



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

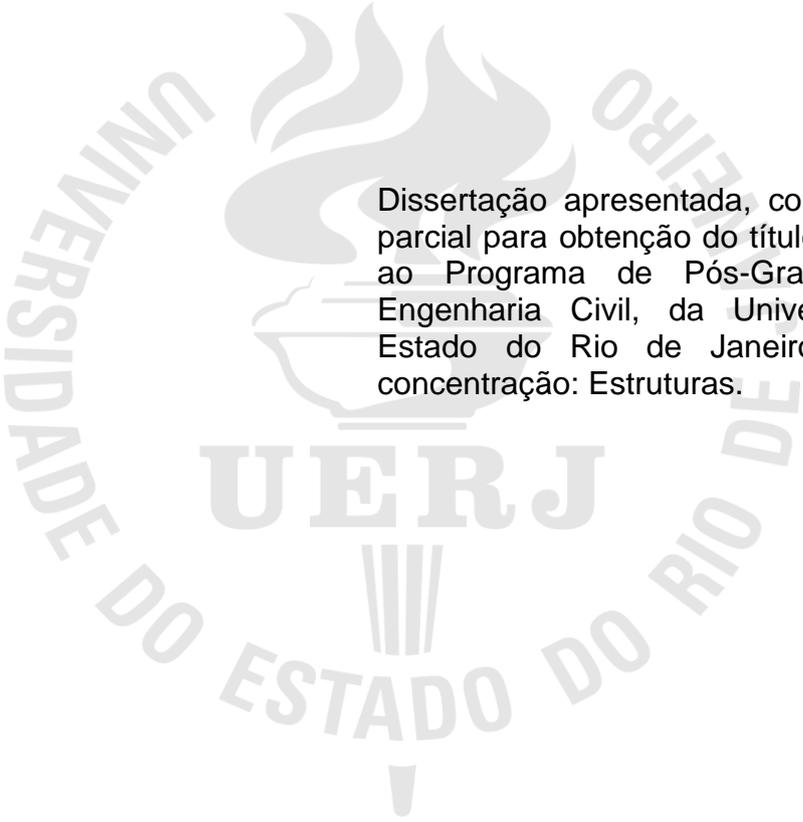
Daniel Costa da Silva

**Influência do teor de metacaulinita na avaliação da aderência de
compósitos cimentícios reforçados com fibras, como reparo de
estruturas de concreto**

Rio de Janeiro
2023

Daniel Costa da Silva

Influência do teor de metacaulinita na avaliação da aderência de compósitos cimentícios reforçados com fibras, como reparo de estruturas de concreto



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadoras: Prof^a. Dra. Margareth da Silva Magalhães
Prof^a. Dra. Regina Helena Ferreira de Souza

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S586 Silva, Daniel Costa da.
Influência do teor de metacaulinita na avaliação da aderência de compósitos cimentícios reforçados com fibras, como reparo de estruturas de concreto / Daniel Costa da Silva. – 2023.
128 f.

Orientadoras: Margareth da Silva Magalhães, Regina Helena Ferreira de Souza.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Construção de concreto - Teses. 3. Cimento - Teses. 4. Manutenção - Teses. 5. Cisalhamento - Teses. I. Magalhães, Margareth da Silva. II. Souza, Regina Helena Ferreira de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.012.4

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Daniel Costa da Silva

Influência do teor de metacaulinita na avaliação da aderência de compósitos cimentícios reforçados com fibras, como reparo de estruturas de concreto

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em 30 de outubro de 2023.

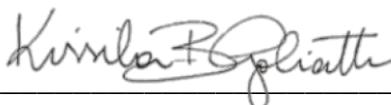
Banca Examinadora:



Prof^ª. Dra. Margareth da Silva Magalhães (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof^ª. Dra. Regina Helena Ferreira de Souza (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dra. Reila Vargas Velasco
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ



Prof. Dra. Kissila Botelho Goliath
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

A minha mãe e minha irmã, por serem meu alicerce e estarem comigo em qualquer situação. Ao meu Pai, que sempre sonhou junto comigo. Ao meu namorado, pela paciência, ajuda e companheirismo nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe e minha irmã, pelo apoio incondicional e por serem minha força durante todo esse processo. Aos meus sobrinhos, Maína e Marcos, por serem fonte de força e inspiração nesse caminho. A meu cunhado e demais familiares pelo suporte e carinho.

A meu namorado, Luan, por se fazer presente a todo momento, mesmo que distante. Sua ajuda foi essencial nesse processo e seu apoio foi fundamental nos momentos mais difíceis do percurso.

Aos meus amigos Cinthia, Alysson, Claudiane, Taniby, Gabriel, Luísa, Ingridy, Layse, Luana, Antonio e Bruna pelas palavras de carinho, ajuda e incentivo durante essa jornada.

À professora orientadora Margareth Magalhães por toda a ajuda, compreensão e empatia durante esse processo tão difícil. À professora Regina Souza, meu agradecimento pelo conhecimento compartilhado e ajuda na produção desse trabalho.

Aos meus colegas de mestrado, Max e Vivianne, pela parceria e suporte. Vocês foram essenciais.

Aos demais professores e técnicos da UERJ, pelos conhecimentos compartilhados e ajuda no processo de produção e continuidade do trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

O mistério é a coisa mais nobre de que podemos ter experiência. É a emoção que se encontra no cerne da verdadeira ciência. Aquele que não sente essa emoção e que não pode mais se maravilhar nem se espantar, é como se já estivesse morto.

Saber que aquilo que é impenetrável para nós verdadeiramente existe e se manifesta como a mais alta sabedoria e a mais radiosa beleza, que nossas formas mais primitivas, esse conhecimento, está no centro de toda verdadeira devoção.

Albert Einstein

RESUMO

SILVA, Daniel Costa da. *Influência do teor de metacaulinita na avaliação da aderência de compósitos cimentícios reforçados com fibras, como reparo de estruturas de concreto*. 2023. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A deterioração de estruturas de concreto é um problema recorrente que requer a realização de intervenções de reparo de boa qualidade. Uma boa aderência na interface reparo-concreto é essencial na aplicação de reparos. No entanto, essa aderência depende das propriedades físicas-químicas e mecânicas dos materiais, além da rugosidade na superfície do concreto. Esse trabalho aborda um programa experimental que busca avaliar a aderência entre um substrato de concreto e compósitos cimentícios reforçados com fibras com diferentes teores de metacaulinita, utilizada como adição cimentícia. Foram testadas quatro misturas de compósitos cimentícios reforçados com fibra. As diferentes misturas foram caracterizadas através de ensaios físicos e mecânicos. Para o estudo da aderência entre o concreto e os compósitos cimentícios, foram fabricados corpos de prova prismáticos e cilíndricos compostos (concreto/reparo). Foram realizados dois tipos de ensaios de aderência no conjunto reparado, os ensaios de cisalhamento oblíquo (slant shear) e o de tração por compressão diametral. Nos ensaios de tração por compressão diametral foram utilizados 3 tipos de rugosidades e nos ensaios de cisalhamento oblíquo foi utilizada somente uma rugosidade. Além disso, nos ensaios de cisalhamento oblíquo foram utilizadas três diferentes angulações (20°, 25° e 30°) da superfície inclinada de aderência concreto-compósito. O substrato utilizado foi um concreto convencional e os materiais de reparo frescos foram aplicados sobre o concreto endurecido. Após 28 dias da moldagem do reparo, os conjuntos reparados foram ensaiados. Na caracterização das misturas utilizadas como material de reparo, observou-se que as misturas com presença de metacaulinita obtiveram resistência à compressão e módulo de elasticidade semelhantes a mistura sem metacaulinita aos 28 dias. Com relação a resistência à flexão, observou-se uma diminuição com o aumento do teor de metacaulinita, enquanto a capacidade de deflexão obteve um aumento. Após a análise dos resultados de aderência, pôde-se observar que o maior teor de metacaulinita proporcionou um melhor desempenho com relação a resistência de aderência obtida nos diferentes ensaios e uma maior coesão entre o concreto e o compósito.

Palavras-chave: Aderência; Compósitos cimentícios reforçados com fibras; Metacaulinita; Rugosidade; Slant shear; Compressão diametral.

ABSTRACT

SILVA, Daniel Costa da. Influence of metakaolinite content on the assessment of adhesion of fiber-reinforced cementitious composites, such as repair of concrete structures. 2023. 128 f. Dissertation (Master's in Civil Engineering) – Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The deterioration of concrete structures is a recurring problem that requires good quality repair interventions. Good adhesion at the repair-concrete interface is essential when applying repairs. However, this adhesion depends on the physical-chemical and mechanical properties of the materials, in addition to the roughness of the concrete surface. This work addresses an experimental program that seeks to evaluate the adhesion between a concrete substrate and cementitious composites reinforced with fibers with different contents of metakaolin, used as a cementitious addition. Four mixtures of fiber-reinforced cementitious composites were tested. The different mixtures were characterized through physical and mechanical tests. To study the adhesion between concrete and cementitious composites, prismatic and cylindrical composite specimens (concrete/repair) were manufactured. Two types of adhesion tests were carried out on the repaired assembly, the slant shear and the diametral compression tensile tests. In the diametral compression tensile tests, 3 types of roughness were used and in the slant shear tests, only one roughness was used. Furthermore, in the slant shear tests, three different angles (20° , 25° and 30°) of the inclined concrete-composite adhesion surface were used. The substrate used was conventional concrete and fresh repair materials were applied over the hardened concrete. After 28 days of repair molding, the repaired sets were tested. When characterizing the mixtures used as repair material, it was observed that the mixtures with the presence of metakaolinite obtained compressive strength and elastic modulus similar to the mixture without metakaolinite at 28 days. Regarding flexural strength, a decrease was observed with increasing metakaolinite content, while deflection capacity increased. After analyzing the adhesion results, it can be observed that the higher metakaolinite content provided better performance in relation to adhesion strength, obtained in the different tests, and the cohesion between the concrete and the composite.

Keywords: Adhesion; Fiber-reinforced cementitious composites; Metakaolin; Roughness; Slant shear; Diametrical compression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zona de transição (ESPECHE, 2011)	21
Figura 2 – Esquemas de vários métodos de teste para determinação de resistência à aderência (BEUSHASEN <i>et al.</i> , 2008).	25
Figura 3 – Ensaio de tração por compressão diametral em concretos reparados.....	27
Figura 4 – Ensaio de cisalhamento oblíquo.	28
Figura 5 - Curva tensão-deformação observada no ECC (Pan <i>et al.</i> , 2022).	34
Figura 6 – Organograma das etapas metodológicas.....	39
Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	42
Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	43
Figura 9 - Aspecto da mistura de concreto na betoneira utilizada durante a concretagem.....	44
Figura 10 – (a) Moldagem do concreto de base e (b) Forma de aço adaptada para o ensaio de compressão diametral do composto (concreto-reparo).....	45
Figura 11 – Detalhe das formas de angulação de 30° (BRAUSTEIN, 2020).....	45
Figura 12 - Forma com angulação de 25°.	46
Figura 13 - Forma com angulação de 20°	46
Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo.	49
Figura 15 – Gráfico tempo de escoamento x teor de superplastificante.....	51
Figura 16 - Mistura dos ingredientes na argamassadeira.	53
Figura 17 – Moldagem de corpos de prova para caracterização dos compósitos.....	54
Figura 18 – Corpos de prova de flexão e compressão desmoldados.....	54
Figura 19 - Preparo da superfície dos corpos de prova para os testes de aderência por compressão diametral: (a) Rugosidade R1 e (b) Rugosidade R2.	55
Figura 20 - Rugosidade R2 nos (a) prismas 30°, (b) prismas 25°, (c) prismas 20°. .	56
Figura 21 - Rugosidade por corte.....	56
Figura 22 - Ensaio de areia realizado em (a) prismas, (b) cilindros	57
Figura 23 – Formas prismáticas preenchidas com o concreto reparado.....	59
Figura 24 – Formas cilíndricas preenchidas com os concretos reparados.....	60
Figura 25 – Medição do abatimento do tronco de cone	61
Figura 26 – Ensaio de massa específica do concreto fresco	62
Figura 27 – Configuração do ensaio de resistência à compressão no concreto.	64

Figura 28 – Configuração utilizada no ensaio de módulo de elasticidade do concreto.	65
Figura 29 – Ensaio de tração por compressão diametral.	66
Figura 30 – Argamassa após retirada de molde tronco cônico	67
Figura 31 – Medida do índice de consistência dos compósitos.....	68
Figura 32 – Ensaio de massa específica no estado fresco	69
Figura 33 – Configuração dos ensaios de compressão dos compósitos.....	70
Figura 34 – Capeamento de corpos de prova de compressão.....	71
Figura 35 – Ensaio de compressão diametral da argamassa	72
Figura 36 – Ensaio de flexão de 4 pontos nos compósitos.	74
Figura 37 – Ensaio de compressão diametral do conjunto reparado.	75
Figura 38 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de cisalhamento oblíquo.	76
Figura 39 – Influência do teor de metacaulinita na resistência à compressão dos compósitos.	81
Figura 40 – Influência do teor de aditivo polimérico na resistência à compressão dos compósitos.	81
Figura 41 – Influência do teor de metacaulinita no módulo de elasticidade dos compósitos.	82
Figura 42 – Influência do teor de aditivo polimérico no módulo de elasticidade das misturas.....	83
Figura 43 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M0 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.....	84
Figura 44 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M01 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.....	84
Figura 45 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.....	84
Figura 46 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M03 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.....	85
Figura 47 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02S1 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.	85
Figura 48 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02S1a na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.	85
Figura 49 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02S2 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.	86

Figura 50 – Influência do teor de metacaulinita na deflexão de primeira fissura.	87
Figura 51 – Influência do teor de aditivo polimérico na deflexão de primeira fissura.	88
Figura 52 – Influência do teor de metacaulinita na tensão de primeira fissura.	88
Figura 53 – Influência do teor de aditivo polimérico na tensão de primeira fissura. ..	89
Figura 54 – Influência do teor de metacaulinita na deflexão na ruptura.	90
Figura 55 – Influência do teor de aditivo polimérico na deflexão na ruptura.	91
Figura 56 – Influência do teor de metacaulinita na tensão máxima.	92
Figura 57 – Influência do teor de aditivo polimérico na tensão máxima.	93
Figura 58 – Influência do teor de metacaulinita na resistência à tração.	95
Figura 59 – Influência do teor de aditivo polimérico na resistência à tração.	96
Figura 60 – Ruptura dos corpos de prova de compressão diametral.	96
Figura 61 – Aspecto da ruptura dos corpos de prova de concreto	97
Figura 62 – Influência do teor de metacaulinita na resistência de aderência à tração, aos 28 dias, dos conjuntos reparados.	99
Figura 63 – Influência da idade de ensaio na resistência à tração dos corpos de prova da Rugosidade 1	100
Figura 64 – Influência do teor de aditivo polimérico na resistência de aderência à tração do conjunto reparado.	100
Figura 65 – Ruptura dos corpos de prova da mistura M01 reparados de compressão diametral.	101
Figura 66 – Ruptura dos corpos de prova reparados da mistura M02S1 com presença de adesivo sintético.	102
Figura 67 – Influência do teor de metacaulinita do reparo na resistência à compressão do conjunto reparado.	103
Figura 68 – Influência do teor de aditivo polimérico do reparo na resistência à compressão.	104
Figura 69 – Modos de ruptura para mistura M0, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.	104
Figura 70 – Modos de ruptura para mistura M01, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.	105
Figura 71 – Modo de ruptura para mistura M02, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.	105
Figura 72 – Modo de ruptura para mistura M02S1a, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.	106
Figura 73 – Modos de ruptura para a mistura M03, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.	106
Figura 74 – Influência do teor de metacaulinita do reparo na tensão de cisalhamento	108

Figura 75 – Influência do teor de aditivo polimérico do reparo na tensão de cisalhamento.	109
Figura 76 – Influência do teor de metacaulinita do reparo na tensão normal.	110
Figura 77 – Influência do teor de aditivo polimérico na tensão normal.	111
Figura 78 – Correlação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal.	112
Figura 79 – Influência do teor da metacaulinita na coesão.	113
Figura 80 – Correlação entre as resistências de aderência encontradas nos ensaios de cisalhamento oblíquo e compressão diametral.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Óxidos presentes no cimento	41
Tabela 2 – Quantidade de materiais utilizados na fabricação do concreto.	44
Tabela 3 – Composição química da metacaulinita.	48
Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra	49
Tabela 5 – Proporção dos ingredientes utilizados nos compósitos.	52
Tabela 6 – Proporção de ingredientes utilizados nas misturas.	52
Tabela 7 - Valores da rugosidade (h) superficial nos prismas utilizados nos ensaios de slant shear.....	58
Tabela 8 - Valores da rugosidade superficial (h) nos corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de compressão diametral.	58
Tabela 9 – Resultados de consistência e massa específica dos compósitos e concreto no estado fresco.	77
Tabela 10 – Resultados de massa específica, porosidade e absorção de água dos compósitos e concreto endurecidos.	78
Tabela 11 – Resistência à compressão e modulo de elasticidade do concreto.	79
Tabela 12 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos. .	80
Tabela 13 – Resultados das tensões e deflexões de primeira fissura.....	86
Tabela 14 – Resultados da capacidade de deflexão dos compósitos.	89
Tabela 15 – Resultados das tensões máximas dos compósitos nos ensaios de flexão.....	92
Tabela 16 – Resistência à tração por compressão diametral, medida por compressão diametral, do concreto e compósitos estudados	94
Tabela 17 – Resultado dos ensaios de compressão diametral dos conjuntos reparados.	98
Tabela 18 – Resistências à compressão dos conjuntos reparados.....	103
Tabela 19 – Resistências de aderência dos conjuntos reparados	107
Tabela 20 – Tensões normais dos conjuntos reparados	110

