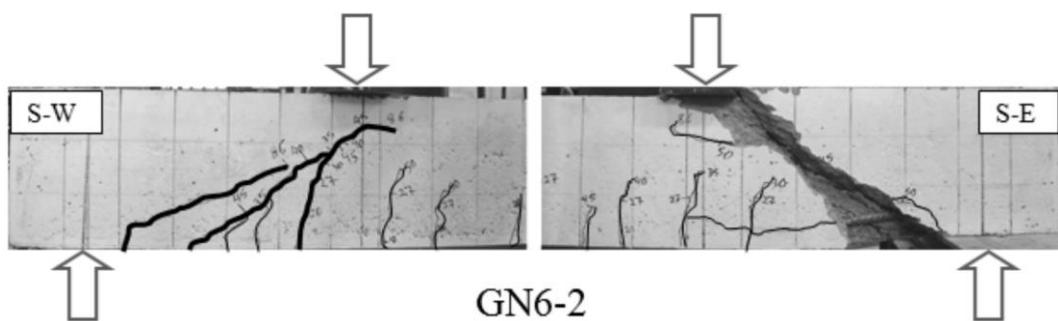


Figura 2.11 - Padrão de fissuras de viga sem estribo, YACOB (2016).

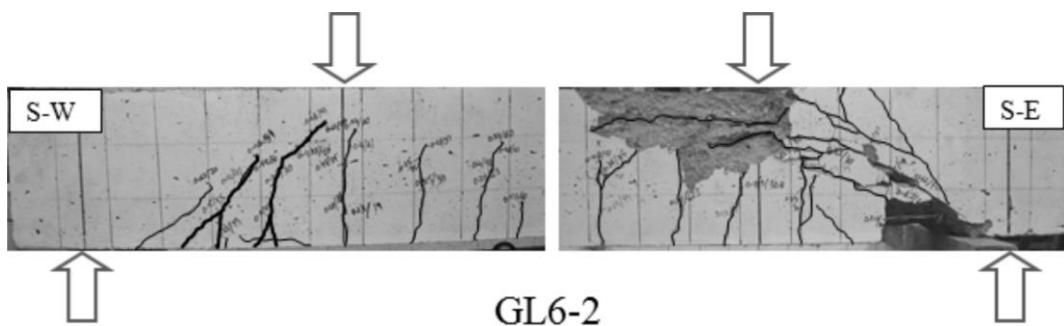


Figura 2.12 - Padrão de fissuras de viga com estribo, YACOB (2016).

Após os ensaios o autor concluiu:

- A progressão de fissuras e o comportamento carga-deformação foram idênticas entre as vigas de CGP e a viga de concreto convencional, o que implica em ductilidade similar;
- As normas CSA e AASHTO LRFD previram a resistência ao cisalhamento de forma conservadora (3,7 e 3,5 de razão entre carga experimental e carga prevista, respectivamente);
- A variação da razão a/d de 2,0 para 2,4 modificou o modo de ruptura de falha por cisalhamento para falha por flexão combinada com cisalhamento;
- A previsão da resistência da componente da armação transversal ao cisalhamento proveniente das normas de concreto convencional estudadas são igualmente aplicáveis ao CGP.

2.3.5 KUMAR (2021)

O autor estudou o comportamento ao cisalhamento em vigas de concreto geopolimérico a base de três aglomerantes: cinzas volantes, metacaulim e escória granulada de alto forno. Foram moldadas 27 vigas de CGP com comprimento de 1200 mm e seção transversal de (100 x 150) mm. A resistência a compressão do concreto considerada foi de 55 MPa. Duas variáveis foram estudadas: adição de fibras de aço (0,5% a 1%) e adição de fibras de polipropileno (0,1% a 0,25%). O detalhamento das vigas está apresentado na Figura 2.13, o sistema de ensaio utilizado é ilustrado na Figura 2.14, o padrão de fissuras da viga sem fibra de aço (TGPC) está mostrado na Figura 2.15, e o padrão de fissuras da viga com fibra de aço (HTGPC5) é apresentado na Figura 2.16.

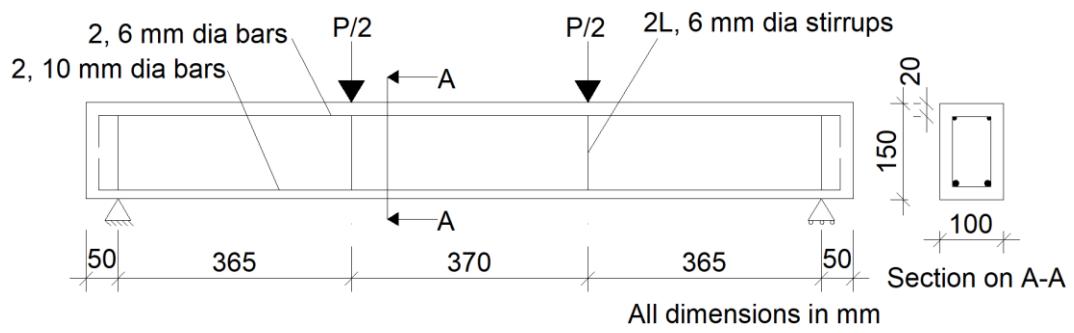


Figura 2.13 - Detalhamento das vigas, KUMAR (2021).

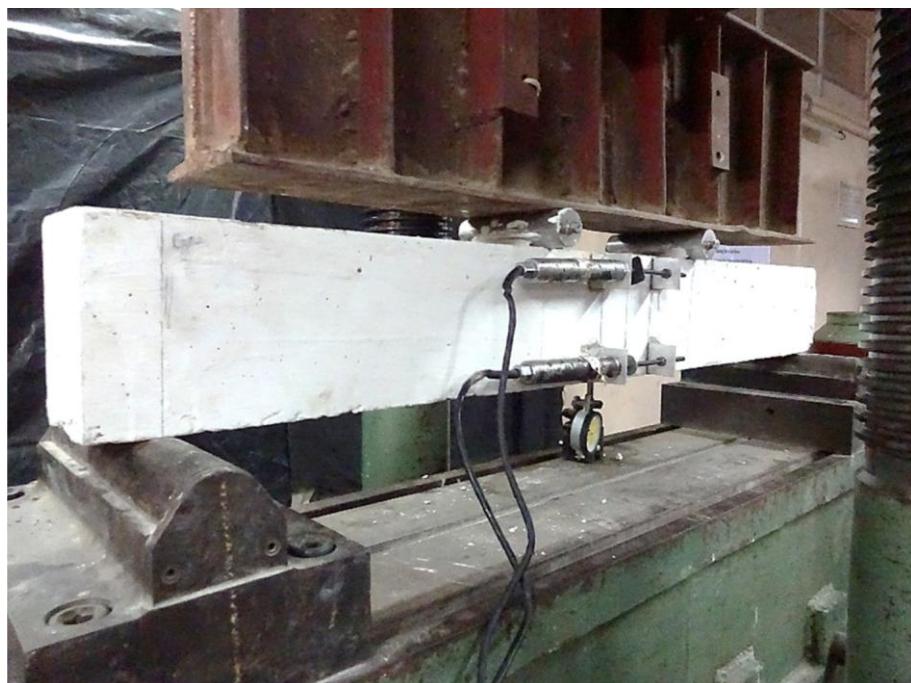


Figura 2.14 - Sistema de ensaio, KUMAR (2021).

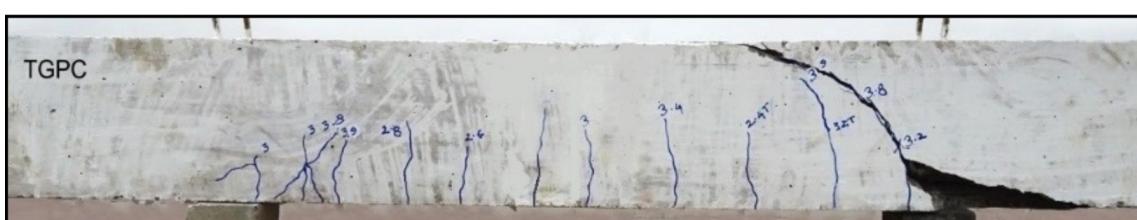


Figura 2.15 - Padrão de fissuras de viga sem fibra de aço TGPC, KUMAR (2021).



Figura 2.16 - Padrão de fissuras de viga com fibra de aço HTGPC5, KUMAR (2021).

Com base nos resultados experimentais e na análise das fissuras, o autor concluiu que:

- A adição das fibras modificou o padrão de fissuração ao cisalhamento, tornando o comportamento das vigas mais dúctil. Além disso, houve um ganho de resistência até a aparição da primeira fissura e de resistência ao cisalhamento de 85,0% e 38,5%, respectivamente, quando comparado com as vigas de CGP sem fibras. Assim, evidenciando que a preocupação com a ductilidade inferior do CGP quando comparado ao concreto convencional pode ser solucionado com adição de fibras.

2.3.6 OZTURK & ARSLAN (2022)

Investigou-se o desempenho ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico a base de escoria em relação ao concreto convencional. Foram moldadas 6 vigas de CGP com seção transversal de (150 x 210) mm e vão efetivos de 1050, 1470 e 1890 mm. A taxa de armadura longitudinal fixou-se em 1.28%. Duas variáveis foram estudadas: taxa de armadura transversal (0% a 0,67%) e a razão a/d (2,5 a 4,5). O detalhamento das vigas é apresentado na Figura 2.17, o padrão de fissuras da viga sem estribo (G25R) está ilustrado na Figura 2.18, e o padrão de fissuras da viga com estribo (G25S20) é mostrado na Figura 2.19.

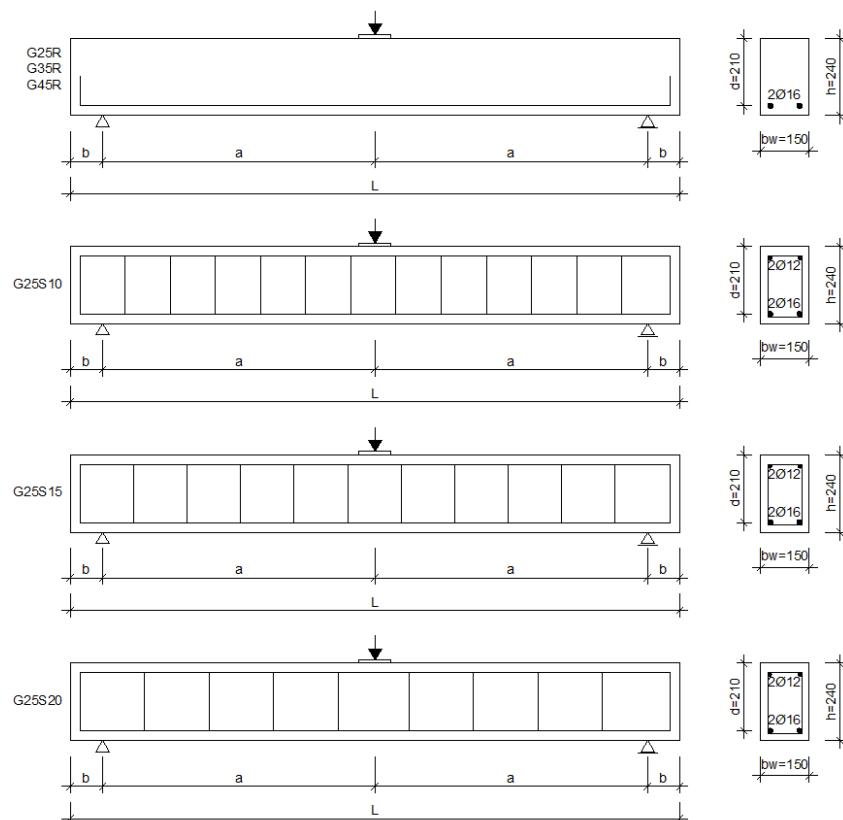


Figura 2.17 - Detalhamento das vigas, OZTURK & ARSLAN (2022).

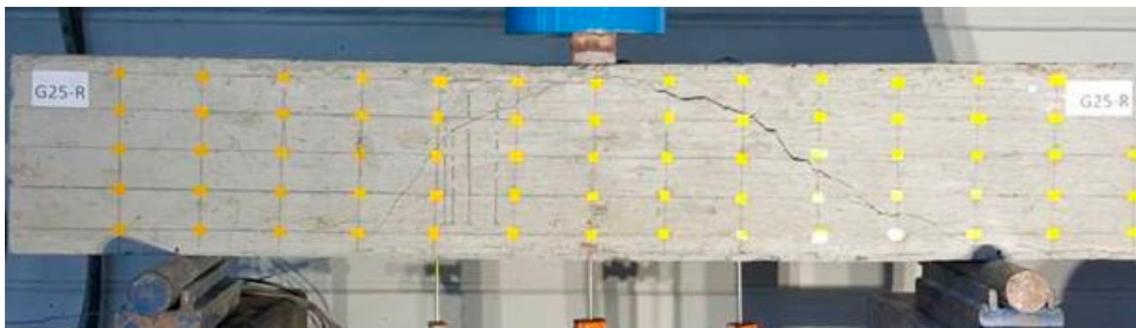


Figura 2.18 - Padrão de fissuras de viga sem estribo G25R, OZTURK & ARSLAN (2022).

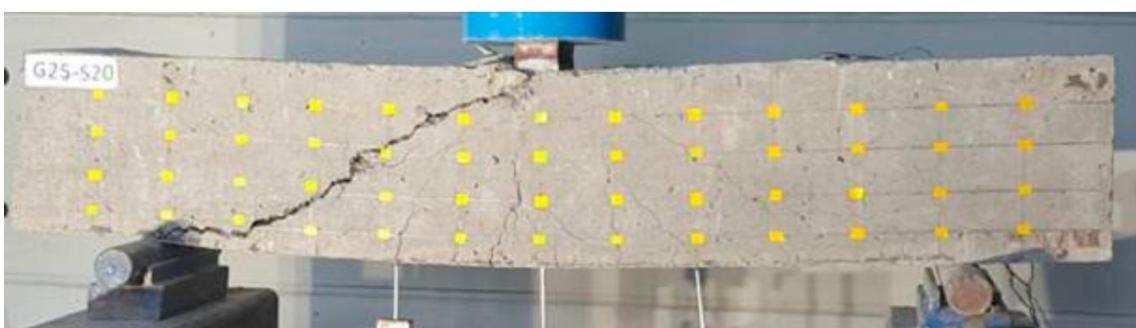


Figura 2.19 - Padrão de fissuras de viga com estribo G25S20, OZTURK & ARSLAN (2022).