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
Objetivos	17
Objetivo geral	17
Objetivos específicos	18
Estrutura da dissertação	18
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1 Características dos materiais de reparo	19
1.2 Ligação interfacial no material reparado	20
1.3 Transferência de esforços em uma ligação reparada	21
1.3.1 Aderência por adesão	22
1.3.2 Aderência por atrito	23
1.4 Ensaio utilizados para medir a aderência concreto-reparo	23
1.4.1 Ensaio de tração por compressão diametral	27
1.4.2 Ensaio de cisalhamento oblíquo (Slant shear)	27
1.5 Rugosidade do substrato de concreto	29
1.6 Compósitos cimentícios com elevado desempenho na tração	31
1.6.1 Fibras	32
1.6.2 Metacaulinita	35
1.8 Uso de compósitos cimentícios reforçados com fibras como material de reparo	36
2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
2.1 Introdução	39
2.2 Fabricação do substrato de concreto	40
2.2.1 Materiais	40
2.2.1.1. Cimento	40
2.2.1.2. Agregado miúdo	41
2.2.1.3. Agregado graúdo	42
2.2.1.4. Água	43
2.2.2 Moldagem do concreto	43
2.3 Fabricação do material de reparo	47

2.3.1 Materiais	47
2.3.1.1 Cimento	47
2.3.1.2 Metacaulinita	47
2.3.1.3 Agregado miúdo	48
2.3.1.4 Fibras	49
2.3.1.5 Água	50
2.3.1.6 Superplastificante	50
2.3.1.7 Aditivo polimérico	51
2.3.2 Moldagem dos compósitos cimentícios reforçados com fibras	51
2.4 Fabricação do material composto (concreto-reparo)	55
2.4.1 Tratamento superficial do substrato de concreto	55
2.4.2 Aplicação do reparo e formação do corpo de prova composto	58
2.5 Ensaios de caracterização do substrato de concreto	60
2.5.1. Propriedades do concreto fresco	60
2.5.1.1. Consistência	60
2.5.1.2. Massa específica	61
2.5.2 Propriedades do concreto endurecido	63
2.5.2.1 Massa específica, porosidade e absorção de água	63
2.5.2.2. Compressão axial	63
2.5.2.3 Tração por compressão diametral	66
2.6 Ensaios de caracterização dos compósitos cimentícios reforçados com fibras	67
2.6.1 Propriedades dos compósitos cimentícios no estado fresco	67
2.6.1.1 Consistência	67
2.6.1.2 Massa específica	68
2.6.2 Propriedades dos compósitos cimentícios no estado endurecido ..	69
2.6.2.2 Massa específica, densidade aparente e absorção de água	69
2.6.2.3 Compressão axial	70
2.6.2.4 Tração por compressão diametral	71
2.6.2.5 Flexão	73
2.7 Ensaios de aderência no concreto reparado	74
2.7.1 Tração por compressão diametral	74
2.7.2 Cisalhamento oblíquo (slant shear)	75
3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	77

3.1 Propriedades físicas do concreto e compósitos	77
3.1.1 Propriedades no estado fresco	77
3.1.2 Propriedades no estado endurecido	78
3.2 Propriedades mecânicas do concreto e compósitos	79
3.2.1 Compressão axial	79
3.2.1 Flexão	83
3.2.1 Compressão diametral	93
3.2 Aderência concreto-compósito	97
3.2.1 Ensaio de tração por compressão diametral	97
3.3 Ensaio de cisalhamento oblíquo nos conjuntos reparados	102
3.3.1 Resistência à compressão	102
3.3.1.1 Tipos de ruptura	104
3.3.2 Resistência de aderência	107
3.3.3 Tensões normais	109
3.3.4 Coesão e fricção	111
3.3.5 Correlação entre os ensaios de compressão diametral e slant shear	113
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
4.1 Conclusões	115
4.2 Sugestões para trabalhos futuros	116
REFERÊNCIAS	118

INTRODUÇÃO

Problemas de infraestrutura vem sendo enfrentado por diversos países, que acabam por exigir amplo investimento orçamentário para manutenção, reparo, reabilitação e modernização. A deterioração das estruturas de concreto tem sido observada não apenas em regiões sãs do concreto (seja infraestrutura ou superestrutura), mas também em intervenções de reparo afetadas por descolamento da interface substrato-reparo e por sua baixa compatibilidade, que aumentam a fragilidade do reparo ao ataque ambiental e aos processos internos de deterioração físico-química (ZANOTTI *et al.*, 2014).

A garantia de uma boa aderência dos materiais de reparo é essencial quando se trata de aplicação de reparos de concreto. A resistência e a integridade da ligação dependem não apenas do preparo adequado da superfície, como sua rugosidade e solidez, mas também, das propriedades físicas e químicas dos materiais empregados como reparo.

Apesar da ampla gama de materiais e técnicas utilizadas para atender à demanda por reparos rápidos, econômicos e duráveis, apenas alguns deles conseguem abordar efetivamente os problemas decorrentes da natureza frágil dos concretos convencionais (SANTOS *et al.*, 2013). Entre esses materiais, destaca-se o compósito cimentício otimizado (ECC), que é um dos tipos de compósitos cimentícios reforçados com fibras, que apresenta um comportamento de endurecimento na tração direta (do inglês, strain hardening cementitious composites, SHCC), alta ductilidade e capacidade de resistir a danos sob carga mecânica, incluindo tensões uniaxiais e forças de cisalhamento.

O SHCC tem sido fabricado com uma grande variedade de adições minerais, tais como a cinza volante e a escória de alto forno, que são responsáveis por diminuir a quantidade de cimento utilizada no compósito (LI, 2019) e, conseqüentemente, diminuir a quantidade de dióxido de carbono emitida na atmosfera (LOPES, 2019). A proposta deste estudo é utilizar a metacaulinita como adição mineral na mistura do SHCC. A metacaulinita pode afetar as propriedades mecânicas do material, devido à sua composição química. Se utilizada em teores adequados, as propriedades dos materiais

cimentícios, como a porosidade, a permeabilidade, calor de hidratação e maior resistência à compressão em idades avançadas, podem ser melhoradas (SANTANA *et al.*, 2022). Assim, é importante avaliar a sua influência em materiais de reparo.

Além de avaliar a influência da metacaulinita na resistência de aderência entre o concreto e um reparo, diversos testes podem ser utilizados para verificar essa resistência, apesar da normatização desses experimentos ainda ser, de certa forma, limitada. Além disso, também pode ser observada a falta de estudos comparativos entre esses diversos testes, com a finalidade do estabelecimento do método mais apropriado para o cálculo da aderência de reparos estruturais e aprimoração de testes visando outros materiais e ensaios de campo (BRAUSTEIN, 2020). Neste sentido, diversos métodos de teste foram propostos para avaliar as propriedades de adesão e o desempenho geral dos materiais de reparo. Esses métodos incluem testes de tração, cisalhamento oblíquo, twist-off, flexão e os testes de aderência desenvolvidos por diversos pesquisadores (BEUSHAUSEN *et al.*, 2008). No entanto, é importante destacar que cada teste é influenciado por diferentes combinações de fatores e, isoladamente, não consegue fornecer uma visão completa da situação.

Objetivos

Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de compósitos cimentícios reforçados com fibras e com adição de metacaulinita quando utilizado como reparo estrutural do concreto. Para isso, alguns parâmetros serão avaliados, tais como, a influência do teor de metacaulinita e o uso de um aditivo polimérico nas misturas dos compósitos. Além disso, serão utilizados dois diferentes ensaios para medir a aderência concreto-compósito.

Objetivos específicos

- Verificar a influência do teor de metacaulinita e de aditivo polimérico nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados com fibras;
- Verificar a influência do teor de metacaulinita e do uso do aditivo polimérico na resistência de aderência do conjunto reparado (concreto-compósito);
- Analisar três tipos de rugosidade na resistência de aderência concreto-compósitos;
- Medir a resistência de aderência por dois ensaios diferentes, compressão diametral e cisalhamento oblíquo;
- Medir a coesão e coeficiente de fricção dos conjuntos reparados pelos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento oblíquo;

Estrutura da dissertação

Esse trabalho possui quatro capítulos. Na revisão bibliográfica, primeiro capítulo, é realizada uma ampla revisão de trabalhos previamente publicados nacionalmente e internacionalmente.

O segundo capítulo abrange os materiais e métodos utilizados no programa experimental do estudo.

O terceiro capítulo apresenta os resultados da caracterização do concreto e compósitos, além de apresentar e discutir os resultados dos ensaios realizados.

No quarto capítulo, as conclusões obtidas com o estudo são apresentadas.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Características dos materiais de reparo

Embora haja uma ampla variedade de materiais para reparo de estruturas de concreto disponíveis no mercado e considerados duráveis, o desempenho desses materiais nem sempre é consistente e uma grande parcela dos reparos utilizando materiais tradicionais de concreto acabam falhando em serviço (JÚLIO *et al.*, 2004).

Segundo Santos *et al.* (2013), o desafio reside em introduzir materiais capazes de resolver os problemas de deterioração dos materiais subjacentes e atender aos requisitos de durabilidade, mesmo em condições ambientais adversas, principalmente em infraestruturas frequentemente submetidas a sobrecargas, como tabuleiros de pontes, pavimentos de autoestradas, estacionamentos e pistas de aeroportos.

Estruturas de concreto são geralmente reparadas e/ou reforçadas com a adição de uma nova camada de concreto. O revestimento de concreto é uma técnica amplamente difundida onde vigas e pilares são de forma parcial ou totalmente cobertos por uma nova camada de concreto. Santos *et al.* (2013) ressalta ainda que tabuleiros de pontes e lajes de edifícios, reforçadas através do aumento da sua espessura, são também exemplos típicos deste tipo de intervenção.

Porém, durante as últimas duas décadas, pesquisadores vêm sugerindo a possibilidade de utilizar um concreto com substituição parcial do cimento por resíduos industriais, como uma opção mais sustentável para o reparo, em comparação com o concreto convencional. Outra opção, segundo Zanotti *et al.* (2017), é o uso de compósitos cimentícios reforçados com fibras. Segundo o autor, diversos fatores influenciarão a adequação de um material para reparo, destacando-se a resistência de aderência e a compatibilidade do concreto existente com o material de reparo.

1.2 Ligação interfacial no material reparado

No processo de reparo do concreto, a interface entre o concreto velho e o reparado constitui uma área frágil. As causas dos danos e as propriedades da interface determinam principalmente se a estrutura de concreto será reparada com sucesso. Segundo Espeche (2011), a falha dessa ligação geralmente ocorre em uma região que é semelhante à zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento de um concreto convencional. Na Figura 1 pode-se verificar as diferentes escalas de observação da zona de transição: (a) macroscópica, onde temos o substrato, a ligação concreto-reparo (zona de transição) e o reparo, (b) a escala meso, onde se observa a existência de uma zona de transição com três camadas que são apresentadas em (c). A primeira camada também é conhecida como camada de penetração e é composta principalmente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), é formada dentro do substrato do concreto e possui constituintes jovens que acabam reagindo com componentes químicos ainda ativos no concreto antigo. A segunda camada, por sua vez, é conhecida como a camada mais fraca, pois é formada por Ca(OH)_2 e cristais de etringinta (AFt) em formato de agulha, e, também, é caracterizada por possuir porosidade elevada e componentes cristalinos altamente orientados. Já terceira camada, ou camada inferior, possui quase a mesma microestrutura que o material de reparo.

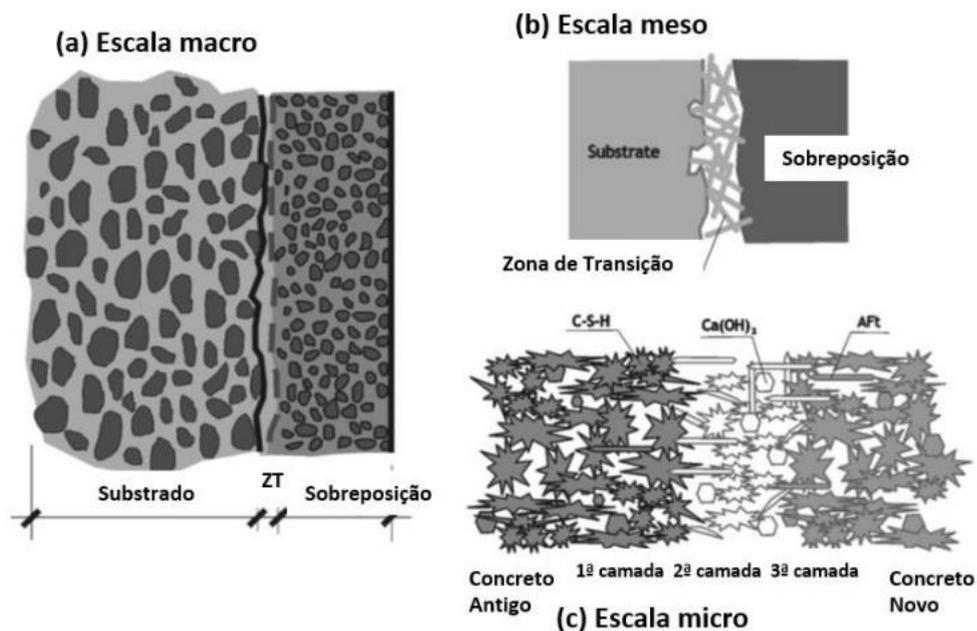


Figura 1 – Zona de transição (ESPECHE, 2011)

Adequada rugosidade do substrato de concreto e um suficiente tempo de cura da camada de reparo, ou seja, superior a 28 dias, são parâmetros importantes para garantir uma ligação interfacial eficaz (YILDIRIM *et al.*, 2015). Outro fator importante, segundo Wang *et al* (2018), é o uso de um reparo com elevada resistência, como o concreto de alto desempenho, pois o reparo com alta resistência tem a capacidade de suprimir o desenvolvimento de fissuras na interface. Apesar disso, uma maior resistência pode se tornar prejudicial, se não tiver deformabilidade adequada.

Zanotti *et al.* (2014) cita que a delaminação da nova camada de material deve ser evitada, no que diz respeito aos requisitos de durabilidade e facilidade de manutenção, para evitar a entrada de cloretos e outros mecanismos de degradação físico-química.

1.3 Transferência de esforços em uma ligação reparada

A transferência de esforços do material de reparo para o concreto torna-se um tópico relevante sempre que o material de reparo é lançado contra um

concreto existente, onde o processo de endurecimento já foi finalizado. A aderência adequada na interface entre materiais com diferentes idades é um fator chave para uma transferência de carga confiável entre as camadas novas e antigas e para a ativação dos materiais de reparo em estruturas existentes.

Segundo Espeche (2011), a ligação entre o concreto existente e o material de reparo pode ser atribuída a dois processos: o primeiro é a ligação química entre o substrato e o material de reparo, e o segundo é o deslizamento entre o concreto velho e o material de reparo, o qual gera atrito.

O principal fator que afeta o processo de ligação química é a interação na aderência entre o concreto velho e o material de reparo, enquanto o principal fator que afeta o segundo processo é o desempenho do material de reparo. Portanto, materiais de reparo adequados e boas propriedades de ligação da interface de reparo são necessários para o reparo bem-sucedido.

1.3.1 Aderência por adesão

Segundo Beushausen et. al., 2008, o mecanismo de adesão interfacial entre o substrato de concreto e o material de reparo ocorre através da incorporação de novos produtos de hidratação na interface. Se o efeito de incorporação é mais fraco que o do material de reparo ou substrato, então a ligação é fraca. As forças entre o substrato de concreto e o material de reparo incluem as forças de van der Waals e o travamento mecânico em nível microscópico, no qual o travamento mecânico é o principal contribuinte. A incompatibilidade entre o material de reparo e o concreto antigo pode levar à concentração de tensões na interface de reparo, de modo que o reparo se solte facilmente do substrato.

A adesão entre duas superfícies pode ser influenciada por diversos fatores, como a rugosidade da superfície, o tratamento da superfície de ligação, a cura adequada dos materiais e, até o uso de agentes adesivos que possam melhorar a qualidade dessa ligação. Segundo a literatura técnica a aderência por adesão será a primeira a ser mobilizada na presença da força cortante e surgirá durante as reações de pega do cimento, devido às ligações físico-químicas na

interface. Porém, somente a adesão não é suficiente para garantir uma boa aderência entre os materiais (LEONHARDT e MONNIG, 1993).

1.3.2 Aderência por atrito

Quando ocorre falha no processo de ligação química, o atrito passa a desempenhar um papel importante. O desempenho do material de reparo é o principal fator que influencia o processo de aderência por atrito (ESPECHE, 2011). Portanto, para obter um reparo bem-sucedido, é essencial utilizar materiais de reparo adequados e garantir boas propriedades de ligação na interface de reparo.

O atrito é afetado por diversos fatores, principalmente, pela forma e tamanho dos agregados. O coeficiente de atrito será maior em agregados graúdos e angulares. Souza (2009) cita também outros fatores que podem influenciar no atrito entre a camada de reparo e o substrato:

- Rugosidade da superfície: o coeficiente de atrito aumenta junto com a rugosidade;
- Resistência a compressão do concreto;
- Tensão de compressão aplicada externamente à ligação: quanto maior a tensão normal de compressão aplicada maior a rigidez ao corte da ligação;
- Existência de cargas cíclicas: a presença de cargas alternadas deteriora o comportamento da junta, aumentando os deslocamentos devidos às tensões cisalhantes.

1.4 Ensaios utilizados para medir a aderência concreto-reparo

A dispersão dos resultados dos testes de aderência encontrados na literatura é bastante ampla. Além da ampla variedade de parâmetros relacionados aos materiais e aos fatores de preparação da superfície, existem diversas configurações de teste de aderência. Essas configurações podem variar

entre testes de tração, cisalhamento ou uma combinação de cisalhamento com compressão na interface, o que gera uma maior variabilidade nos dados de resistência de aderência.

Na literatura encontram-se os seguintes ensaios para medir a aderência de um material de reparo a um substrato de concreto:

- Ensaio push off;
- Ensaio de cisalhamento por flexão;
- Ensaio de tração direta;
- Ensaio de tração indireta;
- Ensaio de cisalhamento oblíquo (slant shear);
- Ensaio de arrancamento (pull off);
- Ensaio de tração na flexão;
- Ensaio de corpo de prova composto de três primas;

Beushasen *et al.* (2008) apresenta na Figura 2 alguns esquemas de métodos de ensaios existentes para avaliação de resistência de aderência. Ele cita que o método mais comum de ensaio é o método pull-off que pode ser realizado na obra (a) e em laboratório (b). Apesar desse ensaio ser o mais popular, os resultados dos testes podem mostrar uma grande dispersão de resultados. Em (c) é apresentado um teste realizado na obra e que é equiparado ao ensaio de resistência ao cisalhamento da interface, em (d) e (e) é demonstrado um teste comum de cisalhamento, onde uma força paralela a interface é aplicada. Em (f) apresenta-se o ensaio Push-off, um método de teste com ligação por cisalhamento modificado.

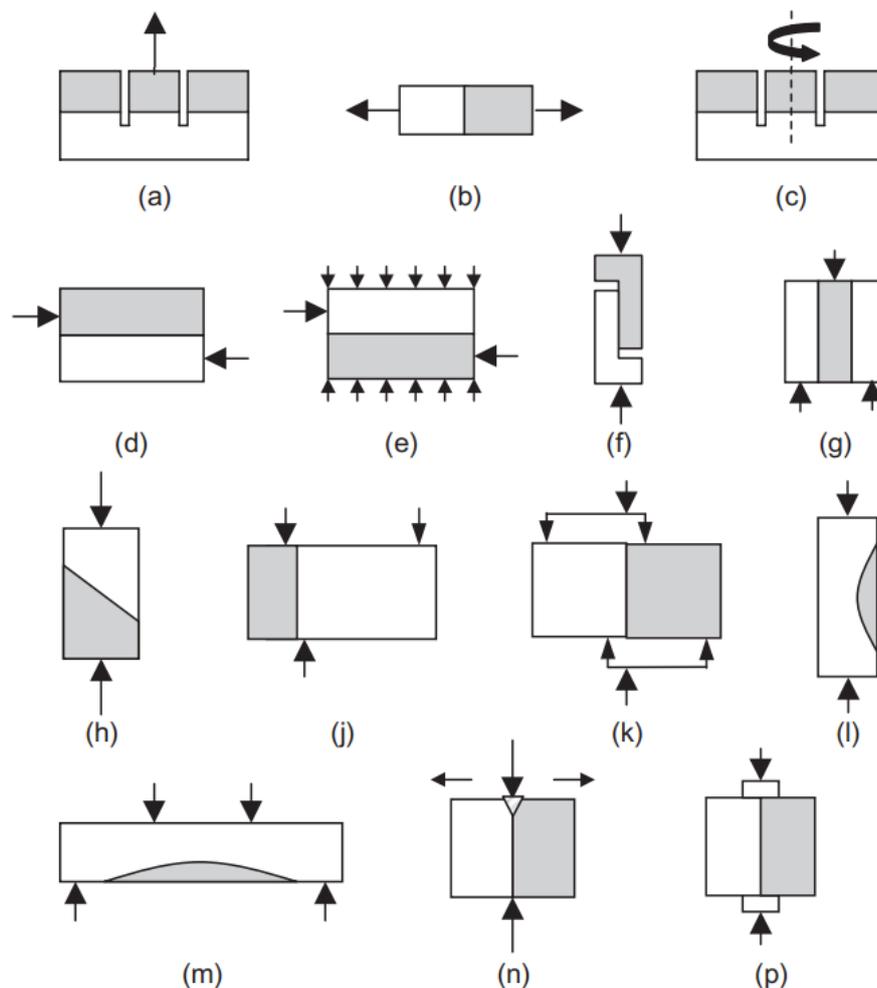


Figura 2 – Esquemas de vários métodos de teste para determinação de resistência à aderência (BEUSHASEN *et al.*, 2008).

O ensaio Push-out é apresentado em (g), que possui duas interfaces. Isso torna o ensaio menos praticável, por não representar as condições reais de um reparo estrutural. Em (h) o teste de cisalhamento oblíquo é apresentado, nele há uma combinação de compressão e cisalhamento para determinação da resistência de aderência. O teste da guilhotina é apresentado em (j) e pode ser utilizado tanto em núcleos quanto em prismas. Esse método de ensaio de cisalhamento possui a desvantagem de possuir um momento fletor na interface devido à excentricidade da força (BEUSHASEN *et al.*, 2008). Por isso o método (k) foi desenvolvido, nele a interface é, teoricamente, submetida a forças de cisalhamento puras. Em (l) e (m) tem-se ensaios que podem medir o cisalhamento da interface e a resistência à tração sob carga estrutural. Em (n) tem-se um dispositivo, para o teste de wedge splitting, que caracteriza a ligação

por parâmetros mecânicos de fratura, como abertura de fissura e energia específica de fratura e em (p) a resistência à tração indireta (splitting test) da interface é medida através de um dispositivo de teste de divisão de prisma.

Silfwerbrand (2023) cita a dificuldade de realizar alguns desses testes de aderência de forma rotineira, especialmente para fins de controle de qualidade. Assim, há um interesse em estabelecer fatores de conversão entre diferentes tipos de teste. Segundo Zanotti *et al.* (2019) o resultado de um teste é altamente sensível aos modos de ruptura, que só podem ser abordados em configurações de teste que permitem a ruptura na ligação concreto-reparo (ruptura por separação das camadas), ao invés da ruptura do material (seja no substrato ou no reparo). Além disso, os fatores de correlação que podem ser aplicados ao concreto convencional precisam ser reavaliados quando se trata de reparos especializados, como concreto de alta resistência ou compósitos reforçados com fibras.

O teste Pull-off possui fácil realização e, portanto, é comumente adotado, mas a variabilidade dos resultados levanta preocupações quanto à sua confiabilidade para avaliação de aderência e controle de qualidade. Falha fora da interface (normalmente, no substrato) é frequentemente observado de modo que, em tais casos, são gerados valores de limite inferior para a resistência de aderência (ZANOTTI *et al.*, 2019).

Zanotti *et al.* (2019) também compara os ensaios Push-out e o ensaio de cisalhamento oblíquo. É citado que a resistência ao cisalhamento no teste Push-out traz resultados menores que os obtidos nos ensaios de cisalhamento oblíquo, principalmente devido aos efeitos de atrito no teste de cisalhamento oblíquo e à leve flexão devido a pequenas excentricidades no teste Push-out. Embora o teste de cisalhamento inclinado permita uma coleta de dados mais consistente/simples, o teste Push-out é mais representativo do comportamento de cisalhamento puro e sem atrito.

Apesar dessa ampla gama de ensaios disponíveis na literatura, a normatização dos mesmos ainda é uma questão. Boa parte desses ensaios é realizado através da adaptação de outros ensaios normatizados. O único ensaio devidamente normatizado é o ensaio de cisalhamento oblíquo (Slant shear).

No próximo tópico serão descritos com mais detalhes os testes de tração por compressão diametral e cisalhamento oblíquo, que são os focos do trabalho.

1.4.1 Ensaio de tração por compressão diametral

Nesse método, os corpos de prova cilíndricos ou prismáticos são formados por duas metades de materiais diversos, um concreto a ser reparado, e o outro, o material de reparo. Os corpos de prova compostos são submetidos a um esforço de tração por compressão diametral (ver a Figura 3). Assim, o plano de aderência fica sujeito a um estado de tensões biaxiais ao longo da interface. Braustein (2020) cita, que a tensão de ruptura medida no experimento é, no máximo, igual à tensão de tração do material mais fraco, ou seja, o concreto ou o material de reparo.

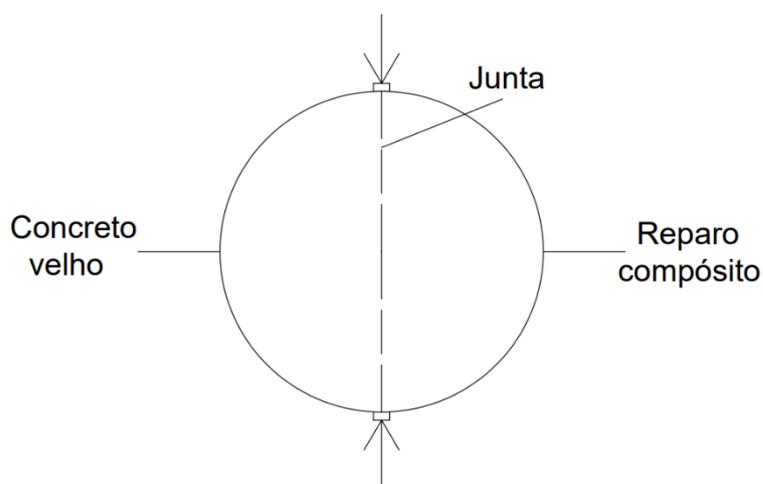


Figura 3 – Ensaio de tração por compressão diametral em concretos reparados

1.4.2 Ensaio de cisalhamento oblíquo (Slant shear)

O teste de cisalhamento oblíquo, normatizado pelas normas EN12615 (2000) e ASTM C882 / C882M (2015) envolve o uso de um cilindro (ASTM C882 / C882M, 2015) ou prisma (EN12615, 2000) composto por duas metades idênticas ligadas em um ângulo de 30 graus com o plano vertical do corpo de prova, conforme figura 4, sendo submetido a uma carga de compressão axial. O

ensaio de cisalhamento oblíquo é o único ensaio de aderência normatizado existente.

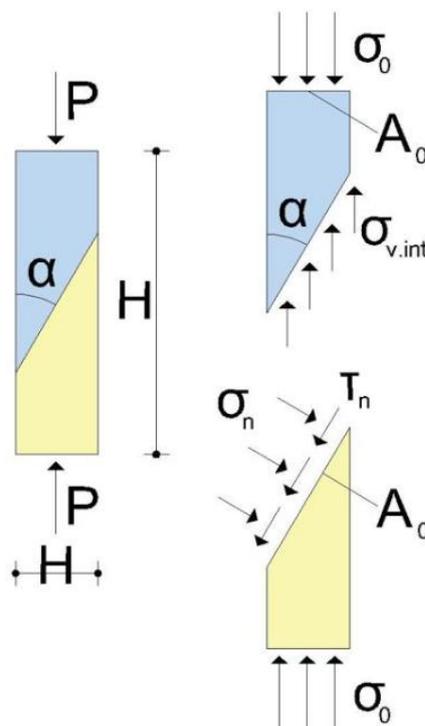


Figura 4 – Ensaio de cisalhamento oblíquo.

Isso resulta em um estado combinado de tensões de cisalhamento e compressão ao longo da interface, conforme ilustrado na Figura 4. Além do ângulo padrão do plano de ligação de 30 graus, e, para fins de qualificação de um material, podem ser considerados ângulos adicionais de inclinação, como o de 25 graus e o de 20 graus (ZANOTTI *et al.*, 2018). No entanto, uma vez que a resistência de aderência pode ser influenciada pela área de contato na qual a carga é transmitida, a área de contato deve ser ajustada para manter uma área de contato de aderência semelhante.

Segundo Zanotti *et al.* (2014), no ensaio de cisalhamento inclinado, é adequado manter uma distância mínima igual ao diâmetro da amostra entre a base do cilindro e o início da interface. Isso visa promover uma transferência uniforme de tensões na interface de reparo, e evitar os efeitos do atrito entre a placa de carregamento e o corpo de prova. Na falta disso, ocorreria uma distribuição indesejada de tensão triaxial na área de análise do corpo de prova.

Nos testes de cisalhamento oblíquo é utilizado, além do corpo de prova composto, formado pelo concreto e o reparo, um corpo de prova de referência, somente de concreto.

Zanotti *et al.* (2014) cita que os dois corpos de prova precisam ter as mesmas dimensões, de modo que as cargas de ruptura obtidas nesses dois testes sejam comparáveis.

Segundo a norma BS EN 12615 (1999), os modos de ruptura que podem acontecer no experimento de cisalhamento oblíquo são:

- Ruptura coesiva em qualquer um dos substratos de concreto,
- Ruptura por adesão em uma das interfaces de concreto,
- Ruptura coesiva do adesivo,
- Ruptura por adesão em ambas as interfaces de concreto.

Outros autores, como Momayez *et al.* (2005), definem os modos de ruptura utilizando diferentes critérios, como a localização da fratura. Dessa forma, a ruptura pode acontecer na ligação, ruptura total da peça, ou de maneira parcial, seja no concreto ou no reparo.

Zanotti *et al.* (2017) definiu, por sua vez, os modos de ruptura como:

- Ruptura parcial do substrato,
- Ruptura na ligação com separação do substrato próximo a interface,
- Ruptura na ligação com ruptura parcial em ambas as partes de substrato e reparo,
- Ruptura na ligação com ruptura parcial do reparo,
- Ruptura na ligação.

1.5 Rugosidade do substrato de concreto

Segundo Monteiro (1993), é válido presumir que a resistência mecânica da aderência do concreto novo ao antigo depende grandemente da ligação entre o concreto novo e a superfície de reparo. Essa ligação está diretamente relacionada a rugosidade do substrato, que se feita de maneira inadequada pode acarretar uma interface ineficaz.

Existem várias técnicas conhecidas de preparação de superfície amplamente utilizadas para obter diferentes graus de rugosidade, como:

superfície lisa, exposição de agregados graúdos, uso de vergalhão pós-instalado, jateamento de areia, uso de escova de arame e furos de perfuração.

Zhang *et al.* (2020) realizaram um estudo da resistência de aderência utilizando cinco tipos diferentes de preparação da superfície (exposição de agregados graúdos, superfície lisa, com furos de perfuração, com uso de escova de arame e com uso de vergalhão (pós-instalado) e confirmaram que a preparação com exposição de agregados graúdos na superfície do substrato de concreto teve o maior impacto na melhoria da resistência da ligação interfacial. No entanto, os autores ressaltam que, além do tratamento na superfície, é importante garantir uma idade de cura adequada para o reparo (superior a 28 dias) para o desenvolvimento da resistência de união interfacial. O umedecimento adequado do substrato de concreto também contribui para o aumento da resistência de aderência (CARBONELL MUNOZ *et al.*, 2014). Além disso, alguns materiais, como adesivos, são utilizados como ponte de aderência. Esses materiais serão responsáveis por melhorar a aderência entre os materiais em que são empregados.

A pesquisa realizada por Robins *et al.* (1995) revelou que as falhas de aderência ocorrem apenas em substratos relativamente lisos. Além disso, a presença de nata na superfície do concreto é prejudicial à aderência entre o concreto novo e o reparo, reduzindo significativamente a sua eficácia. Portanto, é essencial remover essa camada antes de realizar o reparo do concreto.

Dentre as técnicas citadas anteriormente, o tratamento com jateamento de água é reconhecido como um método eficaz de preparação de interface, resultando em uma aderência de maior resistência (ZHANG *et al.*, 2020). Por outro lado, técnicas como o desgaste com martelo pneumático, podem ser consideradas desfavoráveis, apesar de proporcionarem uma superfície de concreto mais rugosa (AUSTIN *et al.*, 1993). Os autores citam que a alta energia de impacto associada a essas técnicas pode levar à formação de microfissuras no substrato de concreto, resultando em uma área de aderência menos confiável e em concentração de tensões nessa região.