Após os ensaios o autor concluiu:

- A resistência a compressão aos 3 dias e aos 7 dias chegaram em 21~59% e 71~76% da resistência aos 28 dias, respectivamente. Para o concreto a base de cimento Portland os valores usuais são 40% e 65%. Assim, o comportamento das vigas de CGP em termos de ganho de resistência apresentou similaridades significativas com o das vigas de concreto convencional, reforçando sua viabilidade estrutural.
- Em relação a energia de dissipaçāo encontradas, observou-se que as vigas que detinham maior taxa de armadura transversal tiveram maior ductilidade na ruptura. Também se constatou que modo de ruptura para as taxas de armadura transversal inferior a 0,45% foi característico de cisalhamento e acima desse valor obteve-se ruptura característica de flexão. Ambos os comportamentos são semelhantes ao comportamento de vigas de concreto convencional.

2.3.7 AZEVEDO (2023)

A pesquisa conduzida por Eloisa (2023) analisou o comportamento da ligação laje-pilar em lajes lisas de concreto geopolimérico reforçadas com fibras de aço e avaliou a viabilidade do uso de agregado graúdo sintético proveniente de resíduos de bauxita nesses elementos

estruturais. O estudo teve como objetivo compreender melhor as características mecânicas do concreto geopolimérico e investigar sua aplicação prática em estruturas, comparando os resultados experimentais com prescrições de códigos normativos e modelos teóricos desenvolvidos para concreto convencional. Foram confeccionadas e ensaiadas oito lajes lisas com dimensões de 1400 x 1400 x 120 mm, mantendo uma taxa de armadura de flexão de aproximadamente 1%. Na Figura 2.20 são apresentadas as dimensões da laje e na Figura 2.21, o esquema de ensaio.

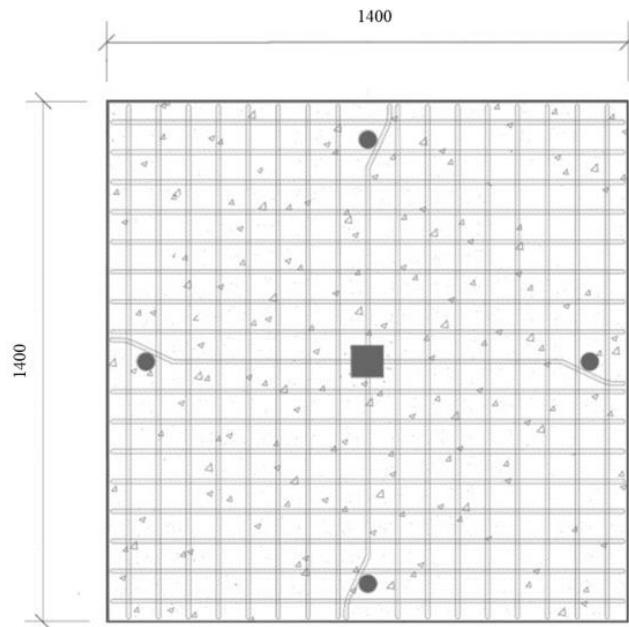


Figura 2.20 – Dimensão das lajes, AZEVEDO (2023)

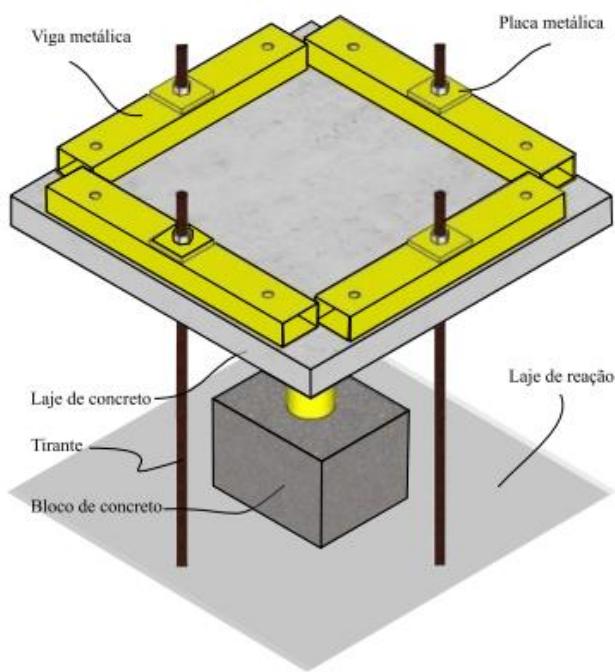


Figura 2.21 – Esquema de ensaio, AZEVEDO (2023)

As principais conclusões do trabalho podem ser sintetizadas nos seguintes pontos:

- As fibras de aço aumentaram a resistência ao punctionamento das lajes, conferiram maior ductilidade, especialmente em lajes de concreto geopolimérico, e permitiram um acréscimo de carga de até 36%.
- As lajes com agregado sintético de resíduo de bauxita apresentaram comportamento e cargas de ruptura semelhantes às de concreto convencional, mas com fissuração mais intensa e rupturas mais bruscas.
- O concreto geopolimérico demonstrou maior ductilidade em comparação ao concreto convencional, principalmente em modelos reforçados com fibras, exibindo comportamento hardening.
- As lajes reforçadas com fibras apresentaram menor nível de fissuração, enquanto as lajes sem fibras mostraram fissuras mais intensas e rupturas menos controladas. A fissuração das lajes com agregado sintético foi mais extensa, exceto em casos específicos com fibras, como o modelo SGRMF.
- As deformações no concreto das lajes geopoliméricas ficaram dentro do regime elástico, com valores menores em relação às lajes de cimento Portland. As lajes reforçadas com fibras apresentaram melhores resultados nas deformações centrais das armaduras.
- As lajes geopoliméricas com fibras apresentaram tensões residuais superiores às lajes de concreto convencional, mostrando maior resistência e estabilidade após o pico de carga.
- As normas de concreto convencional, como a NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (2019) e EUROCODE 2 (2004), apresentaram resultados satisfatórios e seguros para estimar o comportamento das lajes de concreto geopolimérico.

2.4 ESTIMATIVAS NORMATIVAS

As principais normas estruturais adotam modelos baseados na treliça para estimar a resistência ao cisalhamento em vigas. Esta seção apresenta os principais critérios das normas NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (ACI, 2019) e EUROCODE 2 (EC, 2023), com foco em suas premissas e aplicabilidade. Embora as normas apresentem abordagens distintas para a resistência ao cisalhamento, todas elas são amplamente aplicáveis a elementos de concreto convencional.

2.4.1 NBR 6118 (ABNT, 2023)

A NBR 6118 (ABNT, 2023) segue as premissas da treliça generalizada e admite dois modelos de cálculo: I e II. O Modelo I é indicado para situações em que o comportamento estrutural é dominado pela resistência do concreto e da armadura transversal, enquanto o Modelo II oferece maior flexibilidade para elementos com configurações geométricas ou condições de carregamento mais complexas. Em ambos os modelos o ângulo de inclinação da armadura transversal (α) pode assumir valores entre 45° e 90° . O modelo I consiste em diagonais de compressão com inclinação de 45° em relação ao eixo longitudinal e admite a parcela dos mecanismos complementares de resistência (V_c) tenha valor constante e independente da solicitação de cálculo (V_{Sd}). Já o modelo II admite diagonais de compressão inclinadas em relação ao eixo longitudinal com ângulo variável entre 30° e 45° e estabelece que a parcela complementar V_c sofra redução com o aumento de V_{Sd} . Para garantir a resistência aos esforços cisalhantes o elemento estrutural deve atender a duas condições:

- Condição de resistência à compressão diagonal do concreto:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (2.2)$$

- Condição de resistência da armadura transversal:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (2.3)$$

Onde:

V_{Sd} – Força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd2} – Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

V_{Rd3} – Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;

V_c – Parcada de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça;

V_{sw} – Parcada resistida pela armadura transversal.

Ambos os modelos de cálculo adotados pela NBR 6118 (ABNT, 2023) utilizam a Equação 2.4 para determinar o valor de V_{Rd2} :

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \operatorname{sen}^2 \theta \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \quad (2.4)$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (2.5)$$

A Equação 2.6 determina a resistência ao cisalhamento da armadura transversal:

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cot\alpha + \cot\theta) \cdot \operatorname{sen}\alpha \quad (2.6)$$

Já a resistência dos mecanismos complementares do modelo da treliça (V_c) é definido diferentemente entre os modelos de cálculo:

Modelo I:

$V_c = 0$ – Linha neutra situada fora da seção;

$V_c = V_{c0}$.

Modelo II:

$V_c = 0$ – Linha neutra situada fora da seção;

$V_c = V_{cl}$ – Linha neutra cortando a seção;

$V_{cl} = V_{c0}$ – Quando $V_{sd} \leq V_{c0}$;

$V_{cl} = 0$ – Quando $V_{sd} = V_{c0}$, interpolando linearmente para valores intermediários.

O valor de V_{c0} pode ser obtido por meio da Equação 2.7:

$$V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (2.7)$$

Onde:

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \cdot f_{ctm}}{\gamma_c} \quad (2.8)$$

2.4.2 ACI 318 (ACI, 2019)

A norma americana ACI 318 (ACI, 2019) considera que a resistência ao cisalhamento de uma viga é composta pela contribuição do concreto e da armadura transversal. A equação para determinar a resistência é expressa como:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.9)$$

Onde:

V_c – Parcada de resistência ao esforço cortante atribuída ao concreto;

V_s – Parcada de resistência ao esforço cortante atribuída a armadura transversal;

Para elementos sem protensão e com força axial desprezível a parcada V_c pode ser calculado pela Equação 2.10:

$$V_c = 0,17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.10)$$

Onde:

λ – Fator de redução para concretos leves, para concretos tradicionais esse valor é 1;

f_c – Tensão resistente característica do concreto, limitado em 68.9 MPa.

A solicitação última de cortante deve atender ao seguinte critério:

$$V_u \leq \varphi \cdot (V_c + 0,066 \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d) \quad (2.11)$$

Onde:

φ – Fator de redução de resistência do concreto. No caso de resistência ao cisalhamento seu valor é 0.75.

O modelo de treliça clássica é utilizado no cálculo da parcada de resistência ao cortante do aço (V_s) que pode ser calculada por:

$$V_s = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot (\sin\alpha + \cos\alpha) \cdot d}{s} \quad (2.12)$$

2.4.3 EUROCODE 2 (EN, 2023)

Essa norma é utilizada em diversos países da Europa. O modelo de cálculo dessa norma se baseia no modelo de treliça com ângulo de inclinação da biela variável.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw} \cdot Z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta}{s} \quad (2.13)$$

Onde:

Z – Braço de alavanca, usualmente adotado como 0,9d;

A resistência ao cisalhamento do elemento é ainda limitada pela expressão:

$$V_{Rd,\max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{(\cot\theta + \tan\theta)} \quad (2.14)$$

$$1 \leq \cot\theta \leq 2,5 \quad (2.15)$$

Onde:

α_{cw} – Coeficiente que leva em consideração os efeitos de protensão. Para vigas não protendidas essa grandeza é igual a 1;

v_1 – Fator de redução da resistência do concreto ao cisalhamento. Para concretos com f_c menor ou igual a 60 MPa, v_1 é igual a 0,6.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

O objeto de estudo foram quatro vigas, duas de concreto convencional (V_{CC1} e V_{CC2}) e duas de concreto geopolimérico (V_{CG1} e V_{CG2}). A fim de estudar o comportamento sob esforço cisalhante, variou-se a taxa de armadura transversal. As vigas possuem comprimento total de 1500 mm, vão efetivo de 1300 mm, 200 mm de altura, 120 mm de base e friso de 15 mm, totalizando 90 mm de largura efetiva na região. A relação entre a altura (a) e a largura (d) das vigas foi determinada com base no ângulo de 30º escolhido, o que influenciou o dimensionamento da viga, considerando a geometria e os esforços atuantes. O friso foi projetado para criar uma "falha planejada", promovendo a concentração das tensões cortantes e auxiliando na análise do comportamento da viga sob cisalhamento.

Para a armadura longitudinal foram utilizados vergalhões de aço classe CA-50 ($f_{yk} = 500$ MPa) de diâmetro 16 mm, e para a armadura transversal foi utilizado vergalhões de aço classe CA-60 ($f_{ywk} = 600$ MPa) de diâmetro 5 mm. A taxa de armadura longitudinal foi fixada em 1,89% a fim de evitar a ruptura a flexão, uma vez que o foco do estudo foi o estado limite último ao cisalhamento. Por se tratar de vigas com dimensões reduzidas o cobrimento da armadura adotado foi de 20 mm nas faces superior e inferior e 10 mm nas laterais na região do friso. As características dessas vigas estão detalhadas na Tabela 3.1. Nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 são apresentados as vistas e o detalhamento das vigas.

Tabela 3.1 - Características das Vigas

Viga	b_w (mm)	b_{friso} (mm)	h (mm)	L (mm)	d (mm)	a/d	θ	ρ_l (%)	ρ_w (%)
V_{CC1}									0,2
V_{CC2}									0,6
V_{CG1}	120	90	200	1300	177	1,73	30º	1,89	0,2
V_{CG2}									0,6

Onde:

b_w – Largura da viga;

b_{friso} – Largura efetiva da viga na região do friso;

h – Altura da viga;

L – Vão livre da viga;

d – Altura útil da viga;

a/d – Razão entre a distância da aplicação da carga ao apoio mais próximo e a altura útil;

θ – Ângulo da biela de concreto e friso;

ρ_l – Taxa de armadura longitudinal;

ρ_w – Taxa de armadura transversal.