A utilização de métodos de tratamento menos agressivos é aconselhável para substratos de concreto com baixa resistência mecânica, a fim de evitar a formação de fissuras na camada superficial adjacente. No entanto, em concretos de alta resistência mecânica, é recomendado um tratamento mais agressivo,

pois isso aumenta significativamente o perfil da superfície e melhora o intertravamento mecânico entre o concreto novo e o antigo (ZHANG *et al.*, 2020).

Por outro lado, além de melhorar o intertravamento mecânico, um aumento na rugosidade da interface também pode acarretar uma maior porosidade devido a falhas durante o tratamento da superfície. Dessa forma, é importante considerar esses aspectos ao selecionar o método de tratamento adequado para obter uma aderência eficaz e duradoura entre a camada de reparo e o substrato.

1.6 Compósitos cimentícios com elevado desempenho na tração

Os compósitos cimentícios reforçados com fibra com comportamento de “strain hardening” (SHCC) exibem melhor comportamento quando submetidos a cargas de tração direta, quando comparado a outros compósitos e concretos. Ele apresenta elevada ductilidade com capacidade de deformação muitas vezes superior a 3%, formação de fissuras múltiplas e com pequenas aberturas. Estas características são alcançadas pelo efeito de endurecimento por tração, após o aparecimento das primeiras fissuras (PAN *et al.*, 2022). Segundo Ahmed *et al.* (2007), devido a estas características, estes compósitos apresentam uma durabilidade superior, quando comparado aos concretos e argamassas de cimento Portland.

O comportamento do SHCC tem sido estudado consideravelmente nos últimos anos. Seu alto desempenho é alcançado pela otimização dos componentes da mistura e dosagem do compósito, a qual é baseada em modelos micromecânicos. A aplicação do SHCC em componentes de pontes e edifícios foi considerada com sucesso. No entanto, em comparação com misturas de concreto convencionais, as misturas de SHCC exigem mais cimento para aumentar a resistência de aderência interfacial fibra-matriz e, também, para compensar a ausência de agregado graúdo no projeto da mistura. Esse elevado teor de cimento cria impactos ambientais negativos, devido às elevadas emissões de dióxido de carbono na fabricação do cimento (LIU *et. al.*, 2020).

Uma possível solução para este problema é substituir o cimento por subprodutos industriais, como metacaulinita e cinzas volantes. Os compósitos cimentícios otimizados (ECC), também conhecidos como compósitos cimentícios de ultra alta tenacidade (UHTCC), são tipos de SHCC, que, em geral, são fabricados com a substituição parcial do cimento por subprodutos industriais.

As estruturas reforçadas ou reparadas com SHCC demonstram uma excelente resistência à corrosão, devido à sua capacidade de retardar efetivamente a infiltração de meios corrosivos através da microfissuração múltipla sob tensão (HOU *et al.*, 2017). Em geral, o SHCC apresenta uma resistência à compressão próxima à do concreto convencional. Recentemente, foram desenvolvidos alguns compósitos do tipo SHCC, com resistência a compressão elevada, os quais são conhecidos como compósitos cimentícios otimizados com elevado desempenho.

Esses compósitos são conhecidos por sua resistência à compressão superior a 120 MPa e resistência à tração acima de 7 MPa. Com a combinação de ultra-alta resistência à compressão, propriedades de tração excepcionais e durabilidade elevada, eles surgem como um material promissor para a criação de reforços leves e duráveis (YU *et al.*, 2019).

Segundo YU *et al.*, (2018), a obtenção de um SHCC envolve a mistura de proporções adequadas de cimento Portland, adições minerais, areia fina, água e redutor de água, juntamente com uma determinada fração volumétrica de fibras (em torno de 2%). Foi comprovado que as propriedades mecânicas do SHCC são principalmente influenciadas pelo teor da adição mineral, relações água/aglutinante e areia/aglutinante na mistura, além do tipo e fração volumétrica de fibras utilizadas como reforço.

1.6.1 Fibras

Fibras de álcool polivinílico (PVA) ou polipropileno (PP) são frequentemente empregadas para aprimorar o desempenho de tração dos SHCC. Com o uso de fibras de PVA ou PP, é possível alcançar uma resistência à tração superior a 6 MPa e uma capacidade de deformação de tração superior a 2% (LIN *et al.*, 2020).

No contexto da produção, as fibras de PVA tratadas com uma camada de óleo são as mais amplamente utilizadas devido à sua boa dispersibilidade, propriedades interfaciais adequadas (ARAIN *et al.*, 2019) e maior resistência à tração em comparação com as fibras de PP (FELOKOKGLU, 2014). Ao aplicar um revestimento oleoso na superfície das fibras de PVA, a adesão interfacial entre a fibra e a matriz é reduzida, visando melhorar a ductilidade na tração do SHCC. A ruptura sob cargas de tração do SHCC reforçado com fibras de PVA ocorre quando a fibra é arrancada da matriz.

Por outro lado, as fibras de PP apresentam uma forte ligação química com a matriz cimentícia (LIN *et al.*, 2020), o que resulta na ruptura do SHCC geralmente pela ruptura das fibras antes do arrancamento. Outro tipo de fibra também utilizada como reforço, é a fibra de polietileno (PE). A superfície da fibra de polietileno (PE) foi adaptada usando o tratamento de plasma, para aumentar a resistência à tração e a ductilidade do SHCC (YAN *et al.*, 2021).

O desempenho de tração e compressão do SHCC é influenciado pela quantidade de fibras presente. Em um estudo realizado por Lin *et al.* (2020), foi observado que, ao aumentar a fração de volume das fibras de PVA de 1,0% para 2,0%, a resistência à tração e a capacidade de deformação do SHCC aumentaram em aproximadamente 71% e 103%, respectivamente. Esse aumento ocorreu principalmente devido ao reforço proporcionado pela maior resistência ao arrancamento das fibras e à transferência de tensão da fibra para a matriz cimentícia. No entanto, quando a fração de volume foi aumentada de 2,0% para 2,5%, houve uma redução de 26% na resistência à tração e 18% na resistência à compressão do ECC.

A diminuição da resistência pode ser atribuída a defeitos iniciais na matriz devido à distribuição desigual das fibras, bem como à formação de grandes poros causadas pelo excesso de fibras (LIN *et al.*, 2020). Portanto, uma fração de volume de fibra ideal de 2% é frequentemente adotada na fabricação do SHCC (AL-GEMEEL, 2018).

A resistência à compressão e à flexão do SHCC com fibra PP mostrou um aumento conforme o teor de fibra variou de 0% para 2%, sendo observado um comportamento de endurecimento à flexão para o compósito contendo 2% de fibra, enquanto um comportamento de amolecimento foi observado quando o teor de fibra foi reduzido para 1% (PAN *et al.*, 2015). De forma semelhante, o

aumento do teor de fibra de 1% para 2% resultou em um aumento linear na resistência à tração e na capacidade de deformação do compósito (SHI *et al.*, 2015).

A curva de tensão-deformação observada no ECC exibe três estágios distintos (Figura 5):

- 1) regime de elasticidade linear;
- 2) endurecimento; e
- 3) ruptura.

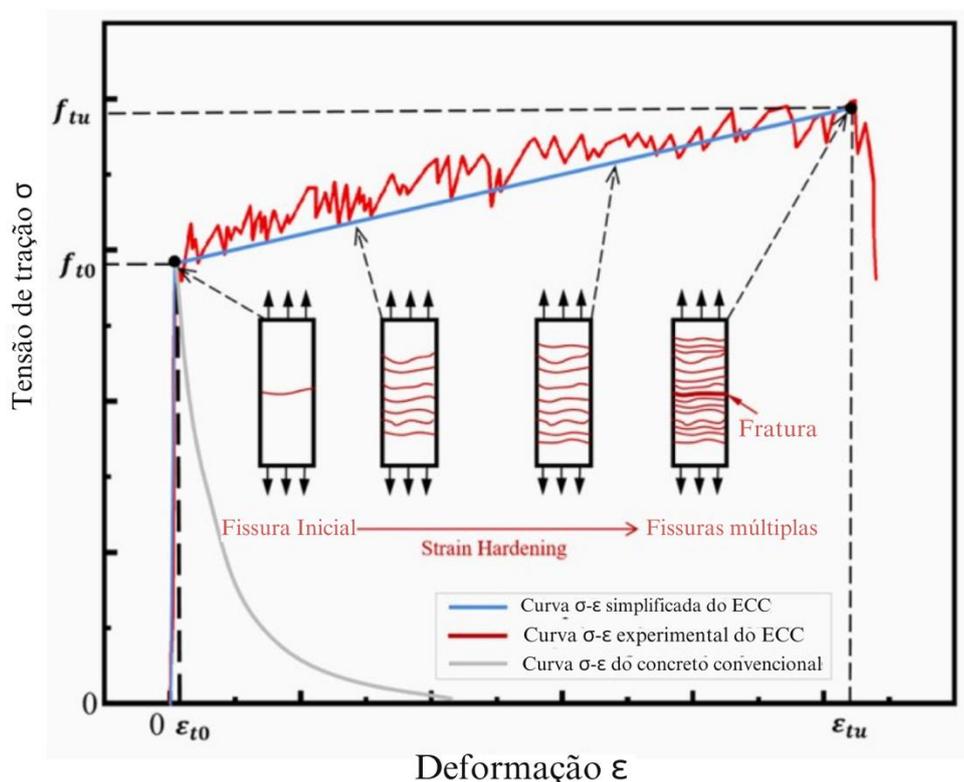


Figura 5 - Curva tensão-deformação observada no ECC (Pan *et al.*, 2022).

No regime de elasticidade linear, quando a tensão de tração atinge a resistência à fissuração (f_{t0}) da matriz surge uma fissura no ECC. À medida que a tensão de tração aumenta, o ECC apresenta um comportamento “strain hardening”, caracterizado pelo surgimento de múltiplas fissuras pequenas. Eventualmente, ocorre a falha ruptura do ECC, com o arrancamento ou ruptura da fibra na superfície de uma fissura principal.

Durante a compressão uniaxial, a curva tensão-deformação do SHCC apresenta um estágio inicial quase linear ascendente, seguido por um estágio de

amolecimento de tensão quase bilinear (XU *et al.*, 2010). A capacidade de deformação à compressão do SHCC é superior à do concreto de resistência normal. De acordo com Zhou *et al.* (2015), o pico de tensão de um ECC durante a compressão uniaxial varia entre 0,004 e 0,005 (aproximadamente o dobro do pico de tensão do concreto de resistência normal).

1.6.2 Metacaulinita

O metacaulim (MK) é uma pozolana ultrafina com propriedades pozolânicas semelhantes à sílica ativa condensada (WILD *et al.*, 1995). Esse material é obtido através da calcinação de argilas cauliníticas a temperaturas entre 500°C e 900°C. Segundo Khatib *et al.* (1998), diversos estudos mostraram que, ao usar MK como substituto parcial do cimento, ocorre um aumento significativo na resistência inicial e a longo prazo do concreto. Isso se deve ao fato de que o metacaulim atua como um filler, além de acelerar a hidratação inicial do cimento. Nos estágios iniciais de cura, ele consome rapidamente a cal hidratada produzida pela hidratação do cimento, resultando em produtos adicionais da reação cimentícia.

Também é alegado que o metacaulim aumenta a resistência à reação álcali-sílica, previne a eflorescência e melhora a resistência ao ataque ácido. Medidas de distribuição de tamanho de poros demonstraram que o aumento inicial da resistência está associado a uma considerável redução dos poros. O MK é utilizado de forma mais eficaz (em termos de aumento da resistência e refinamento dos poros) em níveis de substituição do cimento Portland baixos (0-15%). Análises termogravimétricas indicaram que a reação do MK ocorre mesmo quando ambos os reagentes ainda estão em excesso.

Comparado a outros materiais cimentícios suplementares, como sílica ativa, escória de alto forno e cinzas volantes, o metacaulim possui a maior taxa de ligação de íons cloreto, conforme relatado por Thomas *et al.* (2012). À medida que o teor de metacaulim aumenta, a taxa de ligação dos íons cloreto também aumenta. Além disso, o metacaulim pode refinar a estrutura de poros do concreto, reduzir os canais de transporte de íons cloreto e melhorar a resistência à penetração desses íons, como mencionado por Zeng *et al.* (2015). No entanto,

o teor de Al_2O_3 no cimento geralmente varia de 5% a 12%, enquanto o metacaulim pode chegar a 40% de teor de Al_2O_3 .

Com base nas propriedades relatadas do MK, é esperado que ele seja altamente eficaz na promoção da resistência ao sulfato. Um relatório recente de Asbridge *et al.* (2002) sobre ensaios de larga escala de concreto com MK em ambientes agressivos (até 3 anos) indica que o concreto com MK possui boa resistência ao sulfato. O MK difere quimicamente de muitas outras pozolanas, devido ao seu alto teor de alumina (42% Al_2O_3 e 51% SiO_2), e os produtos resultantes da reação com CH não se limitam apenas ao gel C-S-H, mas também incluem C_4AH_{13} , C_2ASH_8 e C_3AH_6 (KHATIB *et al.*, 1998). Além disso, se houver presença de sulfato, a etringita se forma rapidamente e subsequentemente se converte em monossulfato durante os estágios iniciais da hidratação. Essas reações, se não forem concluídas antes do endurecimento do sistema, podem levar a uma expansão substancial. De fato, Wild *et al.* (1995) demonstraram que, quando o caulim (que possui uma composição de óxidos semelhante ao MK, embora seja menos ativo) reage com cal e gesso, ocorre uma expansão significativa, resultante da formação de etringita.

Ao utilizar a metacaulinita na produção do SHCC, Santana *et al.* (2022) observou um maior ganho de resistência à compressão das misturas, entre as idades de 7 e 28 dias, se comparadas com a mistura de referência. Além disso, também foi observado, nos ensaios de flexão, que o aumento do teor de metacaulinita utilizado nas misturas proporcionou uma redução na deflexão da primeira fissura, na tensão da primeira fissura e na tensão máxima pós-fissuração. A capacidade de deflexão aumentou até a relação MK/C igual a 1, e para um maior teor, a capacidade de deflexão foi reduzida.

1.8 Uso de compósitos cimentícios reforçados com fibras como material de reparo

De acordo com estudos realizados por Kamada e Li (2000), Lin e Li (1997) e Zhang e Li (2010), os compósitos cimentícios otimizados (ECC) têm sido amplamente utilizados como camada de reparo em substratos de concreto

existentes. Foi observado que, em comparação com as coberturas convencionais de concreto e concreto reforçado com fibras, as camadas de reparo com ECC apresentam melhorias significativas na capacidade de carga e ductilidade dos sistemas (QIAN, 2007). Além disso, pesquisas conduzidas por Yucel *et al.* (2013) e Zhang e Li (2010) afirmaram que o uso de camadas de ECC elimina problemas comuns, como delaminação e formação de fissuras reflexivas, em sistemas de reparo.

De acordo com Li e Li (2011), Sahmaram *et al.* (2014) e Parker Jr. (1991), além das características de alta ductilidade, um material de reparo considerado "ideal" deve garantir uma aderência adequada ao material existente, alta resistência e baixa retração em idades iniciais. Segundo Şahmaran *et al.* (2014), a resistência de aderência, avaliada por meio de testes de cisalhamento inclinado, é maior quando se utiliza um ECC de resistência normal, produzidas com cinzas volantes e escória, em comparação com o concreto de microsílca (MSC), que é comumente utilizado para revestimentos, independentemente da textura da superfície aplicada, o que indica uma excelente capacidade de aderência dos ECC ao material do substrato (SAHMARAM *et al.*, 2014).

O método de fabricação do reparo em ECC influencia a aderência concreto-ECC. Segundo Wang *et al.* (2018), o ECC moldado no local apresenta uma maior resistência de aderência em comparação com o ECC pré-fabricado.

Segundo Wang *et al.* (2016), no caso do sistema de reparo/reforço com o ECC moldado no local, pode ser utilizado um primer (como uma pasta de cimento) para conectar o ECC ao substrato de concreto existente, enquanto o ECC pré-fabricado, pode ser aderido ao substrato de concreto existente, utilizando-se um agente de ligação. A utilização de primers ou agentes de ligação apropriados contribui para uma excelente aderência interfacial, fortalecendo o entrelaçamento mecânico ou a coesão entre o ECC e o concreto. Sui *et al.* (2018) cita que o adesivo de resina epóxi pode melhorar significativamente o comportamento de aderência, devido à forte coesão na interface.

Em um estudo realizado por Pan *et al.* (2022), observou-se que, com o aumento da resistência do concreto ou da rugosidade da superfície até 4 mm, as resistências de aderência aumentaram consideravelmente tanto para as interfaces ECC-concreto moldadas in loco, quanto para as interfaces pré-fabricadas. No entanto, quando a rugosidade da superfície foi aumentada para

5 mm, o aumento na resistência de aderência tornou-se menos perceptível e, em alguns estudos, até mesmo uma diminuição na resistência de aderência foi relatada. Esse estudo concluiu que uma rugosidade superficial em torno de 4 mm tinha o efeito ideal na melhoria da resistência de aderência concreto-reparo.

A ligação entre o ECC projetado e o concreto existente geralmente ocorre apenas por meio do contato superfície a superfície, e a resistência de aderência é principalmente resultado do atrito e do intertravamento mecânico. Portanto, uma superfície de substrato de concreto mais rugosa resultará em um atrito mais forte e um maior efeito de bloqueio mecânico, aumentando assim a resistência ao cisalhamento da interface ECC-concreto (TIAN *et al*, 2019).

No caso das camadas de reparo pré-fabricadas, aumentar a rugosidade da superfície do ECC pré-fabricado é um método eficaz para melhorar a ligação interfacial. Além disso, uma maior resistência do ECC, utilizado como reparo, contribui para uma maior resistência de ligação no cisalhamento interfacial (TIAN *et al.*, 2019). Foi comprovado que a preparação da superfície do substrato de concreto, a resistência do concreto, a umidade do substrato de concreto e a idade de cura do UHPC, utilizado como reparo têm impacto significativo na resistência de ligação das interfaces UHPC-concreto.

Madeiro (2019) realizou um estudo comparativo da utilização de argamassas industrializadas e SHCC como reparo estrutural. A partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento oblíquo pôde-se observar que as argamassas comerciais obtiveram melhor desempenho, o que é justificável pelas características dos reparos industrializados. Além disso, também foi estudada a influência do tamanho das fibras de PVA (8mm e 12mm) e sua quantidade no compósito (0%, 1% e 2%). A autora encontrou que a resistência de aderência caiu em cerca de 3% com a adição de 2% de fibra com 12mm, quando comparado com o compósito sem fibra. A resistência de aderência também foi reduzida quando ela utilizou 1 e 2% de fibras com 8mm. Este desempenho foi justificado pela baixa rugosidade superficial dos corpos de prova. No entanto, Braustein (2020) concluiu em seu estudo que a utilização de fibras de PVA acarretaram um aumento na resistência de aderência concreto-SHCC, principalmente quando uma ponte de aderência foi utilizada. Além disso, também foi observado que o maior envelhecimento (120 dias), quando comparado aos 28 dias, também acarretou um ganho de resistência de aderência.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Introdução

Nesse capítulo será apresentada a metodologia (Figura 6) conduzida no preparo de amostras e ensaios experimentais realizados para essa dissertação. Esse estudo foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ.

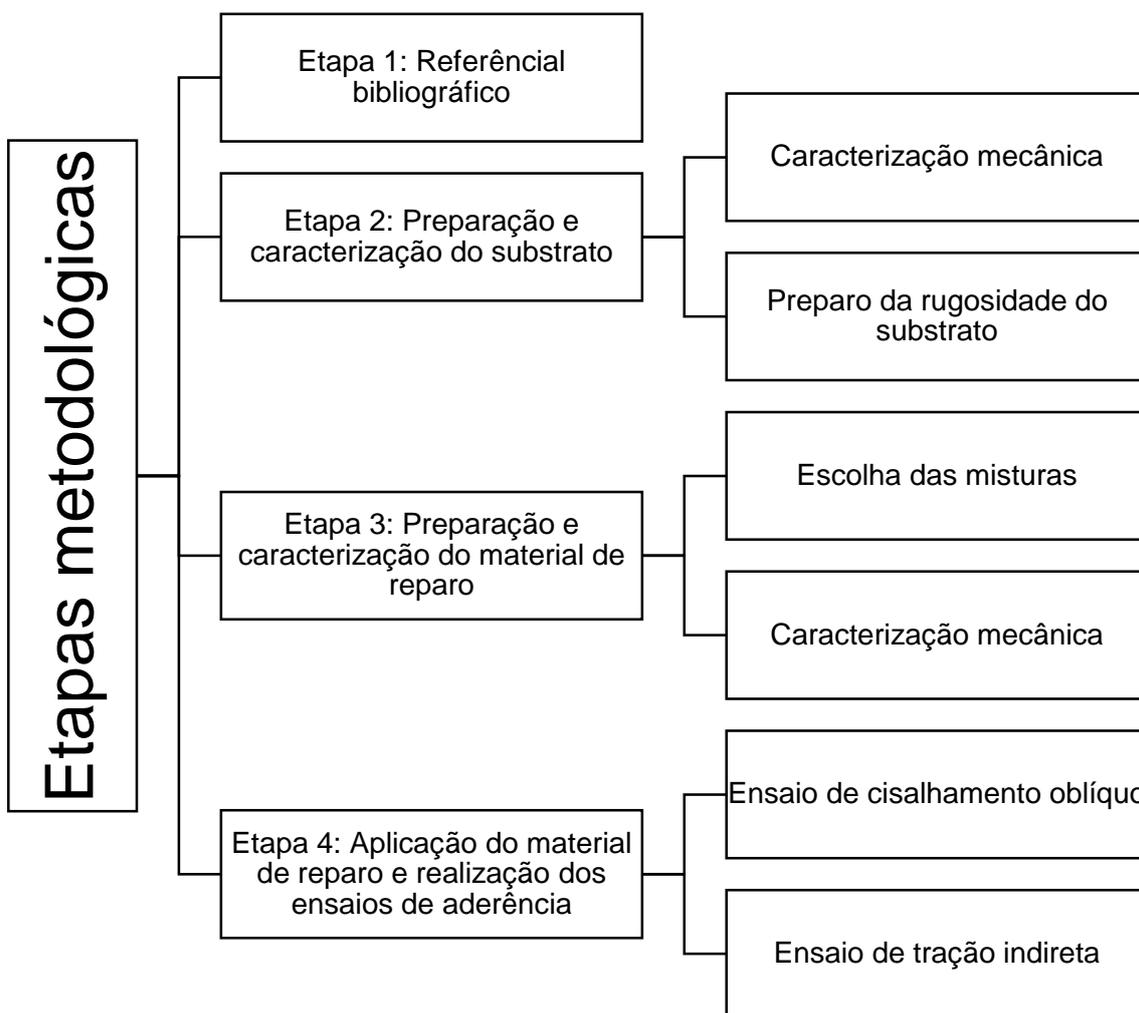


Figura 6 – Organograma das etapas metodológicas.

O material de base, ou seja, o concreto, foi idealizado previamente, para uma análise do seu comportamento junto aos materiais de reparo analisados no estudo.

Os materiais de reparo utilizados foram compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA com substituição parcial (em massa) do cimento por metacaulinita. Os teores de metacaulinita utilizados nas misturas foram entre 0 e 50% do teor de cimento. A mistura com 50% de metacaulinita foi estudada anteriormente por Santana *et al.* (2022), que obteve um excelente desempenho mecânico. Por este motivo ela foi utilizada aqui como base do estudo.

Diferentes ensaios foram realizados para caracterização física e mecânica das misturas, após 7 e 28 dias de cura. Os ensaios realizados foram os de compressão axial, flexão, compressão diametral, massa específica, porosidade e absorção de água.

No estudo da aderência concreto-compósitos, foram considerados 3 tipos de rugosidades. As rugosidades 1 e 2 foram realizadas com auxílio de escova de aço, sendo a rugosidade 2 mais profunda que a rugosidade 1. A terceira rugosidade, ou rugosidade por corte, foi alcançada após os corpos de prova de concreto serem rompidos nos ensaios de compressão diametral.

Nesta fase foram realizados os ensaios de compressão diametral e cisalhamento oblíquo. Os testes de compressão diametral foram realizados aos 7 e 28 dias, e os de cisalhamento oblíquo, aos 28 dias. Nos ensaios de cisalhamento oblíquo foram utilizados 3 diferentes ângulos de aderência, 20°, 25° e 30°.

2.2 Fabricação do substrato de concreto

2.2.1 Materiais

2.2.1.1. Cimento

O cimento utilizado foi o CP II F 32 do fabricante Holcim-LAFARGE. Esse cimento também é conhecido como cimento Portland composto com fíler e ele possui resistência a compressão de 32 MPa. Foi determinada através da NBR 16605 (2017) a massa específica do cimento, com valor igual a 3,03 g/cm³. Já o

módulo de finura, calculado a partir da NBR 11579 (2012), é de 0,64. Os óxidos presentes no cimento estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Óxidos presentes no cimento

Óxidos	Cimento Portland
Al_2O_3 (%)	$3,84 \pm 0,07$
SiO_2 (%)	$13,38 \pm 0,03$
P_2O_5 (%)	ND ^{a)}
SO_3 (%)	$3,03 \pm 0,01$
Cl (%)	$0,213 \pm 0,007$
K_2O (%)	$0,137 \pm 0,001$
CaO (%)	$74,82 \pm 0,09$
TiO_2 (%)	$0,25 \pm 0,01$
Fe_2O_3 (%)	$3,82 \pm 0,01$
SrO (%)	$0,261 \pm 0,001$
Outros (%)	0,243

a) ND – Não detectado;

2.2.1.2. Agregado miúdo

Foi utilizada uma areia média encontrada em sacos de 20 kg em lojas de materiais de construção. A norma NBR NM 248 (2003) foi utilizada para determinação da curva granulométrica, cujo resultado é mostrado na Figura 7, e a massa específica foi determinada a partir da norma NBR NM 52 (2009), com o valor de $2,64 \text{ g/cm}^3$. A areia possui um diâmetro máximo de 4,75mm e módulo de finura 2,24.

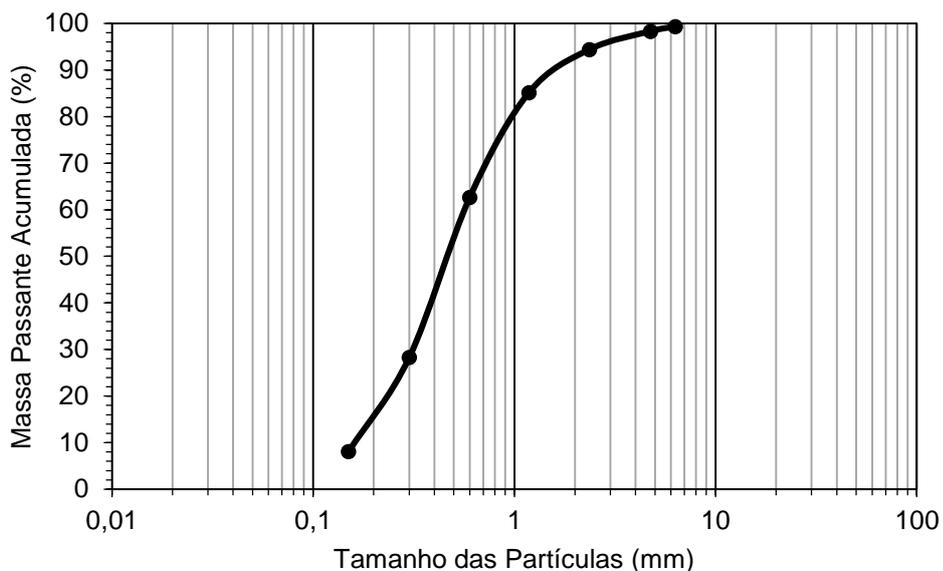


Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

2.2.1.3. Agregado graúdo

Assim como agregado miúdo, o agregado graúdo foi comprado em sacos de 20 kg em lojas de materiais de construção. O diâmetro máximo da brita foi de 19mm. A norma NBR NM 53 (2009) foi utilizada para determinar a sua massa específica, de 2,71 g/cm³, já a granulometria (Figura 8) foi determinada a partir da norma NBR NM 248 (2003).

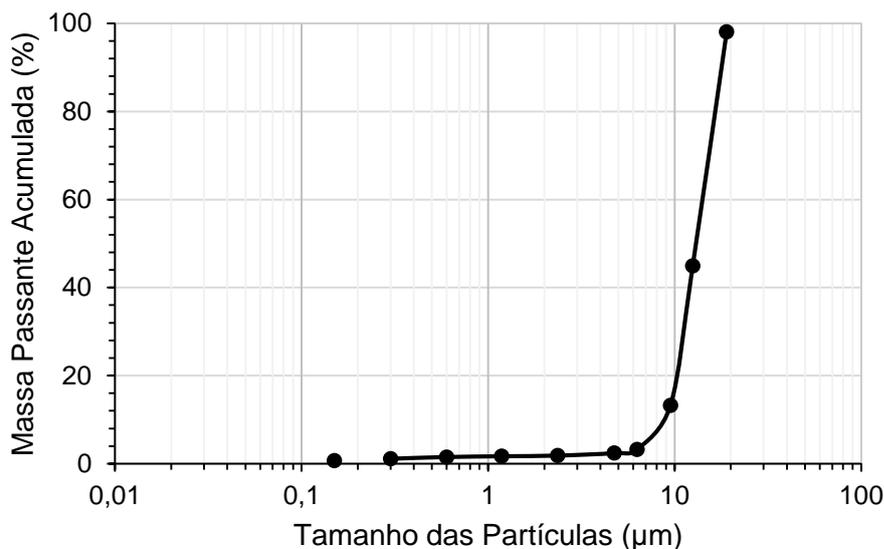


Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo.

2.2.1.4. Água

A água utilizada para moldagem do concreto foi advinda das instalações hidráulicas do laboratório de Engenharia Civil da UERJ. Essa água é fornecida pela rede municipal de abastecimento de água do município do Rio de Janeiro.

2.2.2 Moldagem do concreto

A concretagem do substrato de concreto foi feita em 3 etapas, no laboratório de Engenharia Civil da UERJ. Todas as 3 concretagens foram realizadas com o auxílio de uma betoneira (Figura 9) de 100 litros, em sala climatizada (21 °C) e todos os materiais foram pesados utilizando uma balança de precisão. O traço utilizado na fabricação do concreto foi de 1:1,88:2,21, nas quantidades expressas na Tabela 2.



Figura 9 - Aspecto da mistura de concreto na betoneira utilizada durante a concretagem

Tabela 2 – Quantidade de materiais utilizados na fabricação do concreto.

Ingredientes	Quantidade (kg/m ³)
Cimento	423,01
Areia	795,29
Brita	933,86
Água	208,88

Na concretagem, foram moldados corpos de prova utilizados para os ensaios de caracterização do concreto e para os ensaios de aderência concreto-compósitos. Para isso, foram utilizadas formas de aço e PVC cilíndricas de 10x20 cm (Figura 10a) e de madeira com 10x10x40 cm.

Moldes cilíndricos de 10x20cm de dimensão foram adaptadas para a moldagem do concreto de base (Figura 10b). Para isso, uma placa acrílica retangular, com 10 cm de base e 20 cm de altura, foi colocada no meio do molde cilíndrico, para que duas amostras de concreto pudessem ser fabricadas no mesmo momento.



Figura 10 – (a) Moldagem do concreto de base e (b) Forma de aço adaptada para o ensaio de compressão diametral do composto (concreto-reparo).

Moldes de madeira utilizadas para os ensaios de cisalhamento oblíquo também foram adaptadas. Para a angulação de 30° , foram utilizados moldes de madeira, com $10 \times 10 \times 40$ cm, com uma placa de madeira na angulação de 30° , ver Figura 11. Para as angulações de 20° e 25° foram utilizados moldes acrílicos e placas de isopor para alcançar o tamanho de corpo de prova desejado em cada angulação. Na angulação de 25° (Figura 12), as amostras tinham $9,2 \times 9,2 \times 40$ cm, enquanto para 20° (Figura 13), as amostras tinham $8,2 \times 8,2 \times 40$ cm.

Para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova, foi passado um óleo desmoldante nos moldes e placas acrílicas antes das concretagens.

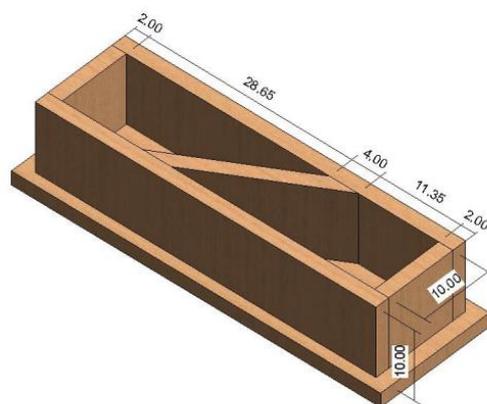


Figura 11 – Detalhe das formas de angulação de 30° (BRAUSTEIN, 2020)

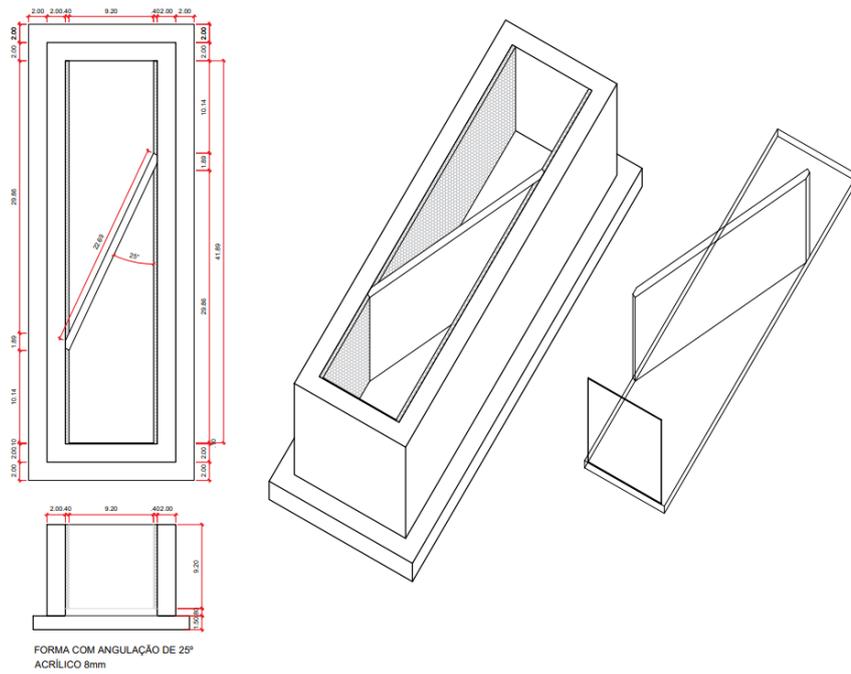


Figura 12 - Forma com angulação de 25°.