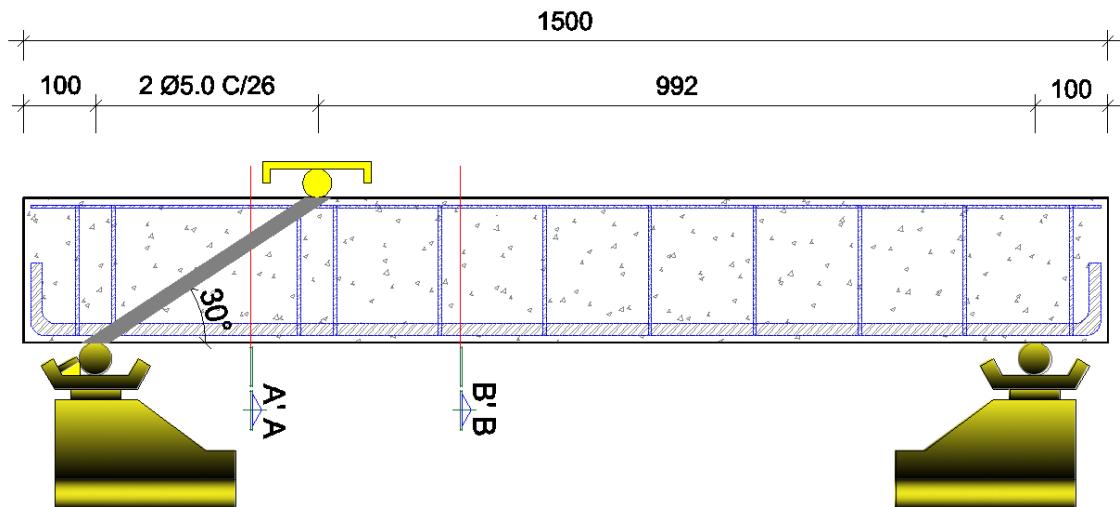


Figura 3.1 - Corte longitudinal das vigas V_{CCI} e V_{CGI} .

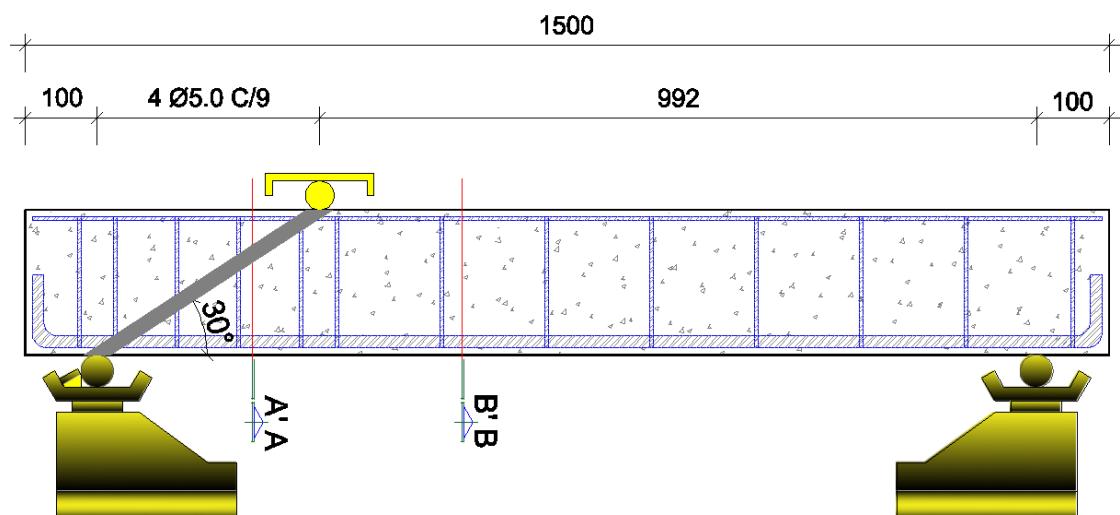


Figura 3.2 - Corte longitudinal das vigas V_{CC2} e V_{CG2} .

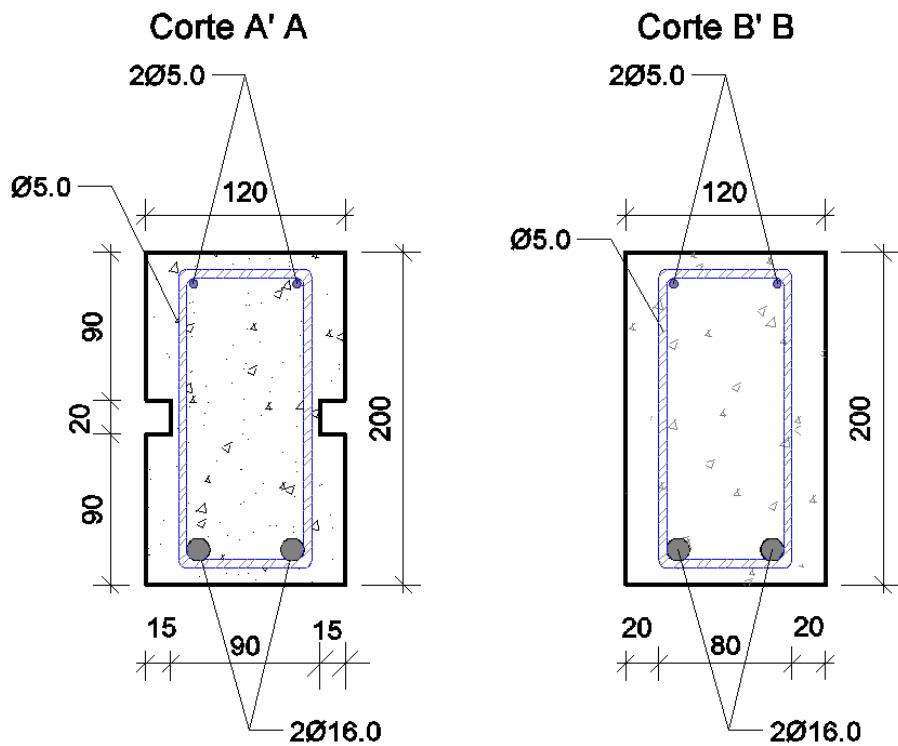


Figura 3.3 - Cortes transversais das vigas VCC1, VCC2, VCG1 e VCG2.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Concreto

O concreto utilizado foi dosado e confeccionado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Para o concreto geopolimérico utilizou-se metacaulim industrializado como precursor para a produção do concreto geopolimérico, com perda ao fogo estabelecida a 1020°C por 2 horas, ativado por silicato de sódio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sódio (NaOH). A proporção entre os componentes foi ajustada com base em estudos preliminares. A seleção do metacaulim como precursor baseou-se em suas propriedades pozolânicas e pela disponibilidade como rejeito industrial local. As principais justificativas para sua escolha incluem sua elevada área de superfície específica e estrutura amorfa, facilitando a reação com ativadores alcalinos, além da baixa permeabilidade da matriz formada e da menor emissão de CO_2 em comparação com o cimento Portland. A composição química do metacaulim, conforme detalhado na Tabela 3.2, é composta por mais de 90% de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), o que é característico de um alumino-silicato. Este conteúdo elevado de silício e alumínio é considerado ideal para a formação de geopolímeros, visto que esses dois óxidos são fundamentais para a reação com ativadores alcalinos, formando uma estrutura sólida e resistente.

Tabela 3.2 - Composição química do Metacaulim.

Composição	Sigla	% em massa
Dióxido de Silício	SiO ₂	58,0
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	32,8
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	2,19
Óxido de Potássio	K ₂ O	1,46
Dióxido de Titânio	TiO ₂	1,43
Óxido de Magnésio	MgO	0,24
Pentóxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0,11
Óxido de Sódio	Na ₂ O	0,1
Dióxido de Manganês	MnO	< 0,1
Óxido de Cálcio	CaO	< 0,1
Perda ao Fogo	PF	2,62

A solução ativadora foi composta por silicato de sódio (Na₂SiO₃) e hidróxido de sódio (NaOH) com 99% de pureza. O Na₂SiO₃ fornece os íons de silicato necessários para a formação de ligações de aluminossilicato, enquanto o NaOH eleva o pH da mistura, facilitando a dissolução do metacaulim e a liberação de íons de alumínio e silício. A combinação de Na₂SiO₃ e NaOH permite um controle preciso da reatividade do sistema geopolimérico, com proporções e concentrações ajustáveis para otimizar as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade do concreto. A dosagem do concreto geopolimérico se encontra na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dosagem do Concreto Geopolimérico.

Concreto Geopolimérico						
Metacaulim (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH (kg)	Quantidade (L)
108,22	162,33	270,55	10,82	28,49	58,08	250

O cimento utilizado foi o CP II-E, composto predominantemente por clínquer com adição de gesso para controle do tempo de pega, sem adições minerais como escória, pozolana ou filer calcário. O CP II-E contém altos teores de CaO (óxido de cálcio) e SiO₂ (dióxido de silício) e baixos teores de álcalis (Na₂O e K₂O), reduzindo o risco de reações álcali-agregado. A dosagem do concreto convencional se encontra na Tabela 3.4. Os agregados utilizados incluíram areia fina, com massa específica de 2,64 g/cm³, e brita 0, com diâmetro máximo de 9,5 mm e massa específica de 2,67 g/cm³.

Tabela 3.4 - Dosagem do Concreto Convencional

Concreto Convencional				
Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Quantidade (L)
108,22	162,33	270,55	58,44	250

As proporções das misturas de concreto geopolimérico e convencional foram definidas com base em ensaios preliminares. O processo de mistura envolveu a combinação dos componentes secos (metacaulim ou cimento Portland e agregados) em uma betoneira, seguida pela adição gradual da solução alcalina e água para o concreto geopolimérico, e da água para o concreto convencional. A mistura foi mantida contínua até a obtenção de uma consistência homogênea. A mistura foi realizada a uma velocidade constante de 20 rpm, garantindo a homogeneidade do concreto. O tempo total de mistura foi de aproximadamente 10 minutos, distribuído da seguinte forma: nos primeiros 3 minutos, ocorreu a mistura inicial do metacaulim com a solução alcalina, assegurando a completa dispersão do metacaulim e a ativação inicial. Nos 4 minutos subsequentes, a areia e a brita foram adicionadas gradualmente, permitindo a incorporação uniforme dos agregados na matriz geopolimérica. Nos últimos 3 minutos, a água foi adicionada lentamente, ajustando a trabalhabilidade da mistura e garantindo uma hidratação homogênea. O controle da homogeneidade da mistura foi realizado visualmente durante todo o processo e, quando necessário, foram retiradas amostras para verificar a consistência e a ausência de segregação dos componentes. A adição do hidróxido de sódio e do silicato de sódio foi realizada com o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) adequados devido à natureza corrosiva desses materiais.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 x 200 mm (diâmetro x altura) visando garantir maior uniformidade e consistência nos resultados dos ensaios. Vale ressaltar que as propriedades mecânicas dos corpos de prova utilizados foram determinadas experimentalmente, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), por meio de corpos de prova cilíndricos moldados e curados de acordo com a norma. Cada viga foi submetida a três corpos de prova para cada tipo de ensaio: compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade. Estes ensaios são amplamente empregados tanto para concretos convencionais quanto para geopoliméricos, sendo fundamentais para a caracterização mecânica do material, oferecendo uma visão detalhada de suas propriedades de resistência à compressão, tração e rigidez.

O ensaio de compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), é utilizado para determinar a resistência à compressão do concreto. Ele é realizado com corpos de prova cilíndricos após o período de cura, utilizando uma prensa hidráulica para aplicar uma carga axial crescente até a ruptura do corpo de prova. O principal objetivo desse ensaio é determinar a resistência característica à compressão do concreto, um parâmetro fundamental para a avaliação do desempenho mecânico do material.

O ensaio de compressão diametral, também conhecido como ensaio de tração por compressão diametral, é regulamentado pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Este ensaio visa medir a resistência à tração indireta do concreto. O corpo de prova cilíndrico é posicionado horizontalmente na prensa, de forma que a carga é aplicada ao longo do diâmetro do cilindro. A carga gerada resulta em tensões de tração perpendicularmente ao plano de aplicação da carga, causando a ruptura do material por tração.

Já o ensaio de módulo de elasticidade, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008), é utilizado para calcular o módulo estático de elasticidade do concreto, que expressa a relação entre tensões e deformações elásticas. Esse parâmetro é crucial para avaliar a rigidez do concreto e sua capacidade de deformação sob carga. O ensaio é realizado com corpos de prova cilíndricos submetidos a cargas crescentes, sendo que a deformação axial resultante é medida por meio de extensômetros. Os três ensaios são apresentados na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Ensaios de propriedades mecânicas do concreto

O ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) foi realizado para verificar a consistência do concreto fresco. Para o concreto geopolimérico, o abatimento foi de 200 mm, indicando alta trabalhabilidade. Para o concreto convencional, o abatimento foi de 100 mm, representando uma boa trabalhabilidade, embora ligeiramente inferior ao concreto geopolimérico.

3.2.2 Aço

Os ensaios para caracterização dos aços empregados foram realizados de acordo com as normas especificadas pela NBR 6152 (ABNT, 1992) para se obter os valores do módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura à tração. Para as bitolas de 5,0 mm (CA-60) e 16,0 mm (CA-50), os testes foram conduzidos em grupos de três espécimes, com o intuito de avaliar as principais propriedades mecânicas do material, incluindo o módulo de elasticidade, a tensão de escoamento e a tensão de ruptura por tração. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA), utilizando uma máquina universal de ensaios. Essa máquina é projetada para aplicar forças de tração sobre os espécimes, enquanto as deformações são monitoradas por extensômetros mecânicos, que asseguram a precisão nas medições do alongamento do material.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação das vigas seguiu o padrão ilustrado na Figura 3.5. Nessa figura, o extensômetro de resistência elétrica do concreto é representado por EERc e o extensômetro do aço por EERs. Os extensômetros elétricos foram utilizados para medir deformações no aço e no concreto, enquanto os deflectômetros registraram os deslocamentos em pontos críticos da viga, permitindo uma análise detalhada do comportamento estrutural. Em cada viga, foram instalados um extensômetro no concreto, um na armadura longitudinal e um na armadura transversal, com o objetivo de monitorar as deformações nesses pontos específicos através de um sistema de aquisição de dados. Este sistema permitiu o acompanhamento do comportamento das vigas em seu estado limite último, em pontos onde, teoricamente, ocorrem as tensões máximas de flexão e cisalhamento. Para medir os deslocamentos, foram posicionados dois deflectômetros digitais: um na face externa inferior da viga, a meio vão, e outro na direção do ponto de aplicação da carga. Esses instrumentos possibilitaram a obtenção de dados sobre as deformações e deslocamentos das vigas durante os ensaios.