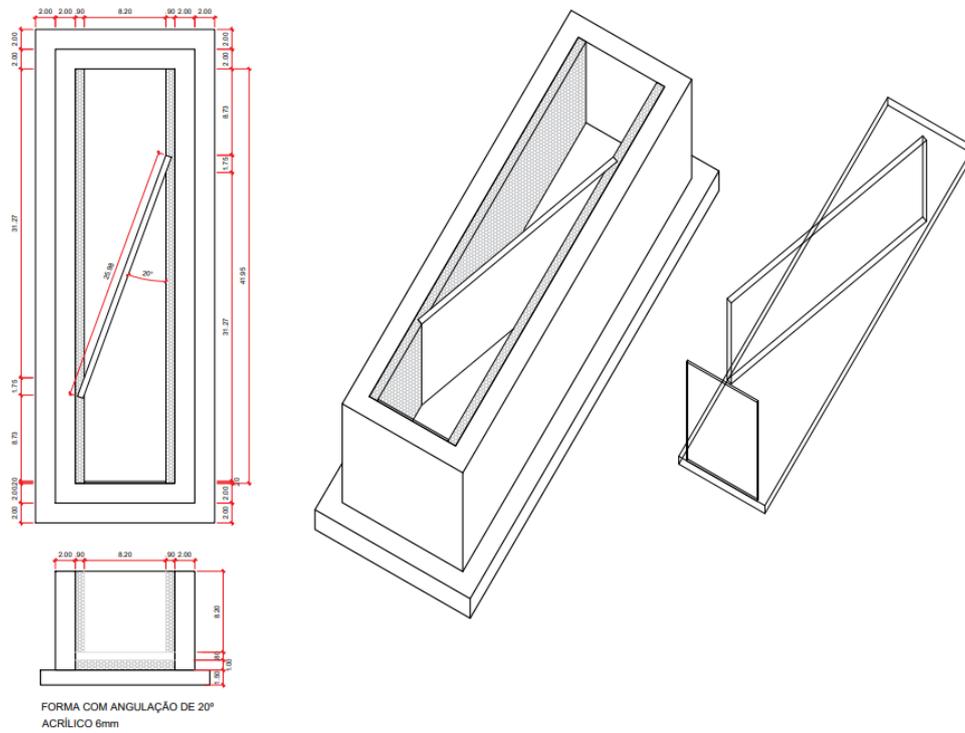


Figura 13 - Forma com angulação de 20°

A compactação dos corpos de prova foi feita com auxílio de uma haste socadora, evitando-se assim que o acrílico saísse do lugar, alterando as formas dos corpos de prova. Após a moldagem, os corpos de prova foram submersos em água para cura úmida por 28 dias.

2.3 Fabricação do material de reparo

2.3.1 Materiais

2.3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para produção dos compósitos cimentícios foi o mesmo utilizado na produção do concreto.

2.3.1.2 Metacaulinita

A metacaulinita utilizada foi a HP Ultra, fabricada pela Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda. A massa específica foi determinada segundo a norma NBR 16605 (2017), e seu valor é $2,65 \text{ g/cm}^3$, e o índice de atividade pozolânica foi calculado através da NBR 5752 (2014), e é de 111,6%.

A técnica de fluorescência de raios X (XRF) foi utilizada para realização do ensaio de composição química da metacaulinita. Esse experimento foi realizado pelo Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas (LIETA) do Instituto de Física Armando Dias Tavares (LIETA) da UERJ. Na Tabela 3, é possível observar a composição química da metacaulinita.

Tabela 3 – Composição química da metacaulinita.

Compostos	Quantidade (%)
Al_2O_3 (%)	27,14 ± 0,05
SiO_2 (%)	67,42 ± 0,07
P_2O_5 (%)	0,49 ± 0,05
SO_3 (%)	ND
Cl (%)	0,359 ± 0,002
CaO (%)	0,28 ± 0,02
TiO_2 (%)	1,95 ± 0,02
Fe_2O_3 (%)	2,14 ± 0,02
K_2O (%)	352 ± 7 ^{b)}
SrO (%)	36,5 ± 0,2 ^{b)}
<i>Outros</i> (%)	0,184

b) ND – Não detectado;

c) Concentração em $\mu g g^{-1}$

2.3.1.3 Agregado miúdo

Foi utilizada uma areia média encontrada em sacos de 20 kg em lojas de materiais de construção. Após secagem, essa areia foi passada pela peneira de 300 μm . A norma NBR NM 248 (2003) foi utilizada para determinação da curva granulométrica (Figura 14) e a massa específica foi determinada a partir da norma NBR NM 52 (2009) com o valor de 2,64 g/cm³.

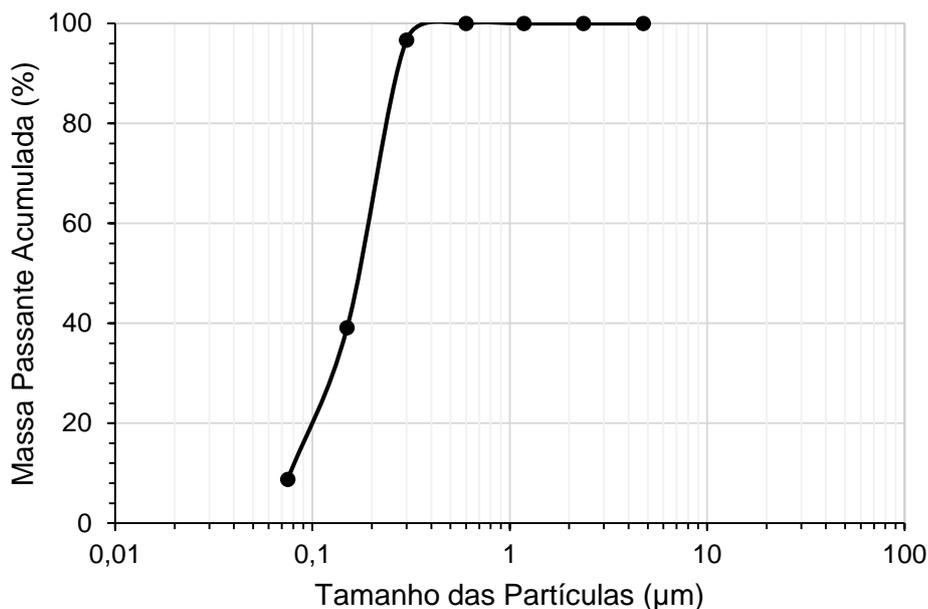


Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

2.3.1.4 Fibras

A fibra utilizada na moldagem foi a fibra de PVA (álcool polivinílico) RECS de 8 mm, do fabricante japonês Kuraray. Na Tabela 4 podemos observar as propriedades físicas e mecânicas dessas fibras, através de informações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra

Propriedade	Dimensão
Comprimento (mm)	8,0
Diâmetro (μm)	40
Módulo de elasticidade (GPa)	39,9
Resistência à tração (MPa)	1576,2
Alongamento (%)	6,5
Densidade (g/cm^3)	1,31

2.3.1.5 Água

A água utilizada para moldagem do concreto foi advinda das instalações hidráulicas do laboratório de Engenharia Civil da UERJ. Essa água é fornecida pela rede municipal de abastecimento de água do município do Rio de Janeiro.

2.3.1.6 Superplastificante

O superplastificante utilizado para moldagem dos compósitos cimentícios foi o Glenium 51 da fabricante BASF. A massa específica desse superplastificante é de $1,1 \text{ g/cm}^3$ e possui um teor de sólidos de 27%.

O ponto de saturação desse material foi determinado através do ensaio de funil de Marshall, nele foi medido o tempo necessário para que 1 litro de pasta composta por cimento e metacaulinita, com proporção 1:1, escoasse pelo funil de Marshall. Para realização desse ensaio, a norma NBR 7682 (2013) foi utilizada como base. Esse tempo de escoamento foi aferido aos 5, 10 e 20 minutos após a adição de superplastificante na mistura.

Ao variar a quantidade de superplastificante na mistura, o tempo de escoamento também variou. Isso ocorre devido a ação de defloculação e dispersão de partículas que o superplastificante possui. A partir do momento que esse tempo de escoamento estabilizou, chegamos ao ponto de saturação do material.

Nos ensaios realizados, o ponto de saturação identificado foi de 2,6% de superplastificante na mistura, como pode-se observar no Gráfico na Figura 15.

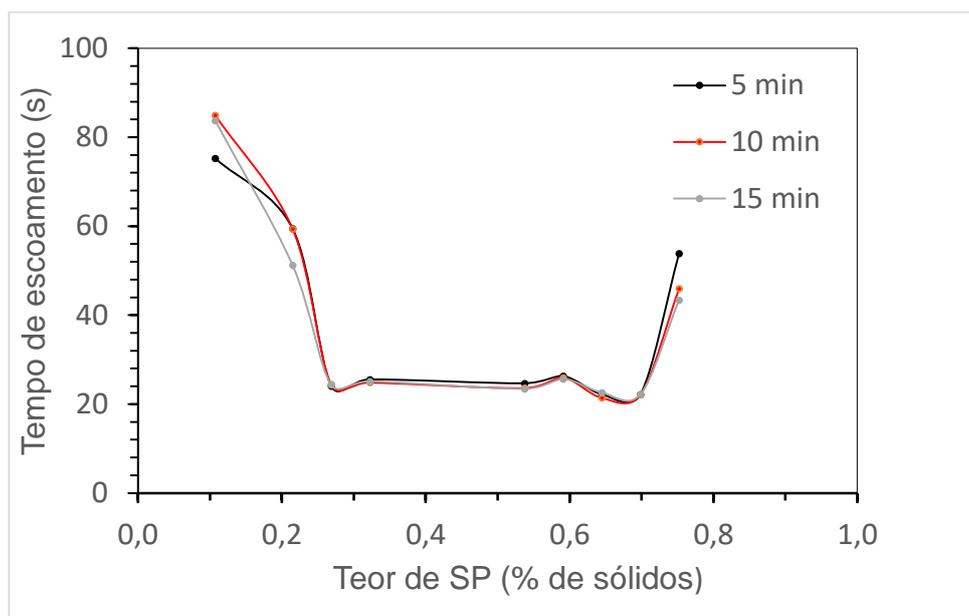


Figura 15 – Gráfico tempo de escoamento x teor de superplastificante

2.3.1.7 Aditivo polimérico

O adesivo sintético utilizado no estudo foi o Sika Chapisco Plus, que se trata de um composto de polímeros do tipo estirenos com acetato de vinila. Ele proporciona alta aderência para argamassas em diversos substratos. Além disso, é responsável por melhorar a trabalhabilidade das argamassas. Possui uma densidade de 1kg/L e um pH entre 6,0 e 8,0.

2.3.2 Moldagem dos compósitos cimentícios reforçados com fibras

Na Tabela 5 são apresentados os traços dos compósitos estudados em proporções e na Tabela 6, as quantidades. Foram fabricadas 4 misturas com diferentes substituições do cimento pela metacaulinita. A mistura M0 é a mistura de referência, fabricada sem metacaulinita, as misturas M01, M02 e M03 foram fabricadas com os teores de MK/C iguais a 0,40, 0,8 e 1,0, respectivamente. Todas as substituições foram feitas em massa.

Na pesquisa também foram fabricadas 3 outras misturas com adição do aditivo polimérico (SK). As misturas M02S1 e M02S2 foram fabricadas com, respectivamente, 4% e 5% de aditivo polimérico em relação a quantidade de

água total na mistura. A mistura M02S1a foi fabricada com o mesmo teor de aditivo da mistura M02S1, no entanto com um menor teor de água. Em todas as misturas um teor de areia/material cimentício igual a 0,4 foi mantido constante. O teor de água/material cimentício nas misturas M0-M03, M02S1 e M02S2 também foi mantido constante, e é igual a 0,34. Os teores de superplastificante são em função do teor de material cimentício (cimento + metacaulinita) e representa a quantidade total (líquido + sólidos).

Tabela 5 – Proporção dos ingredientes utilizados nos compósitos.

Mistura	MK/C	S/(MK +C)	Água/(MK+C)	SP (%)	SK (%)	PVA (%)
M0	0,00	0,40	0,34	0,20	-	2,00
M01	0,40	0,40	0,34	1,00	-	2,00
M02	0,80	0,40	0,34	2,40	-	2,00
M03	1,00	0,40	0,34	2,60	-	2,00
M02S1	0,80	0,40	0,34	2,40	4,00	2,00
M02S2	0,80	0,40	0,34	2,40	5,00	2,00
M02S1a	0,80	0,40	0,33	2,40	4,00	2,00

Tabela 6 – Quantidades de ingredientes utilizados nas misturas.

Mistura	Ingredientes (kg/ m ³)						
	C	MK	Areia	Água	SP	SK	PVA
M0	1216,74	0,00	486,69	419,04	2,43	-	26,00
M01	853,16	341,26	477,77	411,36	11,94	-	26,00
M02	656,88	525,50	472,95	407,21	28,38	-	26,00
M03	589,11	589,11	471,29	405,78	30,63	-	26,00
M02S1	656,88	525,50	472,95	407,21	28,38	101,80	26,00
M02S2	656,88	525,50	472,95	407,21	28,38	81,44	26,00
M02S1a	668,26	534,60	481,14	396,94	28,87	99,24	26,00

No processo de fabricação, primeiramente foram misturados os materiais secos (cimento, areia e metacaulinita) fora da argamassadeira, até sua homogeneização. Após esse processo, metade dessa mistura foi colocada na

argamassadeira junto com cerca de 70% da água. Após uma prévia mistura, o superplastificante foi adicionado, e a mistura foi novamente misturada até ativação do superplastificante. Em seguida o restante dos secos e água foram adicionados. Esse processo foi utilizado devido a elevada área superficial da metacaulinita, a qual requer um maior teor de água na mistura. As fibras foram adicionadas quando a mistura tinha consistência adequada.



Figura 16 - Mistura dos ingredientes na argamassadeira.

As fibras foram adicionadas lentamente, assim, se evitou a formação de grumos na mistura, o que poderiam acarretar uma mistura sem homogeneidade. O processo de mistura, mostrado na Figura 16, continuou por aproximadamente 3 minutos, até que o compósito possuísse adequada trabalhabilidade e homogeneidade.

Foram moldados corpos de prova de cada mistura para realização dos ensaios de compressão axial e diametral, flexão e massa específica (ver Figura 17). A moldagem desses corpos de prova foi feita com a utilização de formas cilíndricas, de metal e PVC, e formas retangulares de metal. Antes das moldagens foi passado óleo desmoldante nas formas. O adensamento das misturas nos cilindros foi realizado em 3 camadas e nas placas em uma camada, sempre com a ajuda de um soquete metálico.



Figura 17 – Moldagem de corpos de prova para caracterização dos compósitos.

Após 24 horas de moldagem, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 18) e colocados em cura úmida por 7 ou 28 dias, dependendo da idade que deveriam ser ensaiados.



Figura 18 – Corpos de prova de flexão e compressão desmoldados

2.4 Fabricação do material composto (concreto-reparo)

2.4.1 Tratamento superficial do substrato de concreto

O preparo da superfície pode ser realizado de diversas formas, como citado na revisão bibliográfica. Nesse estudo foram realizados três tipos de rugosidade (R1, R2 e R3). Nas superfícies dos cilindros foram realizadas as rugosidades R1 e R2 (Figura 19), e nos prismas foi feita a rugosidade R2 (Figuras 20a, 20b e 20c). As rugosidades R1 e R2 foram realizadas com auxílio da escova de aço. Na Rugosidade R2, a escova de aço foi utilizada com mais força, na intenção de obter uma rugosidade ligeiramente maior que a Rugosidade R1.

A rugosidade R3, chamada de por corte, foi obtida após os ensaios de compressão diametral dos concretos, já que os corpos de prova possuíam uma rugosidade bem acentuada (Figura 21).