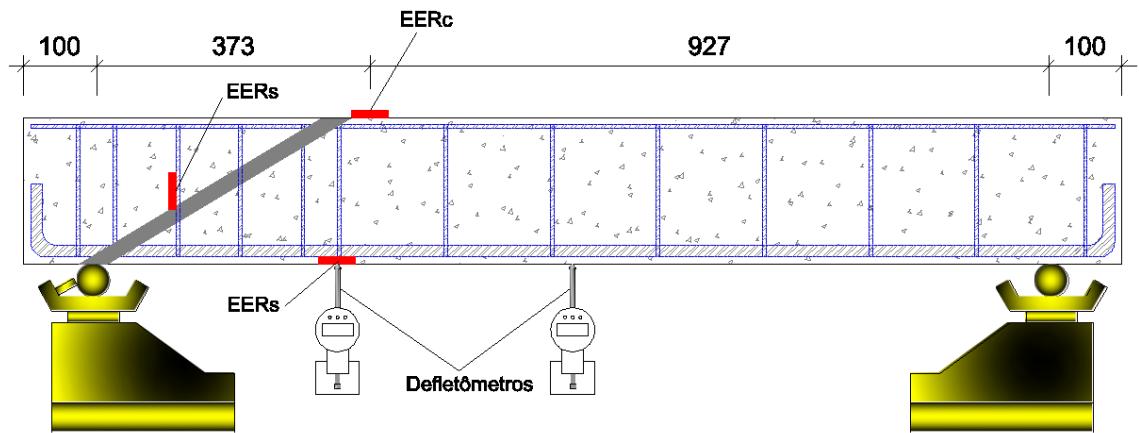


Figura 3.5 - Instrumentação das vigas

O monitoramento das deformações nas armaduras de cisalhamento e flexão foi realizado utilizando extensômetros elétricos de resistência (EER) da marca Excel Sensores, modelo PA-06-125AA-120L, com grelha de dimensões $3,18 \times 3,18 \text{ mm}^2$. Esses dispositivos foram fixados na superfície lateral das barras de aço utilizando cola de cianoacrilato, conforme ilustrado nas Figura 3.6 e 3.7. Os contatos elétricos foram soldados em dois fios de cobre com estanho, e o sistema foi então protegido com araldite (cola epoxídica) e coberto com fita de auto fusão, garantindo isolamento contra o ambiente alcalino do concreto. Para evitar qualquer movimentação dos fios durante os ensaios, braçadeiras elásticas foram aplicadas, assegurando que as leituras das deformações não fossem afetadas por interferências externas e permitindo uma medição precisa do comportamento elasto-plástico da peça.



Figura 3.6 – Extensômetros elétricos de resistência na armadura longitudinal



Figura 3.7 - Extensômetros elétricos de resistência na armadura transversal

As deformações longitudinais no concreto foram medidas com extensômetros elétricos de resistência (EER) também da Excel Sensores, modelo PA-06-201BA-120L, com grelha de 51,1 x 2,03 mm². Esses extensômetros foram fixados na superfície superior do concreto, próximo ao ponto de aplicação da carga, conforme mostrado na Figura 3.8. Antes da instalação dos extensômetros, a área de contato foi cuidadosamente regularizada, e uma camada de araldite foi aplicada, secando por 20 minutos. Após esse tempo, os extensômetros foram fixados de forma definitiva com cola de cianoacrilato. Os contatos elétricos também foram soldados com estanho em fios de cobre, facilitando a conexão ao sistema de aquisição de dados para o monitoramento contínuo das deformações.



Figura 3.8 - Extensômetro elétrico de resistência no concreto

As vigas foram moldadas em formas de madeira compensada com 10 mm de espessura, medindo 1500 x 200 x 120 mm, com um vão livre de 1300 mm, deixando 100 mm em cada lado para as condições de apoios (Figura 3.11). Em todas as formas foram aplicados desmoldantes para facilitar a desforma após a cura do concreto. As armaduras foram posicionadas conforme o detalhamento das vigas, como mostrado nas Figuras 3.9 e 3.10. A mistura de concreto foi inserida nas formas em camadas, com adensamento mecânico entre as camadas para evitar a formação de bolhas de ar (Figuras 3.12 e 3.14). As vigas de concreto geopolimérico e convencional foram curadas por 7 dias, sendo os resultados das vigas após a cura ilustrados nas Figuras 3.13 e 3.15.



Figura 3.9 - Armação das vigas V_{CC1} e V_{CG1} .



Figura 3.10 - Armação das vigas V_{CC2} e V_{CG2} .



Figura 3.11 - Forma das vigas.



Figura 3.12 - Concretagem das vigas V_{CC1} e V_{CC2} .



Figura 3.13 - Vigas V_{CC1} e V_{CC2} após cura.



Figura 3.14 - Concretagem das vigas V_{CG1} e V_{CG2} .



Figura 3.15 - Vigas V_{CG1} e V_{CG2} após cura.

3.4 SISTEMA DE ENSAIO

O ensaio de flexão em três pontos consiste em uma viga biapoiada submetida a uma única carga pontual aplicada no centro da viga. Durante o ensaio, a força aplicada (P) é aumentada gradativamente até a ruptura da viga, permitindo o estudo do comportamento da viga sob flexão. No ponto de aplicação da carga, ocorre o máximo momento fletor e o máximo esforço cortante, concentrando as maiores tensões. Nas extremidades da viga, onde ocorrem os

apoios, o esforço cortante é elevado, mas o momento fletor é nulo. A Figura 3.16 ilustra o diagrama de momentos fletores e esforços cortantes resultantes do ensaio.

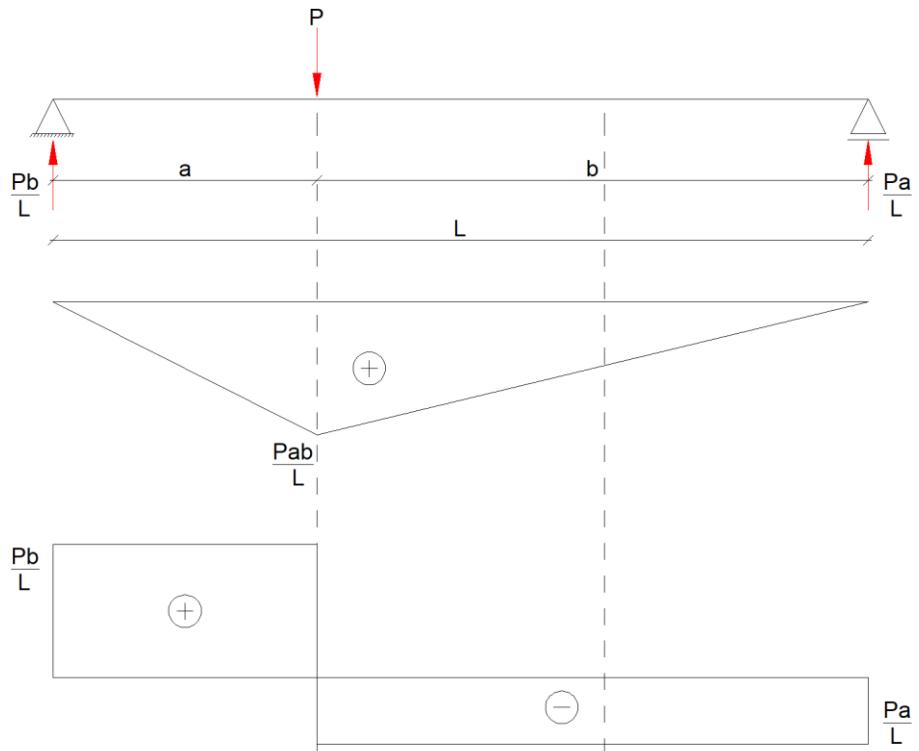


Figura 3.16 - Diagrama de corpo livre do ensaio de flexão em três pontos.

No primeiro estágio de carregamento a viga não apresenta fissuras pois o concreto da zona de tração da seção da viga ainda não atingiu a tensão característica de ruptura a tração (f_{ctk}). Com o aumento do carregamento, a tensão f_{ctk} é atingida no trecho central e as primeiras fissuras verticais começam a aparecer se estendendo até pouco abaixo da linha neutra. Nesta fase os esforços de tração são absorvidos pela armadura. Próximo aos apoios as fissuras são inclinadas devido as tensões cisalhantes.

De acordo com a Figura 4.1, que ilustra o diagrama de corpo livre do ensaio, determina-se a carga teórica de ruptura por cisalhamento (V_{NBR} , V_{ACI} , V_{EC}) pela equação 3.1. O valor de carga limite (P) varia conforme as normas adotadas: NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (ACI, 2019) e EUROCODE 2 (EN, 2023).

$$V_{NBR}, V_{ACI}, V_{EC} = P \cdot \frac{L}{b} \quad (3.1)$$

A deformação limite da armadura de flexão (ε_{ys}) foi definida em 2,5%, enquanto a deformação limite do concreto (ε_c) foi considerada como 3,5%. A partir desses parâmetros determina-se a posição da linha neutra (x). Para assegurar que a ruptura ocorresse por cisalhamento, adotou-se uma taxa de armadura de aço adequada (ρ_l) para que a força de ruptura por flexão (P_{flex}) fosse superior à carga de cisalhamento normativa. Com essa condição, foi obtida uma taxa de armadura longitudinal de 1,89%, conforme as equações 3.2 a 3.5.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{ys}} \quad (3.2)$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \quad (3.3)$$

$$M_u = A_s \cdot f_y \cdot d \quad (3.4)$$

$$P_{flex} = \frac{M_u \cdot L}{a \cdot b} \quad (3.5)$$

Onde:

M_u – Momento fletor de ruptura;

f_y – Tensão de escoamento do aço adotado.

As Tabelas 3.5 e 3.6, apresentadas a seguir, ilustram as previsões normativas e o modo de ruptura estimado, respectivamente. Observa-se que o V_{EC} tem maior variabilidade por conta de que no seu método de cálculo a resistência ao cisalhamento é o menor valor entre a parcela de resistência do estribo e do concreto, enquanto o V_{NBR} e V_{ACI} adotam a soma de tais parcelas.

Tabela 3.5 - Previsões normativas

Viga	P_{flex} (kN)	V_{NBR} (kN)	V_{ACI} (kN)	V_{EC} (kN)
V _{CC1}		48,7	47,0	33,6
V _{CC2}		97,6	98,6	100,8
V _{CG1}	121,5	49,8	47,7	33,6
V _{CG2}		101,4	101,1	100,8

Tabela 3.6 - Modo de ruptura estimado

Viga	P_{flex} (kN)	V_{NBR}/P_{flex}	V_{ACI}/P_{flex}	V_{EC}/P_{flex}	Modo de ruptura estimado
V _{CC1}	121,5	0,40	0,39	0,28	Cisalhamento
V _{CC2}		0,80	0,81	0,83	
V _{CG1}		0,41	0,39	0,28	
V _{CG2}		0,83	0,83	0,83	

Para os ensaios, as vigas foram apoiadas por blocos metálicos, simulando um sistema isostático com apoios de primeiro e segundo gênero. O carregamento pontual foi aplicado por um cilindro hidráulico com capacidade de 1000 kN e precisão de 0,5 kN. Para monitorar as cargas, utilizou-se uma célula de carga acoplada ao cilindro hidráulico, permitindo a aferição dos passos de carga através de um visor controlado por um atuador hidráulico manual. As vigas foram submetidas a um carregamento pontual perpendicular ao seu eixo longitudinal, iniciando com uma carga inicial de 1 kN para estabilização. O funcionamento dos extensômetros foi verificado antes da aplicação do pré carregamento. Cada aplicação de carga foi monitorada por um relógio digital acoplado à célula de carga, prosseguindo até o colapso da viga, conforme ilustrado nas Figuras 3.17 e 3.18. As leituras de deformação foram obtidas utilizando o sistema modular de aquisição de dados ALMEMO® 5690-2M da Ahlborn, em conjunto com o software AMR WinControl. Leituras dos extensômetros posicionados nos aços e concreto foram realizadas. Os intervalos para aplicação do carregamento, coleta de dados, leitura dos extensômetros, deflectômetro e mapeamento das fissuras foram fixados em 5 kN, visando obter um número mínimo de 20 leituras para representar adequadamente o comportamento da viga.

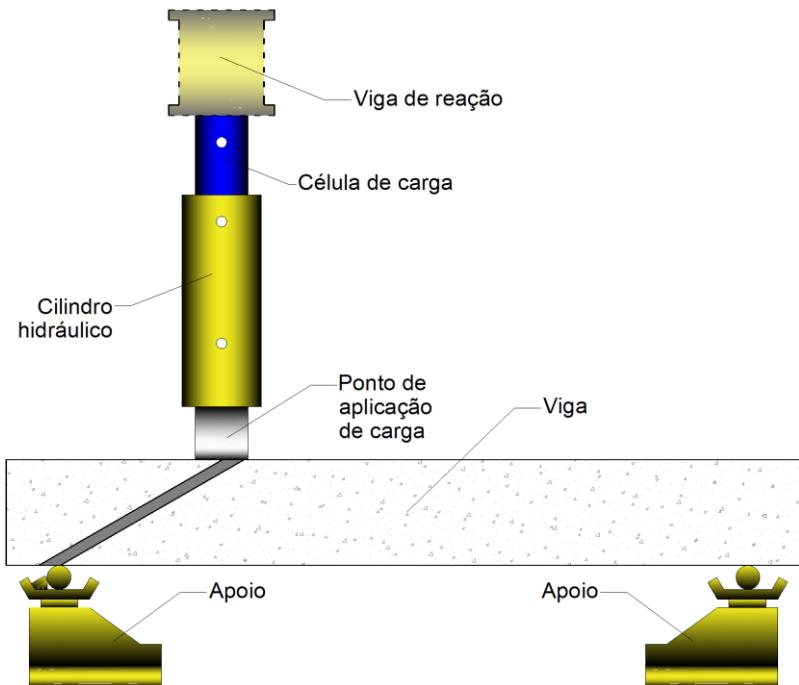


Figura 3.17 - Vista lateral do esquema de ensaio.