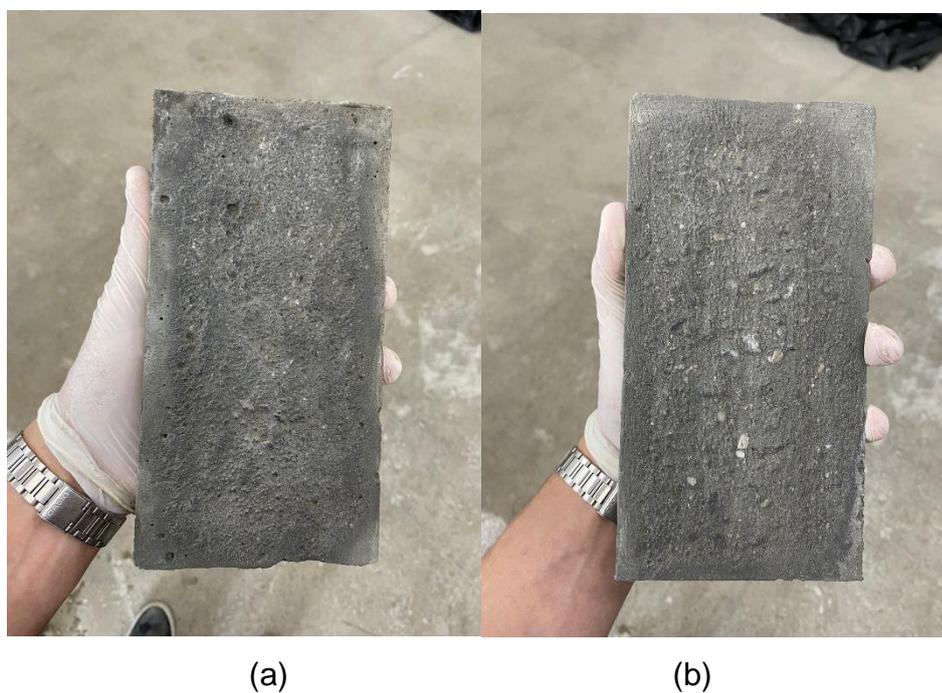


Figura 19 - Preparo da superfície dos corpos de prova para os testes de aderência por compressão diametral: (a) Rugosidade R1 e (b) Rugosidade R2.

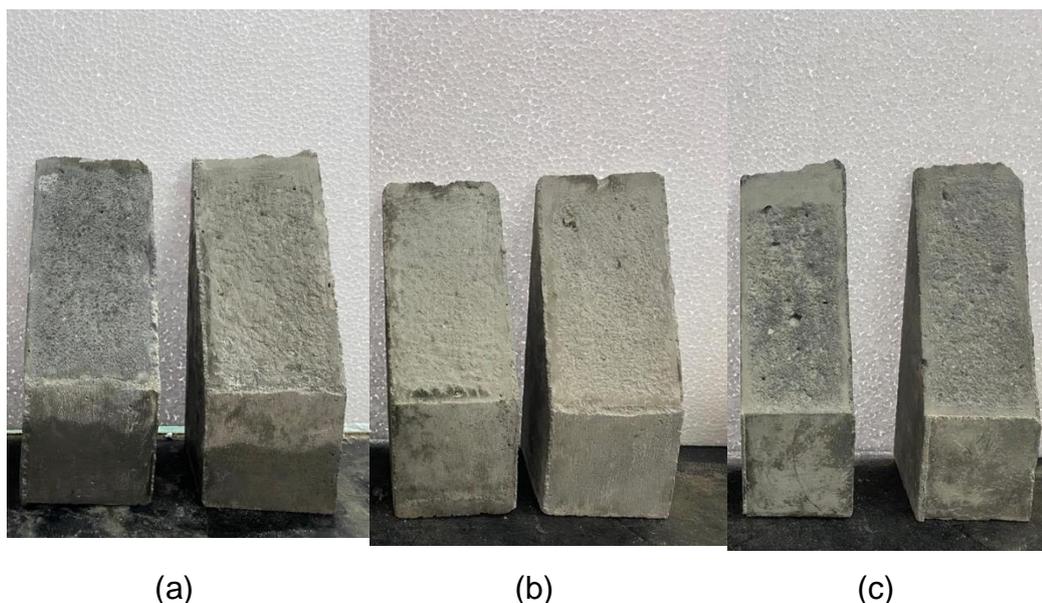


Figura 20 - Rugosidade R2 nos (a) prismas 30°, (b) prismas 25°, (c) prismas 20°.



Figura 21 - Rugosidade por corte.

Para determinação do nível de rugosidade foi realizado o ensaio da areia (Figura 22). Esse ensaio é normatizado pelo Model Code CEB/FIP (2010) e é considerado um método simples e rápido de medição de rugosidade, porém sem grande acurácia. No ensaio, a profundidade da superfície rugosa (h) é calculada através da divisão da área da superfície rugosa pelo volume de areia retido na superfície do corpo de prova, conforme a Equação 3.

$$h = \frac{V * 1000}{A} \quad (3)$$

Onde:

h = profundidade da superfície rugosa, em cm;

A = área da rugosidade, em mm²;

V = volume de areia, em cm³



(a).

(b)

Figura 22 - Ensaio de areia realizado em (a) prismas, (b) cilindros

Na Tabela 7 pode-se observar os valores das rugosidades nos corpos de prova prismáticos, já na Tabela 8 é observado os valores da rugosidade para os corpos de prova cilíndricos.

Tabela 7 - Valores da rugosidade (h) superficial nos prismas utilizados nos ensaios de slant shear.

	Rugosidade R2 – Slant shear					
	h (mm)					
	20 graus		25 graus		30 graus	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	0,45	0,07	0,49	0,08	0,49	0,07
M01	0,40	0,02	0,43	0,10	0,40	0,03
M02	0,49	0,01	0,49	0,04	0,45	0,11
M03	0,43	0,06	0,46	0,10	0,41	0,01
M02S1a	0,42	0,08	0,43	0,05	0,40	0,06

Tabela 8 - Valores da rugosidade superficial (h) nos corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de compressão diametral.

	h (mm) – Compressão diametral					
	Rugosidade R1		Rugosidade R2		R3 - Pós-dano	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	0,34	0,06	0,48	0,05	2,78	0,50
M01	0,19	0,07	0,44	0,04	2,78	1,01
M02	0,22	0,11	0,49	0,06	2,10	0,15
M03	0,23	0,05	0,39	0,12	2,93	0,27
M02S1	0,25	0,04	0,40	0,08	2,45	0,21
M02S2	0,22	0,08	0,42	0,07	2,32	0,14
M02S1a	0,30	0,08	-	-	2,10	0,13

2.4.2 Aplicação do reparo e formação do corpo de prova composto

Um total de 15 prismas compostos de cada angulação foram fabricados para posterior realização do ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo (Figura 23). Além dos prismas, também foram moldados os corpos de prova

compostos cilíndricos compostos para os ensaios de compressão diametral (Figura 24).



Figura 23 – Formas prismáticas preenchidas com o concreto reparado.

Antes da moldagem dos prismas e cilindros as superfícies das peças de concreto foram umedecidas, com bastante controle para que não houvesse acúmulo de água. Em seguida, os corpos de prova foram moldados. Os corpos de prova foram desmoldados após 24h e, em seguida, colocados submersos em água, para cura.



Figura 24 – Formas cilíndricas preenchidas com os concretos reparados.

2.5 Ensaio de caracterização do substrato de concreto

2.5.1. Propriedades do concreto fresco

2.5.1.1. Consistência

Slump test, ou ensaio de abatimento, é um ensaio utilizado para verificar a consistência do concreto em seu estado fresco. A norma utilizada para realização desse ensaio foi a NBR NM 67 (1998).

Três camadas de concreto foram adicionadas no tronco de cone, com 25 golpes cada. Para realizar esse adensamento, uma haste de socamento foi utilizada. Após a finalização das três camadas, a superfície foi regularizada e a base limpa (Figura 25).



Figura 25 – Medição do abatimento do tronco de cone

2.5.1.2. Massa específica

O ensaio de massa específica foi realizado com base na NBR 9833 (2008). Foi utilizado um recipiente metálico de 8L (Figura 26). De forma manual, o concreto foi adensado nesse recipiente em três camadas. Nas duas primeiras camadas foram aferidos 25 golpes e na terceira camada 50 golpes.



Figura 26 – Ensaio de massa específica do concreto fresco

Ao finalizar o adensamento, a superfície foi limpa e rasa. Após isso, o recipiente foi pesado. Então, a Equação 1 foi utilizada para o cálculo da massa específica:

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ap} é a massa específica aparente da argamassa, em $\frac{kg}{m^3}$;

M é a massa da argamassa, em kg;

V é o volume do recipiente metálico, em dm^3 .

2.5.2 Propriedades do concreto endurecido

2.5.2.1 Massa específica, porosidade e absorção de água

Os valores de massa específica seca (ρ_s), porosidade (P) e absorção de água (A) do concreto foram obtidos em 3 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 x 200 mm. Os testes foram realizados aos 28 dias, seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 9778 (2005) e utilizadas as Equações 4, 5 e 6 para cálculo dos valores.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão;

m_s é a massa da amostra seca em estufa

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água.

$$P = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão;

m_s é a massa da amostra seca em estufa

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão;

m_s é a massa da amostra seca em estufa.

2.5.2.2. Compressão axial

O ensaio de compressão no concreto (Figura 27) foi realizado após 28 e 56 (28+28) dias de cura, em 3 corpos de prova cilíndricos com dimensão de 100

x 200mm. Ele foi realizado com base na norma NBR 5739 (2007). Antes dos ensaios as superfícies dos corpos de prova foram faceadas, de forma a tornarem as superfícies de aplicação da carga paralelas. O cálculo da resistência a compressão pode ser realizado com base na Equação 7:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (7)$$

Onde:

f_c é a resistência a compressão, em MPa;

F é a força máxima alcançada, em N;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm.



Figura 27 – Configuração do ensaio de resistência à compressão no concreto.

Além disso, também foram realizados ensaios de compressão nos prismas de concreto com dimensões de 100 x 100 x 400 mm, de 92 x 92 x 400 mm e de 82 x 82 x 400 mm. Esses ensaios foram realizados em 3 corpos de prova de cada tamanho, e após 56 (28+28) dias de cura.

A norma utilizada para o ensaio de módulo de elasticidade (Figura 28) foi a NBR 8522 (2017). Para realização desse ensaio foram utilizados dois relógios analógicos. Esse ensaio foi realizado aos 28 dias de idade em 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm.

A equação utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade é:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (8)$$

Onde:

σ_b é a tensão em 30% da tensão máxima, em MPa;

0,5 é a tensão básica, em MPa;

ε_b é a deformação específica média $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ para uma tensão máxima correspondente a $0,3f_c$;

ε_a é a deformação média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5MPa).



Figura 28 – Configuração utilizada no ensaio de módulo de elasticidade do concreto.

2.5.2.3 Tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral (Figura 29) do concreto após 28 dias e 56 (28+28) dias de cura foi realizado em 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200mm. A resistência a tração do concreto foi determinada com auxílio da NBR 7222 (2017) e através da equação:

$$F_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d} \quad (9)$$

Onde:

$F_{ct,sp}$ é a resistência a tração por compressão diametral, em MPa;

F é a força máxima obtida no ensaio, em N;

d é o diâmetro do corpo de prova, em mm.



Figura 29 – Ensaio de tração por compressão diametral.

2.6 Ensaios de caracterização dos compósitos cimentícios reforçados com fibras

2.6.1 Propriedades dos compósitos cimentícios no estado fresco

Após finalização da mistura, foram realizados os ensaios de espalhamento e massa específica.

2.6.1.1 Consistência

O ensaio de espalhamento, ou índice de consistência dos compósitos, foi realizado com base na NBR 13276 (2016). Os materiais utilizados nesse experimento foram: molde tronco cônico, mesa, soquete e régua de alta precisão.

Primeiramente, a higienização da mesa e do tronco foram realizados, e óleo desmoldante aplicado na mesa. Após isso, o molde foi centralizado na mesa e a mistura adicionada em 3 camadas com golpes de soquete sendo deferidos em cada camada. Então, a mistura foi nivelada e o molde retirado (Figura 30).



Figura 30 – Argamassa após retirada de molde tronco cônico

Após essa retirada, a manivela da mesa foi girada, de forma manual, 30 vezes durante 30 segundos. Depois disso, o diâmetro do espalhamento do material (Figura 31) foi medido 3 vezes, com auxílio da régua metálica de alta precisão. O valor do espalhamento foi obtido através de média aritmética das 3 medidas.



Figura 31 – Medida do índice de consistência dos compósitos.

2.6.1.2 Massa específica

Na realização do ensaio de massa específica, um recipiente metálico de 400 ml foi utilizado (Figura 32). O cálculo foi realizado com base na Equação (2):

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \times 1000 \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} é a massa específica aparente da argamassa, em $\frac{kg}{m^3}$;

M é a massa da argamassa, em kg;

V é o volume do recipiente metálico, em dm^3 .

Nesse ensaio, a mistura fresca também foi adicionada no recipiente metálico em 3 camadas, recebendo aproximadamente 15 golpes do soquete metálico após a adição de cada camada. Após o término da última camada, também foi realizado o nivelamento com auxílio de régua metálica.



Figura 32 – Ensaio de massa específica no estado fresco

2.6.2 Propriedades dos compósitos cimentícios no estado endurecido

2.6.2.2 Massa específica, densidade aparente e absorção de água

A determinação da densidade aparente e absorção de água foi realizada em 3 corpos de prova cilíndricos de 50 x 100mm, com o auxílio da NBR 13280 (2005). Essa determinação foi feita após 28 dias de cura dos corpos de prova.

2.6.2.3 Compressão axial

Os ensaios de compressão axial nos compósitos (Figura 33) foram realizados aos 7 e 28 dias após a moldagem de cada mistura. Os ensaios foram realizados em 3 corpos de prova cilíndricos de 50 x 100mm para cada mistura. A velocidade de deformação axial aplicada foi de 0,3mm/min e dois extensômetros mediam os deslocamentos axiais no corpo de prova.



Figura 33 – Configuração dos ensaios de compressão dos compósitos.

Antes dos ensaios, as superfícies dos corpos de prova foram niveladas. O nivelamento (ver Figura 34) foi realizado através de capeamento com uma pasta de cimento com baixo fator água/cimento. Esse capeamento foi essencial para que a tensão aplicada nos corpos de prova fosse uniforme, garantindo um ensaio com resultados mais precisos.

Antes da realização do capeamento, o nível da mesa foi verificado. Além disso, o nível e o prumo também foram utilizados para verificar a correta realização desse processo.



Figura 34 – Capeamento de corpos de prova de compressão.

Após realização do ensaio, a resistência a compressão foi determinada com a equação (Eq. 10):

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (10)$$

Onde:

f_c é a resistência a compressão, em MPa;

F é a força máxima alcançada, em N;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm.

O módulo de elasticidade dos compósitos foi determinado através dos dados obtidos nos ensaios de resistência a compressão, como observado na Figura 31. O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado através da inclinação da reta tangente ao gráfico de tensão deformação até 30% da tensão máxima.

2.6.2.4 Tração por compressão diametral

A resistência a tração por compressão diametral (Figura 35) dos compósitos foi determinada após 7 e 28 dias de cura, utilizando a NBR 7222

(2017). Nos testes foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm. O cálculo foi feito através da Equação 11.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dh} \quad (11)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência a tração por compressão diametral, em MPa;

F é a força máxima obtida no ensaio, em N;

d é o diâmetro do corpo de prova, em mm.

h = é a altura do corpo de prova, em mm



Figura 35 – Ensaio de compressão diametral da argamassa

Para a realização desse ensaio, marcações foram realizadas nos corpos de prova e ele foi posicionado na máquina com auxílio de dois filetes de madeira para uma correta distribuição de tensões.

2.6.2.5 Flexão

No ensaio de flexão em 4 pontos (Figura 36), uma carga P crescente, com vão de aplicação de 300 mm, é aplicada em quatro pontos de um corpo de prova de dimensões 15 x 60 x 400 mm. A velocidade utilizada foi de 0,5 mm/min e os deslocamentos foram medidos pelo deflectômetro localizado no meio do vão. Nos ensaios foram utilizados 5 corpos de prova para cada mistura. Esse ensaio é responsável por uma análise mais precisa da resistência a flexão do compósito e sua capacidade de suporte para cargas.

As tensões equivalentes de flexão podem ser calculadas utilizando a Equação 12.

$$\sigma = \frac{6M}{bd^2} \quad (12)$$

Onde:

σ é a tensão na flexão;

M é o momento fletor no meio do vão;

b é a dimensão da base da amostra;

d é a altura da amostra.



Figura 36 – Ensaio de flexão de 4 pontos nos compósitos.

2.7 Ensaios de aderência no concreto reparado

2.7.1 Tração por compressão diametral

A resistência a tração (Figura 37) por compressão diametral do conjunto reparado foi realizada com auxílio da NBR 7222 (2017), em corpos de prova cilíndricos compostos com 100 mm de base e 200 mm de altura. A resistência à tração foi calculada através da Equação 9, apresentada anteriormente.