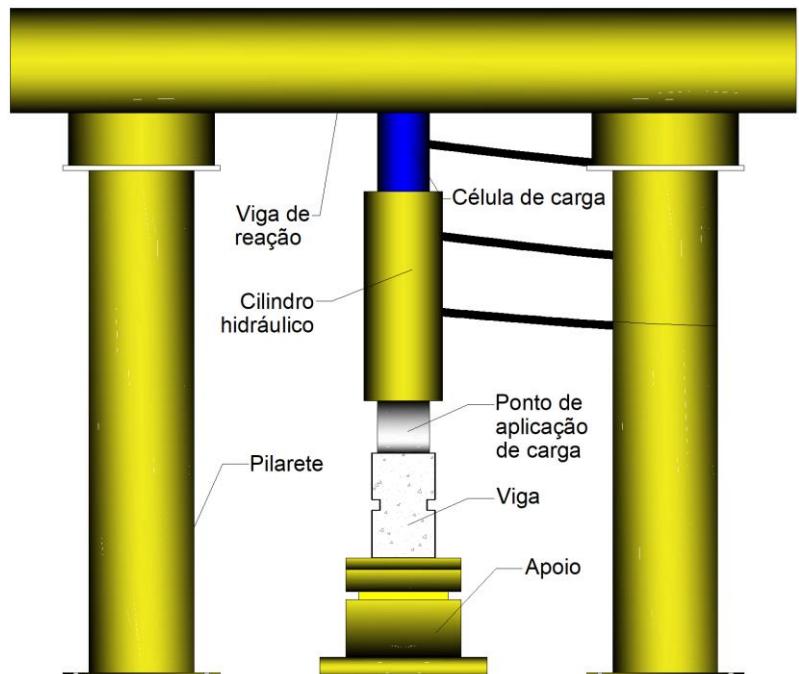


Figura 3.18 - Vista lateral do esquema de ensaio.

Nas Figuras 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22 estão as representações das quatro vigas. O programa experimental incluiu as seguintes etapas: preparação dos materiais, moldagem e cura das vigas, realização dos ensaios, e análise dos dados. O controle de qualidade foi garantido por meio da calibração dos equipamentos de medição e verificação das condições dos materiais.



Figura 3.19 - Programa experimental da viga V_{CC1}.

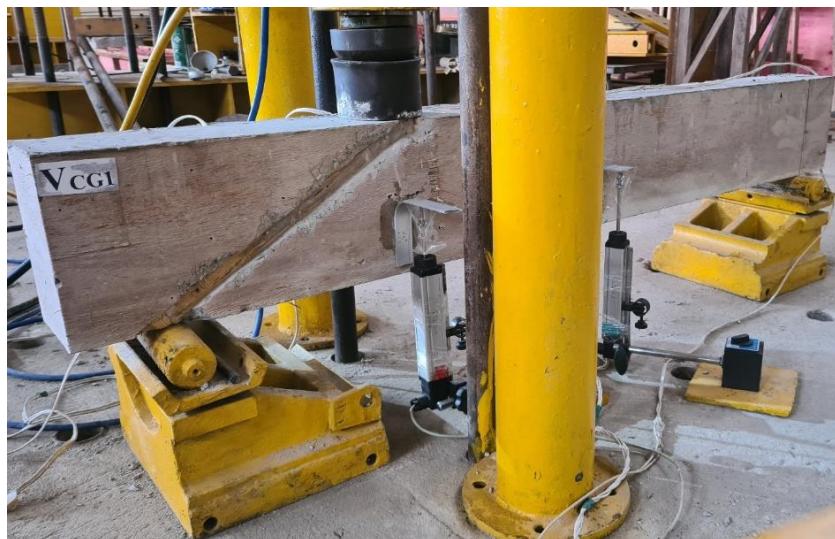


Figura 3.20 - Programa experimental da viga V_{CG1}.

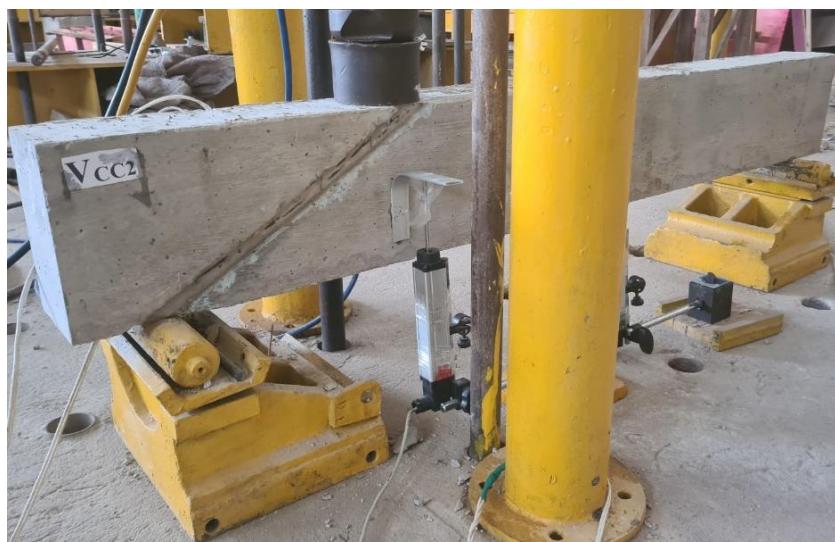


Figura 3.21 - Programa experimental da viga V_{CC2}.

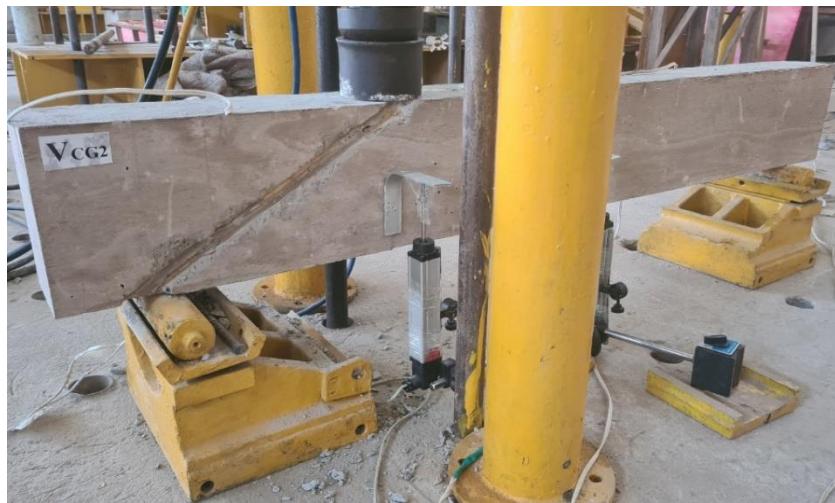


Figura 3.22 - Programa experimental da viga V_{CG2}.

O programa experimental foi cuidadosamente projetado para investigar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico e convencional. Os materiais e métodos adotados, incluindo o detalhamento das vigas, caracterização dos materiais, instrumentação e sistema de ensaio, garantiram a obtenção de dados confiáveis e representativos. Os resultados experimentais contribuirão para a análise comparativa com as previsões normativas, fornecendo subsídios para a validação do concreto geopolimérico como alternativa sustentável ao concreto convencional.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

4.1.1 Concreto

Os ensaios de compressão axial, tração por compressão e módulo de elasticidade dos concretos foram conduzidos após 28 dias de cura. O processo de cura dos corpos de prova envolveu submersão em um tanque de água em temperatura ambiente durante um período inicial de 3 dias, seguido pelo restante do período de cura em condições controladas até os 28 dias. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA). As propriedades mecânicas obtidas a partir da ruptura dos corpos de prova estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do concreto convencional e geopolimérico.

Viga	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_{ct} (MPa)
V_{CC1}	28,1	29,4	2,68
V_{CC2}	28,1	29,4	2,68
V_{CG1}	30,0	20,6	2,49
V_{CG2}	35,0	19,9	3,44

Observa-se que as vigas de concreto convencional (V_{CC1} e V_{CC2}) apresentam as mesmas propriedades mecânicas, uma vez que foram produzidas a partir de uma única concretagem. Por outro lado, as vigas de concreto geopolimérico (V_{CG1} e V_{CG2}) foram fabricadas em concretagens distintas, pois, como o concreto geopolimérico cura rapidamente, a betonagem de duas vigas ao mesmo tempo poderia afetar a resistência e a homogeneidade do concreto, o que explica as variações nos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Notadamente, embora a resistência à compressão do concreto convencional seja cerca de 14% inferior à do concreto geopolimérico, o módulo de elasticidade do concreto convencional é aproximadamente 31% superior. Esse comportamento pode ser atribuído às diferenças na microestrutura e composição dos dois tipos de concreto.

4.1.2 Aço

As barras de aço utilizadas na armadura transversal e longitudinal, são respectivamente de diâmetro de 5 mm de aço CA-60 e 16 mm de aço CA-50. O aço CA-60 apresenta uma tensão

de escoamento de 638 MPa e módulo de elasticidade de 245,4 GPa. A tensão de escoamento de 568 MPa e módulo de elasticidade de 227,2 GPa do aço CA-50. A Tabela 4.2 resume as propriedades mecânicas do aço, evidenciando diferenças nos valores de tensão de escoamento e módulo de elasticidade entre as barras de CA-60 e CA-50, refletindo suas aplicações específicas nas armaduras transversal e longitudinal, respectivamente. A Figura 4.1 apresenta as curvas tensão-deformação para os aços CA-60 e CA-50, evidenciando o comportamento elástico linear inicial, seguido pela transição para o regime plástico.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço

\varnothing (mm)	f_{ys} (MPa)	f_u (MPa)	ε_{ys} (%)	E_s (GPa)
5,0	638	729	4,6	245,4
16,0	568	674	2,5	227,2

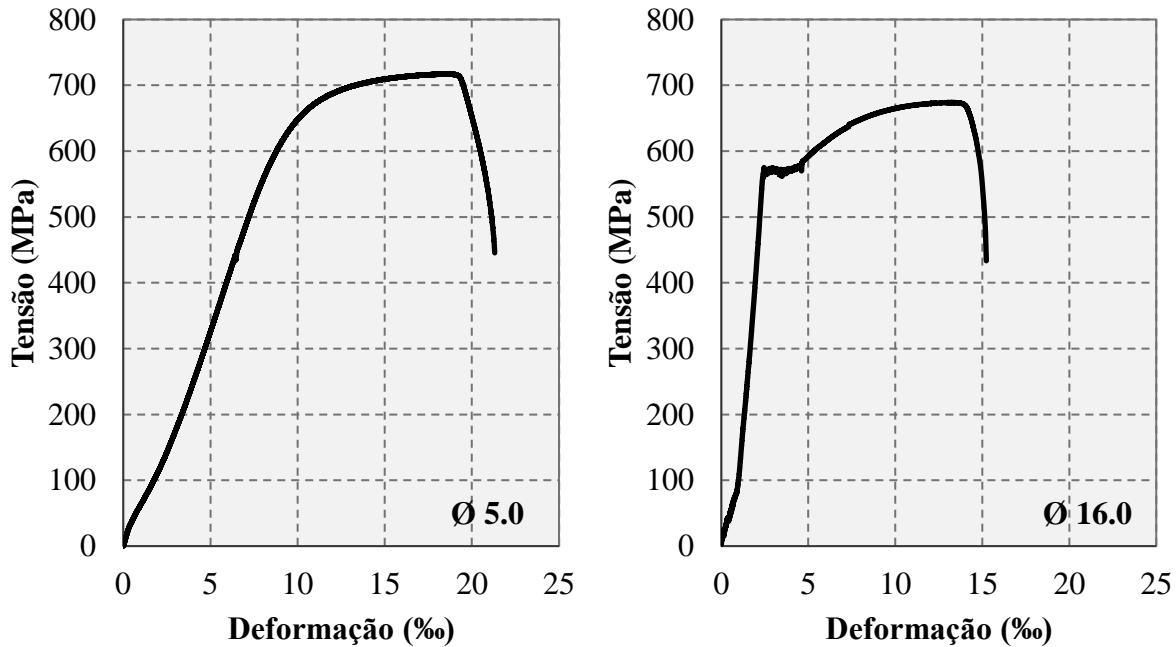


Figura 4.1 - Curva tensão-deformação das barras de aço.

4.2 DESLOCAMENTOS

Os deslocamentos verticais das vigas foram analisados em função da carga aplicada, tanto no meio do vão quanto no ponto de aplicação da carga. Os deslocamentos observados fornecem informações importantes sobre a rigidez e a ductilidade dos dois tipos de concreto, contribuindo para a avaliação comparativa de seu desempenho ao cisalhamento. A seguir,

apresentam-se os resultados experimentais e as principais observações com base nas deformações medidas.

O comportamento do deslocamento vertical medido no meio do vão em função da carga aplicada está representado na Figura 4.2. As vigas com menor taxa de armadura transversal apresentaram deslocamentos finais menores; contudo, a viga de concreto geopolimérico (V_{CG1}) apresentou uma deformação inferior (-1,89 mm) em comparação à viga de concreto convencional (V_{CC1}), que deformou -3,1 mm. Por outro lado, entre as vigas com maior taxa de armadura transversal, a viga de concreto geopolimérico (V_{CG2}) teve menor deformação para cargas equivalentes, mas apresentou maior deslocamento final devido à maior carga de ruptura atingida, com -6,22 mm, em comparação aos -4,84 mm da viga de concreto convencional (V_{CC2}).

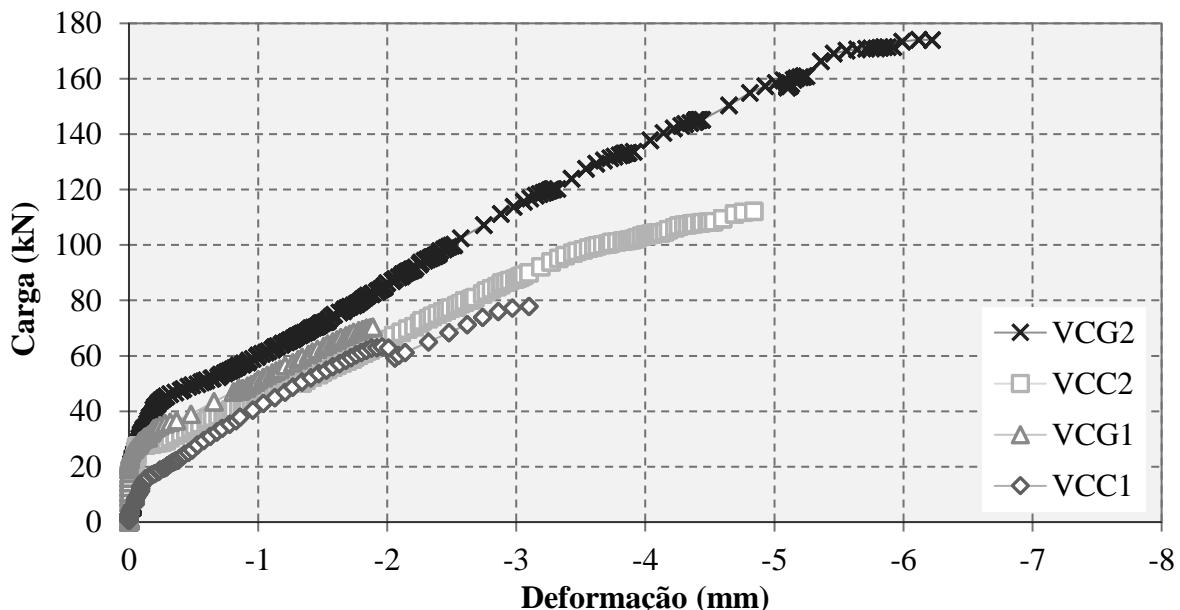


Figura 4.2 - Deslocamento vertical no meio do vão.

O comportamento do deslocamento vertical medido no ponto de aplicação da carga está ilustrado na Figura 4.3. Neste ponto, a viga V_{CG1} deformou menos (-2,88 mm) em relação à viga V_{CC1} (-3,44 mm). Entretanto, entre as vigas com maior taxa de armadura transversal, a viga V_{CG2} apresentou maior deformação final (-7,64 mm) em comparação à viga V_{CC2} (-4,29 mm) quando submetida à mesma carga.

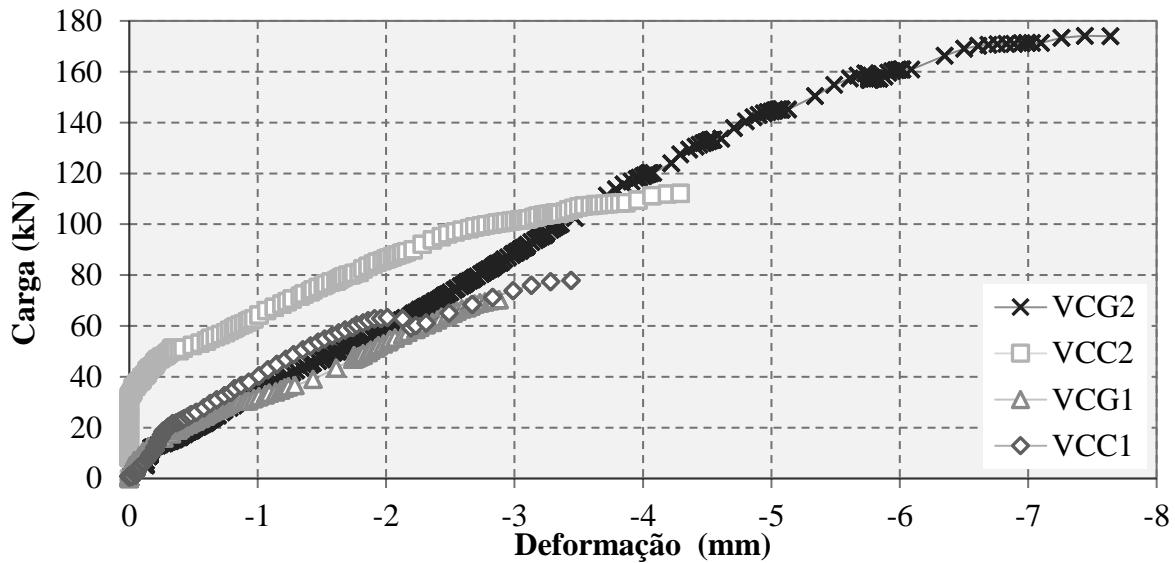


Figura 4.3 - Deslocamento vertical no ponto de aplicação da carga.

4.3 DEFORMAÇÕES

De acordo com a Figura 4.4, as barras de estribo apresentaram deformações superiores a 4,6%, indicando o escoamento das armaduras transversais. As vigas VCC1 e VCG1, que possuíam menores taxas de armadura transversal, exibiram comportamentos de deformação semelhantes, independentemente do tipo de concreto (convencional ou geopolimérico). Isso sugere que, apesar das diferenças na composição dos materiais, o desempenho estrutural das vigas sob carga foi comparável. Por outro lado, as vigas VCG2 e VCC2, com maior taxa de armadura transversal, apresentaram comportamentos semelhantes até aproximadamente 100 kN. A partir desse ponto, a viga VCG2 superou a viga VCC2 em termos de capacidade de carga, refletindo a maior resistência à compressão do concreto geopolimérico.

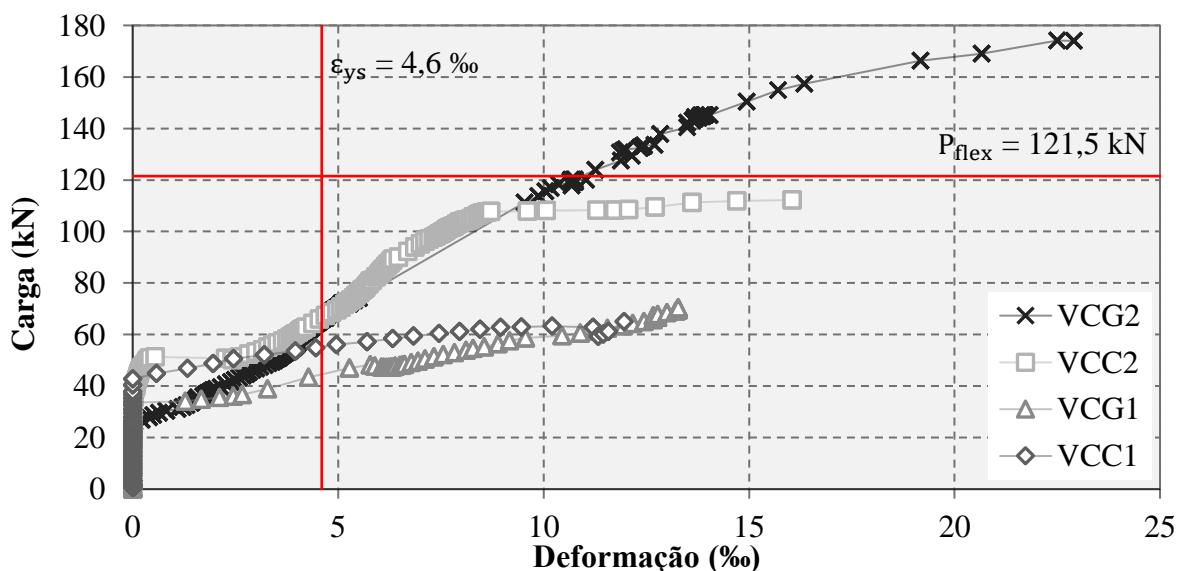


Figura 4.4 - Deformação da armadura transversal.

Quanto às armaduras longitudinais, as vigas com menor taxa de armadura transversal (V_{CC1} e V_{CG1}) não ultrapassaram 2,5% de alongamento, mantendo-se no estado elástico durante os ensaios. Isso indica que a solicitação nessas armaduras foi limitada. Entre as duas, a viga de concreto geopolimérico (V_{CG1}) apresentou deformações longitudinais significativamente menores em comparação com a viga de concreto convencional (V_{CC1}). Já nas vigas com maior taxa de armadura transversal (V_{CC2} e V_{CG2}), ambas as armaduras de flexão ultrapassaram o limite de escoamento, alcançando o estado plástico. A viga V_{CG2} apresentou a maior deformação, atingindo 7,24%, enquanto a viga V_{CC2} alcançou 3,0%, consistindo com as maiores cargas de ruptura registradas. Os valores medidos para as deformações das armaduras longitudinais estão apresentados na Figura 4.5.

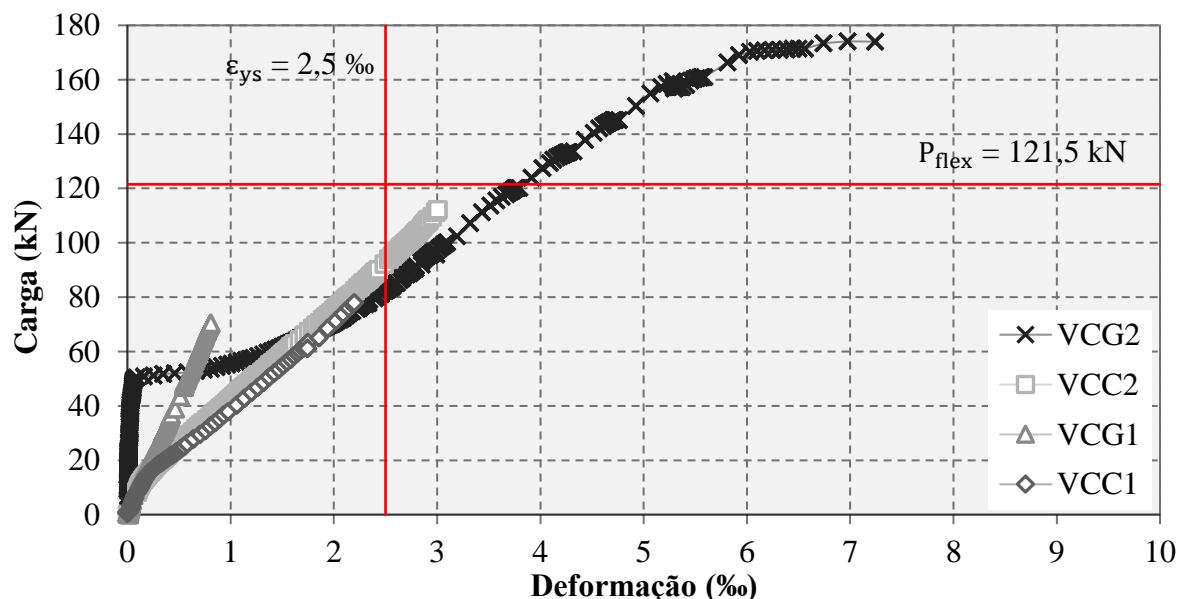


Figura 4.5 - Deformação da armadura longitudinal.

A Figura 4.6 apresenta as deformações medidas no concreto para as quatro vigas ensaiadas. Observa-se que, em nenhum caso, as deformações do concreto ultrapassaram o limite de ruptura típico, estimado em 3,5%. Esse resultado evidencia que o concreto, tanto o convencional quanto o geopolimérico, não atingiu sua capacidade máxima de deformação. O comportamento observado indica uma similaridade entre os dois tipos de concreto, reforçando que o concreto geopolimérico à base de metacaulim pode ser uma alternativa viável ao concreto convencional em aplicações estruturais.

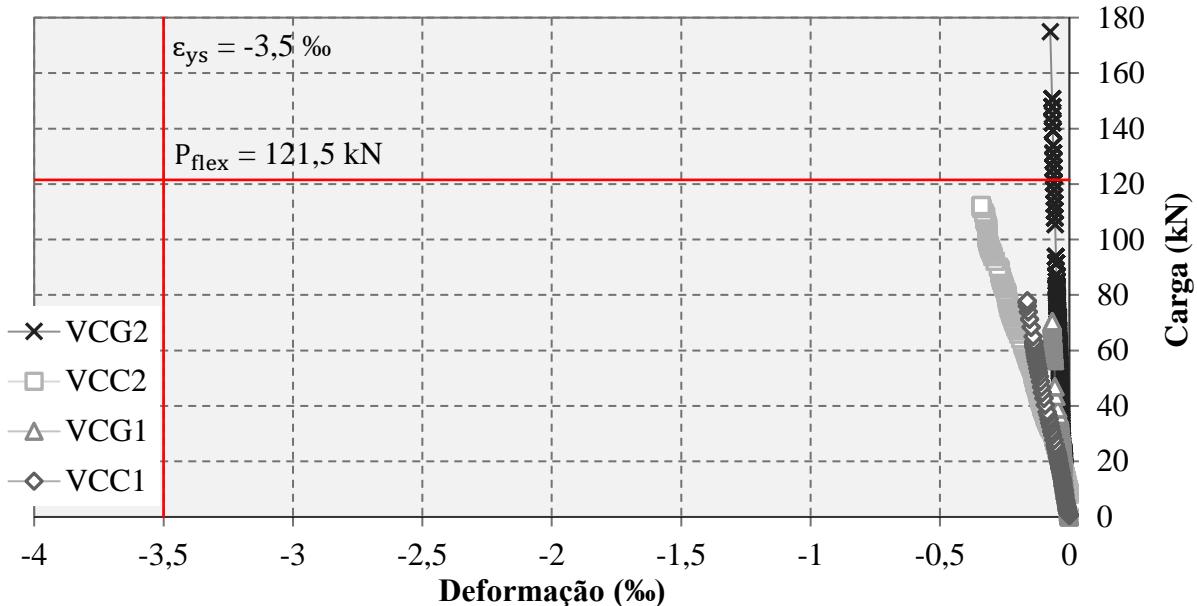


Figura 4.6 - Deformação do concreto.

Os resultados obtidos para o concreto e o aço reforçam a viabilidade do concreto geopolimérico em aplicações estruturais, especialmente em situações que demandam elevada resistência à compressão. Contudo, a menor rigidez do concreto geopolimérico, em comparação ao concreto convencional, exige atenção na escolha dos materiais em função das condições de projeto. A compatibilidade entre as propriedades dos materiais, como a rigidez relativa do aço e do concreto, também desempenha um papel fundamental no desempenho global das vigas testadas.

4.4 MODO DE RUPTURA E FISSURAÇÃO

Inicialmente, o critério para determinar o modo de ruptura das vigas baseava-se na comparação entre a carga de cisalhamento máxima e o valor teórico de P_{flex} . Caso a carga de cisalhamento fosse superior ao valor da resistência máxima à flexão, a ruptura era considerada flexional; caso contrário, atribuía-se a falha ao cisalhamento. Entretanto, os dados experimentais indicaram a necessidade de revisão desse critério, levando a uma análise mais precisa. Assim, o critério foi ajustado e passou a ser definido pelas seguintes condições: quando a armadura transversal atinge o escoamento antes da armadura longitudinal, e isso ocorre em uma carga onde a armadura longitudinal ainda não chegou ao seu limite de escoamento, a ruptura é considerada como tendo ocorrido por cisalhamento. Esse critério é consistente com o comportamento típico de falha por cisalhamento, onde o escoamento das armaduras transversais e a perda de capacidade do concreto acontecem antes do escoamento

da armadura longitudinal. Por outro lado, se a armadura longitudinal atingir o escoamento simultaneamente ou antes dos estribos, isso indica que a flexão contribui significativamente para a ruptura, podendo ser uma falha exclusivamente por flexão ou por uma combinação de flexão e cisalhamento.

Os dados experimentais mostraram ainda que as deformações máximas dos concretos ficaram bem abaixo do limite crítico de ruptura (3,5%), reforçando a hipótese de que a falha predominante das vigas ocorreu por cisalhamento da diagonal tracionada, e não por esmagamento do concreto na região comprimida.

As vigas com taxa de armadura transversal (ρ_w) de 0,2% (V_{CC1} e V_{CG1}) romperam por cisalhamento, devido à armadura transversal ter ultrapassado significativamente o limite de escoamento de 4,6%, conforme a Figura 4.4. Da mesma forma, as vigas com ρ_w de 0,6% (V_{CC2} e V_{CG2}) também romperam por cisalhamento, com a ressalva de que as armaduras longitudinais ultrapassaram o limite de escoamento (2,5%), conforme a Figura 4.5. Especificamente a V_{CG2} ultrapassou o valor da carga de ruptura por flexão (P_{flex}) em 44%; entretanto, essas deformações permaneceram significativamente inferiores às da armadura transversal. Na Tabela 4.3 são apresentados os modos de rupturas observados, enquanto nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 são mostrados o estado das vigas após a ruptura.

Tabela 4.3 - Modo de ruptura observado

Viga	P_{flex} (kN)	V_u (kN)	V_u/P_{flex}	Modo de ruptura observado
V_{CC1}		77,9	0,64	Cisalhamento
V_{CC2}		112,2	0,92	Cisalhamento no regime plástico da armadura de flexão
	121,5			
V_{CG1}		70,4	0,58	Cisalhamento
V_{CG2}		174,9	1,44	Cisalhamento no regime plástico da armadura de flexão

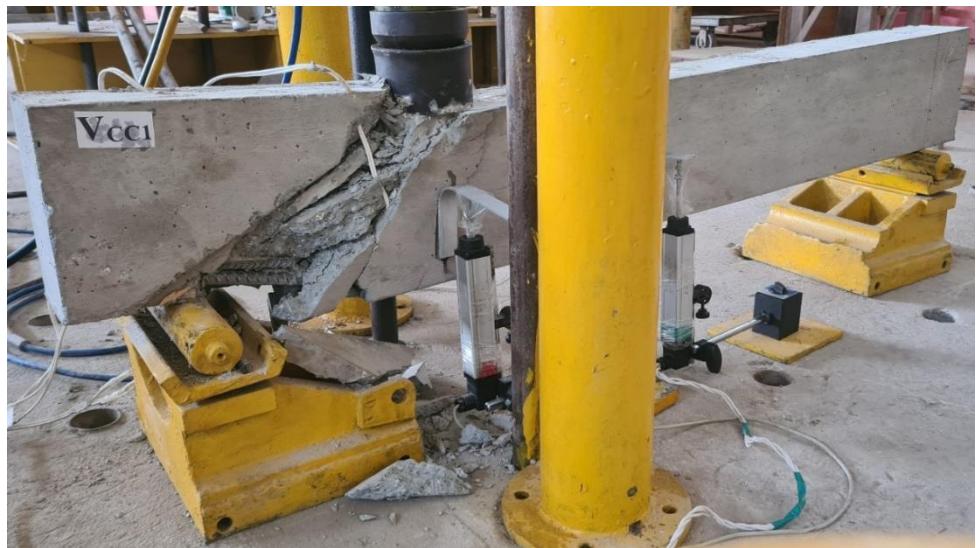


Figura 4.7 - Estado final da viga VCC1.

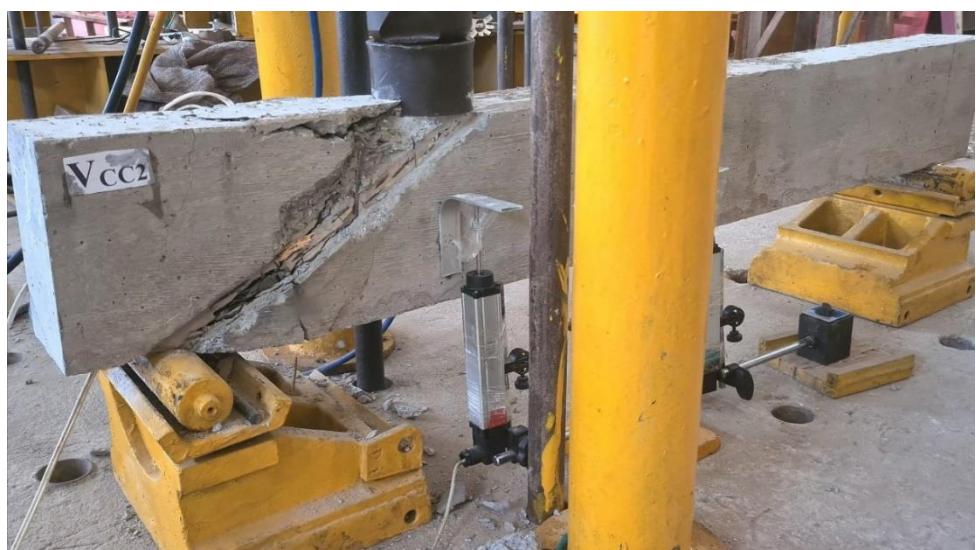


Figura 4.8 - Estado final da viga VCC2.

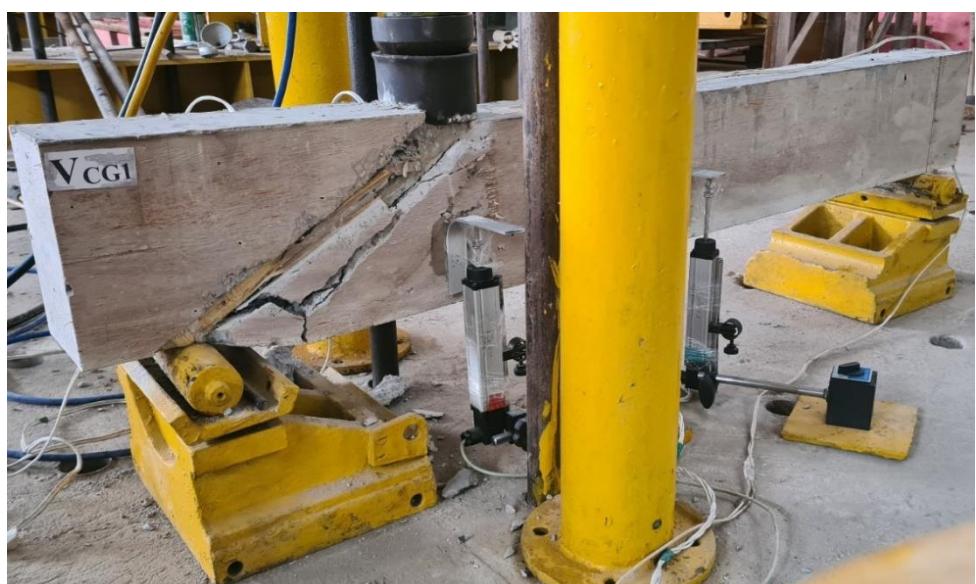


Figura 4.9 - Estado final da viga VCG1.



Figura 4.10 - Estado final da viga V_{CG2}

A fissuração principal, que levou ao colapso final das vigas, desenvolveu-se ao longo do friso planejado, conforme esperado no planejamento experimental. Essa fissura diagonal foi acompanhada pela ruptura dos estribos, monitorada por extensômetros elétricos de resistência posicionados nas armaduras transversais.

A análise do mapa de fissuração das vigas, representada nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, revelou que todas as fissuras de cisalhamento ocorreram dentro do friso planejado, com grande mobilização de concreto. Essa concentração de fissuras confirma a eficácia do friso como zona de alta solicitação de cisalhamento, projetada para facilitar a análise. As vigas de concreto convencional (VCC1 e VCC2) não apresentaram fissuras de flexão durante os ensaios, enquanto as vigas de concreto geopolimérico exibiram fissuras concentradas na região de maior momento fletor, entre o ponto de aplicação da carga e o meio do vão.

A viga VCG1, com menor taxa de armadura transversal, apresentou poucas fissuras de flexão, que começaram a surgir com uma carga de 30 kN. Por outro lado, a viga VCG2, com maior taxa de armadura transversal, apresentou um comportamento distinto, com muitas fissuras de flexão que se espalharam por toda a viga, surgindo a partir de uma carga de 50 kN. Essas observações destacam o impacto da taxa de armadura transversal e das propriedades do concreto geopolimérico no comportamento das vigas sob carregamento.



Figura 4.11 – Mapa de fissuração da viga VCC1



Figura 4.12 – Mapa de fissuração da viga VCG1



Figura 4.13 – Mapa de fissuração da viga VCC2



Figura 4.14 – Mapa de fissuração da viga VCG2

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados foi conduzida considerando dois critérios principais: o Estado Limite de Serviço (ELS), relacionado aos deslocamentos máximos admissíveis durante a utilização da estrutura, e o Estado Limite Último (ELU), referente à capacidade máxima de resistência antes do colapso. As vigas de concreto convencional (VCC1 e VCC2) e geopolimérico (VCG1 e VCG2) foram avaliadas quanto ao seu desempenho, com base nos valores experimentais e nas previsões normativas das normas NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (2019) e EUROCODE 2 (EN, 2023).

5.1 ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS)

No ELS, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), o deslocamento admissível para vigas com vão de 1300 mm é de 5,2 mm. Nos ensaios, as vigas de concreto convencional, VCC1 e VCC2, e a viga de concreto geopolimérico VCG1, com menor taxa de armadura transversal, apresentaram deslocamentos dentro desse limite. Os valores máximos registrados foram de -3,44 mm para a VCC1, -4,84 mm para a VCC2 e -2,88 mm para a VCG1. Esses resultados indicam que essas vigas mantiveram um comportamento estrutural adequado dentro dos critérios normativos. Entretanto, a viga de concreto geopolimérico VCG2, com maior taxa de armadura transversal, apresentou deslocamento de -7,64 mm, ultrapassando o limite de 5,2 mm, sugerindo comprometimento no ELS, apesar de ter atingido a maior carga de ruptura. Esses resultados evidenciam que, embora as vigas geopoliméricas possam apresentar maior resistência, é necessário cuidado para atender também aos critérios de serviço.

5.2 ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU)

O Estado Limite Último (ELU) refere-se ao ponto em que a estrutura atinge sua capacidade máxima de resistência, antes do colapso. A análise das deformações e das cargas de ruptura observadas nas vigas mostrou que o modo de falha predominante foi o cisalhamento.

No ELU, a capacidade máxima das vigas foi avaliada com base nas cargas de ruptura experimentais e nas previsões normativas. A Tabela 5.1 apresenta as cargas de ruptura experimentais (V_u) e as previsões das normas V_{NBR} , V_{ACI} e V_{EC} . Os resultados mostram que a VCG2 apresentou a maior capacidade de carga (174,9 kN), sendo 56% superior à carga de ruptura da VCC2 (112,2 kN), que possui a mesma taxa de armadura transversal. Esse

comportamento reflete o maior desempenho do concreto geopolimérico em termos de resistência ao cisalhamento, especialmente em vigas com maior taxa de armadura. Por outro lado, entre as vigas com menor taxa de armadura transversal, a diferença entre V_{CC1} e V_{CG1} foi de apenas 10%, com valores de 77,9 kN e 70,4 kN, respectivamente.

Tabela 5.1 - Resultado experimental e previsões normativas

Viga	V_u (kN)	V_{NBR} (kN)	V_{ACI} (kN)	V_{EC} (kN)
V_{CC1}	77,9	48,7	47,0	33,6
V_{CC2}	112,2	97,6	98,6	100,8
V_{CG1}	70,4	49,8	47,7	33,6
V_{CG2}	174,9	101,4	101,1	100,8

As previsões normativas apresentaram discrepâncias em relação aos resultados experimentais, como evidenciado na Tabela 5.2. A NBR 6118 e a ACI 318 foram as que mais se aproximaram dos valores experimentais, com médias de estimativa 47% e 50% superiores, respectivamente, e coeficiente de variação de 15%. Já a EUROCODE 2 apresentou uma superestimação média de 82%, com coeficiente de variação de 25%, indicando menor precisão, especialmente para o concreto geopolimérico. A Figura 5.1 ilustra os resultados experimentais e as estimativas normativas, destacando que as vigas de concreto convencional apresentaram comportamento mais próximo das previsões, enquanto as vigas geopoliméricas, especialmente a V_{CG2} , excederam significativamente as estimativas normativas.

Tabela 5.2 - Comparaçao entre estimativas e resultados

Viga	V_u/V_{NBR}	V_u/V_{ACI}	V_u/V_{EC}
V_{CC1}	1,60	1,66	2,32
V_{CC2}	1,15	1,14	1,11
V_{CG1}	1,41	1,48	2,10
V_{CG2}	1,72	1,73	1,74
Média	1,47	1,50	1,82
Desvio padrão	0,22	0,23	0,46
Coeficiente de variação (%)	15%	15%	25%

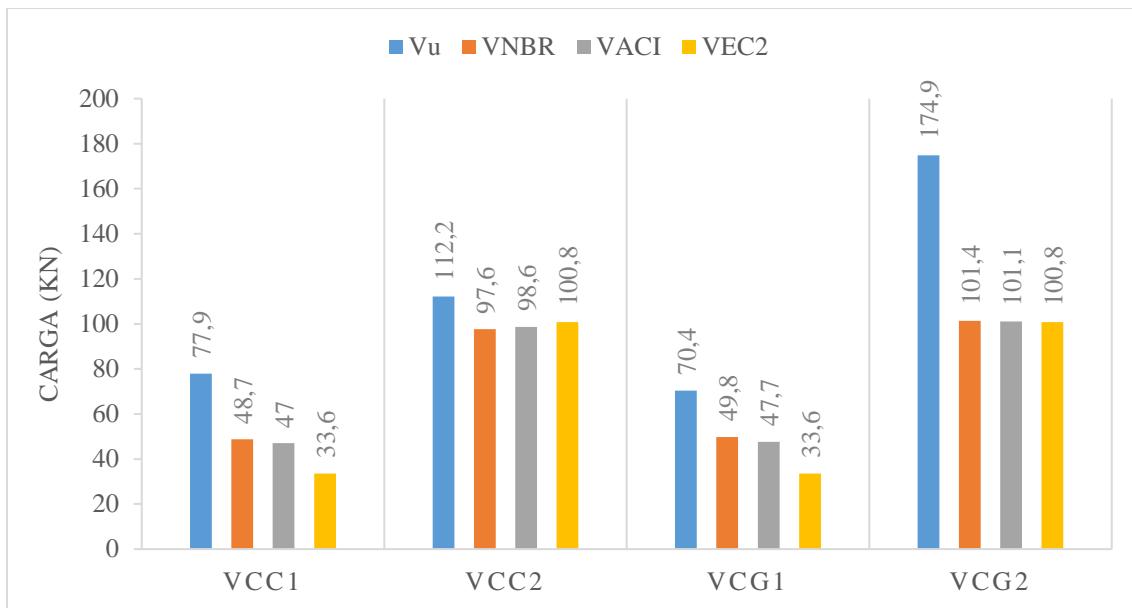


Figura 5.1 - Resultados experimentais e estimados das cargas últimas

Adicionalmente, os dados experimentais mostraram que a V_{CG2} ultrapassou em 44% a carga de ruptura por flexão (P_{flex}), indicando um comportamento misto, com predominância de cisalhamento, mas também influenciado pela flexão devido à alta carga aplicada. Por outro lado, as vigas de concreto convencional (V_{CC1} e V_{CC2}) apresentaram comportamento mais estável e previsível, com ruptura controlada por cisalhamento, conforme esperado.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES

O estudo realizado permitiu analisar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto geopolimérico à base de metacaulim em comparação às vigas de concreto convencional, considerando as normas NBR 6118 (ABNT, 2023), ACI 318 (ACI, 2019) e EUROCODE 2 (EN, 2023). Os resultados demonstraram que as normas foram conservadoras na estimativa da resistência ao cisalhamento das vigas de concreto geopolimérico, apresentando uma relação entre a carga experimental e a teórica variando de 1,41 a 2,1. Em comparação, as vigas de concreto convencional apresentaram uma maior dispersão, com variação de 1,11 a 2,32, o que reforça a compatibilidade do concreto geopolimérico com as normas já aplicáveis ao concreto tradicional.

Entre as vigas, as diferenças nas cargas de ruptura experimentais variaram de 9,63% a 55,88%, atribuídas às diferenças nas propriedades mecânicas dos concretos, que apresentaram variação de 6,33% a 32,31%. A NBR 6118 e a ACI 318 se mostraram as mais acuradas, com uma média de estimativa de ruptura cerca de 50% superior ao observado experimentalmente e um coeficiente de variação de 15%. O EUROCODE 2, por outro lado, apresentou uma estimativa 82% superior ao observado, com coeficiente de variação de 25%.

O aumento da taxa de armadura transversal resultou em um incremento significativo na carga de ruptura das vigas, como previsto pelas normas. A comparação entre as vigas V_{CC1} e V_{CG1} revelou uma diferença de cerca de 10% na carga de ruptura, atribuível às propriedades dos materiais. A viga V_{CG2} , por sua vez, demonstrou uma capacidade de carga 56% superior à da viga V_{CC2} , em razão de sua maior resistência à compressão axial. Os resultados experimentais confirmam que as vigas de concreto geopolimérico à base de metacaulim apresentaram desempenho estrutural similar às vigas de concreto convencional, tanto em resistência quanto em deformabilidade, evidenciando o concreto geopolimérico como uma alternativa viável ao concreto tradicional. Todas as vigas romperam por cisalhamento na diagonal tracionada, dentro do ângulo de 30 graus, conforme o planejamento experimental.

Os resultados experimentais confirmaram que o concreto geopolimérico à base de metacaulim apresenta desempenho estrutural semelhante ao concreto convencional em termos de resistência e deformabilidade. Além disso, sua menor emissão de CO₂ e o uso de resíduos industriais tornam o concreto geopolimérico uma alternativa sustentável e

ambientalmente vantajosa para a construção civil. Conclui-se, portanto, que o concreto geopolimérico não apenas atende aos padrões normativos vigentes, mas também oferece uma solução técnica e ambiental promissora para o setor.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Durabilidade em ambientes agressivos: Investigar o desempenho do concreto geopolimérico em condições adversas, como exposição a ciclos de congelamento e degelo, ambientes ricos em sulfatos, cloretos ou ácidos, e situações de elevada umidade.
- Modelos normativos ajustados: Desenvolver modelos teóricos específicos para concreto geopolimérico que considerem suas propriedades únicas, buscando maior precisão nas estimativas de resistência e deformabilidade.
- Análise de longo prazo: Realizar ensaios de fluência e retração no concreto geopolimérico para avaliar seu comportamento sob cargas permanentes e em condições de envelhecimento.
- Estudo de composições alternativas: Avaliar o desempenho estrutural e ambiental de concretos geopoliméricos produzidos com diferentes tipos de precursores, como cinzas volantes, escória de alto-forno e resíduos agrícolas.
- Aplicações em elementos estruturais complexos: Ampliar o escopo de estudos para incluir outros elementos estruturais, como lajes, pilares e fundações, analisando o comportamento do concreto geopolimérico sob diferentes solicitações.
- Análise econômica: Comparar os custos de produção e aplicação do concreto geopolimérico em escala industrial em relação ao concreto convencional, considerando fatores como disponibilidade de materiais, logística e economia circular.

Esses estudos poderão consolidar o concreto geopolimérico como uma alternativa eficiente e sustentável para a construção civil, alinhada com as demandas globais por materiais de menor impacto ambiental e maior desempenho técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBAKRI, M. Mechanical properties of kaolinite-based geopolymers with and without the addition of alumina. *Journal of Materials Science*, v. 48, n. 9, p. 6421-6432, 2013.
- ALZEER, M. I.; MACKENZIE, K. J. D. Synthesis and mechanical properties of new geopolymer composites based on inorganic fillers. *Journal of Materials Science*, v. 47, n. 12, p. 6958-6965, 2012.
- AMBILY, P. S.; MADHESWARAN, C. K.; LAKHSMANAN, N.; DATTATREYA, J. K.; JAFFER, S. A. S. Experimental studies on shear behaviour of reinforced geopolymer concrete thin webbed T-beams with and without fibres, 2012.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2023.
- AZEVEDO, E. P. Lajes lisas de concreto geopolimérico com agregado graúdo sintético e fibras de aço ao punctionamento simétrico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2023.
- BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THOMAS, J. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.
- CASTEL, A. Bond between steel reinforcement and geopolymer concrete. *Handbook of low carbon concrete*, 2016.
- CHANG, E. H. Shear and bond behaviour of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams, 2009.

CHINDAPRASIRT, P.; SHAREERAT, T.; SIRIVIVATNANON, V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymers. *Cem. Concr. Compos.*, 2007, 29, 224–229.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali activation of fly ashes: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio. Part I: FTIR study. *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 86, n. 1-3, p. 207-214, 2005.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of Thermal Analysis*, 1979.

DAVIDOVITS, J. Polymère Minéral. French Patent Application FR 79.22041 (FR 2,464,227) and FR 80.18970 (FR 2,489,290); US Patent 4,349,386, Mineral polymer, 1979.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In: First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Kiev, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials, 1994.

DEEPAK, A. L.; LAKSHMI, T. V. Durability properties of geopolymer concrete with flyash and metakaolin. *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 2020, 9, 256–260.

DUXSON, P.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 2007, 42, 2917–2933.

EUROCODE 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2023.

FAROOQ, F.; RAHMAN, S. K. U.; AKBAR, A.; KHUSHNOOD, R. A.; JAVED, M. F.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H.; ASLAM, F. A comparative study on performance evaluation of hybrid GNPs/CNTs in conventional and self-compacting mortar. *Alex. Eng. J.*, 2020, 59, 369–379

FERDOUS, M.; KAYALI, O.; KHENNANE, A. A detailed procedure of mix design for fly ash based geopolymers concrete. In Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2013), Melbourne, Australia, 11–13 December 2013, p. 11–13.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterization of fly ashes: potential reactivity as alkaline cements. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 10, p. 1984-1992, 2005.

GUNASEKARA, C.; LAW, D. W.; SETUNGE, S. Long term permeation properties of different fly ash geopolymers concretes. *Constr. Build. Mater.*, 2016, 124, 352–362.

HAQ, E. U.; PADMANABHAN, S. K.; ZUBAIR, M.; ALI, L.; LICCIULLI, A. Intumescence behaviour of bottom ash based geopolymers mortar through microwave irradiation—As affected by alkali activation. *Constr. Build. Mater.*, 2016, 126, 951–956.

HARDJITO, D.; RANGAN, B. V. Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete; Research Report GC1; Curtin University of Technology: Perth, Australia, 2005.

HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *J. Clean. Prod.* 2019, 223, 704–728.

HUNG, T. V.; TIEN, N. D.; VAN DONG, D. Experimental study on section curvature and ductility of reinforced geopolymer concrete beams. *Sci. J. Transp.*, 2017, 8, 3–11.

JUENGER, M. C. G.; JENNINGS, H. M. Effects of high alkalinity on cement pastes. *Mater. J.*, 2001, 98, 251–255.

JUMRAT, S.; CHATVEERA, B.; RATTANADECHO, P. Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymers mortar. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2011, 38, 242–248.

KUMAR, S. V.; GANESAN, N.; INDIRA, P. V. Shear strength of hybrid fibre-reinforced ternary blend geopolymers concrete beams under flexure. *Materials*, v. 14, n. 21, p. 6634, 2021.

LEE, N. K. Enhancing the mechanical properties of geopolymers: Role of nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 93, 285-294, 2021.

LLOYD, N. A.; RANGAN, B. V. Geopolymer Concrete: A Review of Development and Opportunities. Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2010.

LINO, J. V. S. Estudo comparativo de diversas normas de dimensionamento de concreto armado para esforço transversal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

MEYRELLES, R.; CALMON, J. L.; BELLO, L. D.; MEDINA, T. M. Avaliação do ciclo de vida de concretos geopoliméricos: estudo comparativo. *Brazilian Journal of Production Engineering*, v. 10, n. 3, p. 449-467, 2024.

MÖRSCH, E. *Der Eisenbetonbau-Seine Theorie und Anwendung (Reinforced Concrete Construction) – Theory and Application*. Wittwer, Vol. 1, Part 1, Stuttgart, 1920.

MÖRSCH, E. *Der Eisenbetonbau-Seine Theorie und Anwendung (Reinforced Concrete Construction) – Theory and Application*. Wittwer, Vol. 1, Part 2, Stuttgart, 1922.

NOUSHINI, A.; ASLANI, F.; CASTEL, A.; GILBERT, R. I.; UY, B.; FOSTER, S. Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 2016, 73, 136–146.

OZTURK, M.; ARSLAN, G. Shear behavior of granulated blast furnace slag-based geopolymer-reinforced concrete beams. *Buildings*, v. 12, n. 12, p. 2053, 2022.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Materials and Structures*, v. 47, n. 1, p. 11-25, 2020.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A.; MYERS, R. J.; VAN DEVENTER, J. S. J. Stabilization of inorganic construction materials by hybrid alkaline cements. *Cement and Concrete Research*, v. 65, p. 109-119, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. Springer, 2014.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications. Woodhead Publishing, 2009.

REDDY, M. S.; DINAKAR, P.; RAO, B. H. Mix design development of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. *J. Build. Eng.*, 2018, 20, 712–722.

REHMAN, S. K. U.; IMTIAZ, L.; ASLAM, F.; KHAN, M. K.; HASEEB, M.; JAVED, M. F.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H. Experimental investigation of NaOH and KOH mixture in SCBA-based geopolymer cement composite. *Materials*, 2020, 13, 34–37.

RITTER, W. Die bauweise hennebique. *Schweizerische Bauzeitung*, v. 33, n. 7, p. 59–61, 1899.

ROBINSON, J. R.; DEMORIEUX, J. M. Essais de traction-compression sur modèles d'âme de poutre en béton armé. Institut de Recherches Appliquées du Béton Armé (IRABA), Part 2, 45–52, 1972.

SARKER, P. K. Structural behaviour and design of geopolymer concrete members. *Civil Engineering Dimension*, v. 17, n. 3, 2015.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 2018, 114, 2–26.

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S. K. Geopolymer concrete: a review of some recent developments. *Constr. Build. Mater.*, v. 85, p. 78–90, 2015.

TEMUJIN, J.; VAN RIESSEN, A.; WILLIAMS, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of Hazardous Materials*, v. 167, n. 1-3, p. 82-88, 2009.

THAMILSELVI, P.; SIVA, A.; OYEJOBI, D. Geopolymer Concrete: Overview. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, v. 8, n. 6, p. 10–14, 2017.

UMNIATI, B. S. RISDANARENI, P.; ZEIN, F. T. Z. Workability enhancement of geopolymer concrete through the use of retarder. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing: New York, NY, USA, 2017, p. 020033.

VAN JAARSVELD, J. G. S. The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, v. 12, n. 1, p. 75-91, 2019.

WIGHT, J. K; MACGREGOR, J. G. *Reinforced Concrete – Mechanics and Design*. 6 ed., Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2012.

WILD, S.; KERSHAW, R. P.; JAMES, A.; PAYNE, J. The effect of metakaolin on the engineering properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 11, p. 1537-1544, 1996.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The Geopolymerisation of Alumino Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, v. 59, p. 247–266, 2000.

YACOB, N. S. Shear behavior of reinforced fly ash-based geopolymer concrete. Masters Theses. 7863. Missouri University of Science and Technology, 2016.

ZHU, P.. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, v. 174, p. 123-127, 2020.