Figura 37 – Ensaio de compressão diametral do conjunto reparado.

2.7.2 Cisalhamento oblíquo (slant shear)

Os ensaios foram realizados após 28 dias de cura do material de reparo e baseados na norma EM 12615 (2000). O maquinário usado nesse experimento foi a prensa hidráulica Losenhausenwerk – LOS, que possui capacidade de 300 tf (Figura 38). Medições foram realizadas para obter as medidas exatas dos corpos de prova antes da realização dos experimentos.

Nos ensaios foram utilizados 3 ângulos de 20°, 25° e 30° da superfície inclinada, em relação com o eixo longitudinal no prisma composto concreto-compósitos. Para os prismas com angulação de 30°, o tamanho dos corpos de prova utilizados foi de 100x100x400 mm. Para a angulação de 25°, o tamanho foi de 92x92x400 mm e os de 20° possuíam tamanho de 82x82x400 mm.



Figura 38 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de cisalhamento oblíquo.

As tensões calculadas para analisar a tensão de cisalhamento e tensão normal foram obtidas através das Equações 13 e 14:

$$\sigma_n = \sigma_0 \sin^2 \theta \quad (13)$$

$$\tau = \sigma_0 \cos \theta \sin \theta \quad (14)$$

Onde:

σ_0 é a tensão normal no prisma, em MPa;

σ_n é a tensão normal na junta, em MPa;

τ é a tensão de cisalhamento na junta, em MPa;

θ é o ângulo entre o plano inclinado do prisma e a seção longitudinal, foram utilizados os ângulos de 20°, 25° e 30°.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos procedimentos experimentais serão apresentados nessa seção.

3.1 Propriedades físicas do concreto e compósitos

3.1.1 Propriedades no estado fresco

Na Tabela 9 são apresentados os resultados dos ensaios de consistência e massa específica dos compósitos e concreto no estado fresco. Pode-se observar, então, um índice de consistência ligeiramente maior nas misturas com presença do aditivo polimérico, principalmente se comparadas a mesma mistura sem adesivo sintético, M02.

Tabela 9 – Resultados de consistência e massa específica dos compósitos e concreto no estado fresco.

Mistura	Consistência (cm)	DP	Massa específica (g/cm ³)
Concreto	11,00	1,41	2,89
M0	24,47	0,05	2,13
M01	23,47	0,39	2,06
M02	22,70	0,36	2,04
M03	21,86	0,26	1,85
M02S1	27,67	0,47	1,85
M02S1a	27,43	0,42	1,89
M02S2	27,00	0,42	1,99

Como pode ser observado, tanto a consistência quanto a massa específica das misturas diminuíram com o aumento do teor de metacaulinita (misturas M0-M03). Santana *et al.* (2022) explica essa ocorrência pelo fato da metacaulinita ter menor densidade que o cimento Portland. Além disso, as misturas com aditivo polimérico apresentaram os menores valores de massa específica.

Segundo Medina (2011) a elevada área superficial específica da metacaulinita melhora aspectos reológicos por intermédio da otimização da distribuição granulométrica da pasta, contribuindo assim para a retenção de água, além do aumento da coesão e redução da exsudação e segregação. No entanto, por possuir uma maior retenção de água, a trabalhabilidade é prejudicada. Esse efeito foi visível neste trabalho, pois para conseguir uma consistência similar, foi necessário um aumento gradual do teor de superplastificante à medida que o teor de metacaulinita foi aumentado.

3.1.2 Propriedades no estado endurecido

Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos ensaios de massa específica, porosidade e absorção de água no estado endurecido.

Tabela 10 – Resultados de massa específica, porosidade e absorção de água dos compósitos e concreto endurecidos.

Misturas	Massa específica (g/cm ³)		Porosidade (%)		Absorção de água (%)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Concreto	2,31	0,01	7,56	0,21	3,27	0,10
M0	1,90	0,01	28,32	0,42	14,87	0,21
M01	1,93	0,01	23,97	0,96	12,42	0,58
M02	2,04	0,02	14,95	0,37	7,33	0,19
M03	1,88	0,01	16,98	0,17	9,04	0,11
M02S1	1,61	0,09	28,52	1,80	17,87	2,01
M02S1a	1,74	0,04	24,34	0,93	14,04	0,81
M02S2	1,69	0,05	26,97	0,98	16,00	1,00

A partir desses ensaios é possível observar que ao aumentar o teor de metacaulinita há uma diminuição da absorção de água. Isso ocorre devido ao refinamento dos poros, que também pode ser observado pela redução da porosidade. Além disso, também pode ser observado que as misturas que utilizaram o aditivo polimérico (M02S1 e M02S02) tiveram porosidade e absorção de água maiores que os valores da mistura M02.

Ao reduzir o teor de água da mistura M02S1a pode-se observar que ela teve porosidade e absorção de água menor que as outras misturas com aditivos poliméricos, porém se comparada com a mistura M02, ela ainda teve um aumento na porosidade de 9,39% e na absorção de água de 6,71%.

3.2 Propriedades mecânicas do concreto e compósitos

3.2.1 Compressão axial

Na Tabela 11 pode-se observar os resultados dos ensaios de resistência à compressão feitos nos cilindros de concreto, aos 28, 28 + 7 dias e 28 + 28 dias, e feitos nos prismas, aos 28 + 28 dias, além do módulo de elasticidade aos 28 dias. Na Tabela 12 são apresentados os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos.

Tabela 11 – Resistência à compressão e modulo de elasticidade do concreto.

Idade (dias)	Resistência à compressão, f_c (MPa)								E (GPa)	
	Cilindros		Prismas							
	Média	DP	P1		P2		P3			
			Média	DP	Média	DP	Média	DP		
28	22,48	1,50	-	-	-	-	-	-	21,78	0,88
28 + 7	23,39	0,61	-	-	-	-	-	-	-	-
28 + 28	27,53	3,78	28,58	1,56	31,07	0,63	31,09	0,12	-	-

¹P1: 82 x 82 x 400 mm, ²P1: 92 x 92 x 400 mm e ³P1: 100 x 100 x 400 mm.

Tabela 12 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos.

Misturas	Resistência à compressão (MPa)				Módulo de elasticidade (GPa)			
	7 dias		28 dias		7 dias		28 dias	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	39,51	3,88	49,17	0,3	20,85	0,72	22,25	0,35
M01	39,29	0,58	49,94	1,57	20,14	0,85	22,14	0,49
M02	36,67	0,8	48,45	0,86	17,47	0,28	20,21	0,43
M03	30,92	2,02	49,08	1,57	17,44	0,22	19,56	1,75
M02S2	10,55	0,28	14,97	1,82	11,37	2,66	13,99	0,86
M02S1	7,56	1,06	12,53	3,15	8,64	1,66	13,51	2,21
M02S1a	23,75	1,69	24,08	1,63	15,22	1,28	25,32	0,25

O gráfico da Figura 39 mostra uma correlação entre a resistência à compressão e o teor de metacaulinita. É possível observar um aumento da resistência a compressão dos compósitos de 7 para 28 dias. No entanto, esse aumento parece ser maior nas misturas com um maior teor de metacaulinita.

Comparada a mistura de referência, sem metacaulinita, nenhuma diferença significativa foi observada aos 7 dias quando o teor de metacaulinita aumentou para 0,4 (M01). No entanto, para maiores teores uma redução progressiva da resistência é observada. Isso pode ser explicado através do efeito diluição do clíquer, onde são reduzidas as quantidades de cimento e os materiais cimentantes potenciais podem ser afetados (SANTANA *et al.*, 2022) Já aos 28 dias, as misturas M0-M03 apresentaram semelhantes valores de resistência à compressão.

Com isso, pode-se observar que o ganho de resistência entre 7 e 28 dias foi maior nas misturas com metacaulinita. Santana *et al.* (2022) observou o mesmo comportamento em seu estudo.

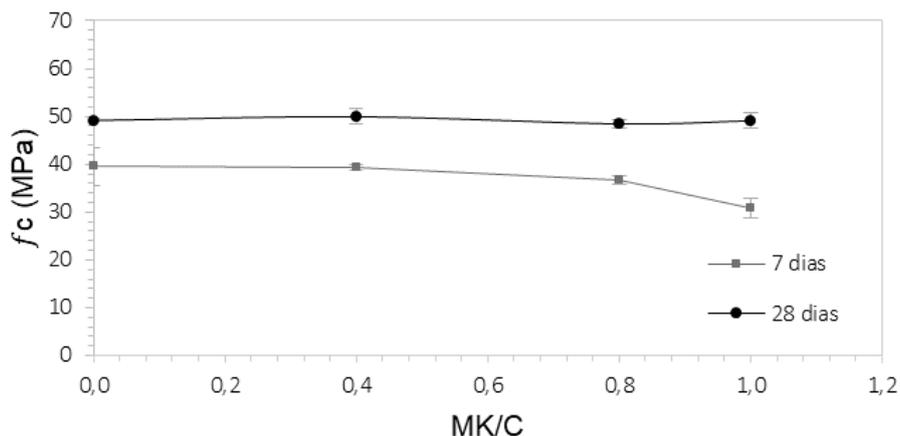


Figura 39 – Influência do teor de metacaulinita na resistência à compressão dos compósitos.

Na Figura 40 tem-se uma comparação da resistência à compressão das misturas com adição do aditivo polimérico e a mistura M02. As misturas fabricadas com o aditivo polimérico e mesmo fator água/material cimentício (a/mc) possuíram uma menor resistência à compressão, tanto aos 7 dias como aos 28 dias, que a da mistura M02.

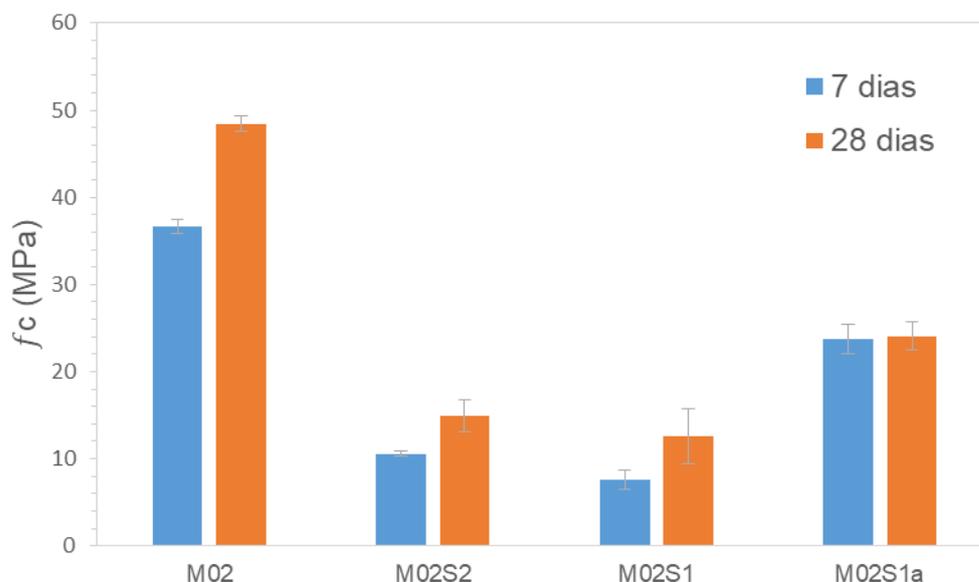


Figura 40 – Influência do teor de aditivo polimérico na resistência à compressão dos compósitos.

Já a mistura M02S1a, com um menor fator a/mc, apresentou um aumento de resistência, tanto aos 7 dias, como aos 28 dias, quando comparada com a mistura M02S1. Além disso, pode-se observar que a mistura M02S1a não obteve um crescimento significativo de resistência de 7 para 28 dias.

Já no gráfico da Figura 41, pode-se observar a influência do aumento do teor de metacaulinita no módulo de elasticidade dos compósitos, aos 7 e 28 dias, onde pode ser observado um aumento similar para todas as misturas de 7 para 28 dias. Além disso, também é notada uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de metacaulinita. A redução parece similar nas duas idades.

Santana *et al.* (2022) também observou um comportamento semelhante. No seu estudo, o módulo de elasticidade não foi alterado significativamente até o teor de MK/C chegar a 0,8, começando a reduzir a partir do aumento dessa razão para 1,0 e 1,5.

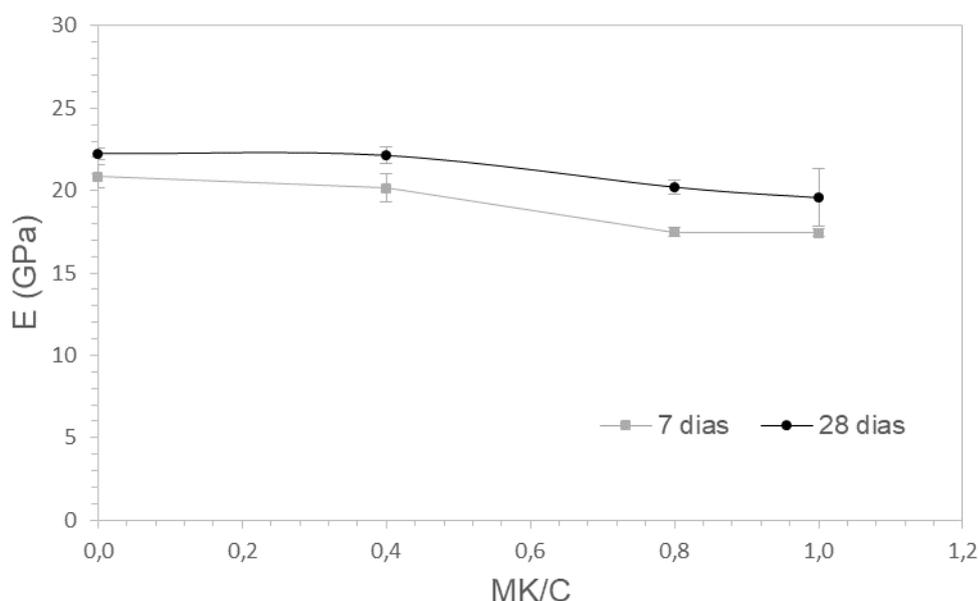


Figura 41 – Influência do teor de metacaulinita no módulo de elasticidade dos compósitos.

Na Figura 42, temos o comparativo do módulo de elasticidade das misturas com aditivo polimérico. Nele pode-se observar que as misturas com aditivo polimérico obtiveram modo de elasticidade menor que o da mistura M02, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias. Entre elas, pode-se observar um maior

crescimento entre 7 e 28 dias da mistura M02S1, que cresceu aproximadamente 57,5%, enquanto M02S2 cresceu 23,0% e M02S1a cresceu apenas 3,9%.

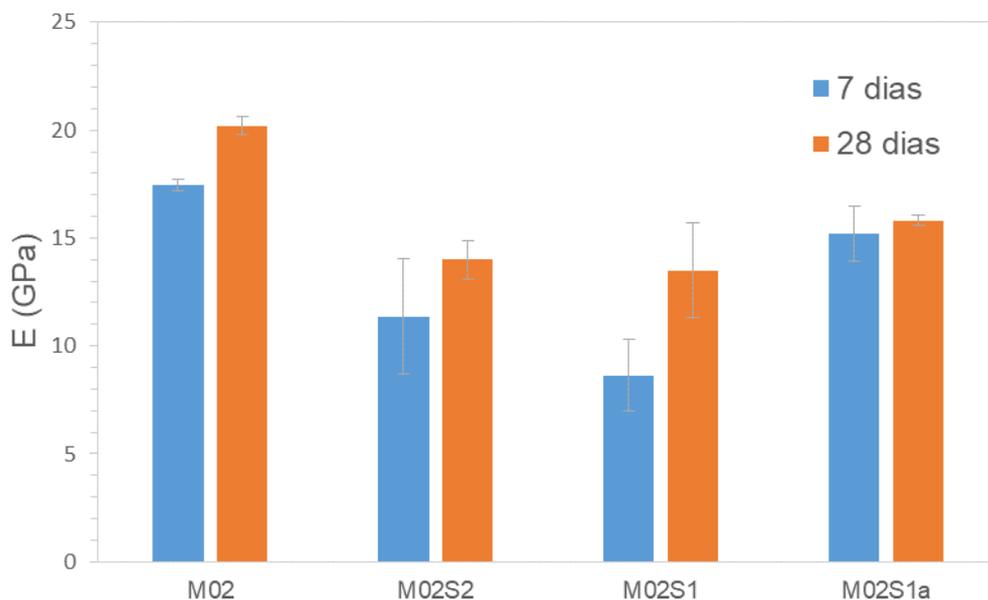


Figura 42 – Influência do teor de aditivo polimérico no módulo de elasticidade das misturas.

3.2.1 Flexão

Nas Figuras 43, 44, 45, 46, 47, 48 e 49 são apresentados os gráficos de tensão de flexão vs. deflexão dos corpos de prova de cada mistura. A partir desses gráficos foi possível definir diversos parâmetros como tensão de primeira fissura, deflexão de primeira fissura, capacidade de deflexão e tensão máxima.

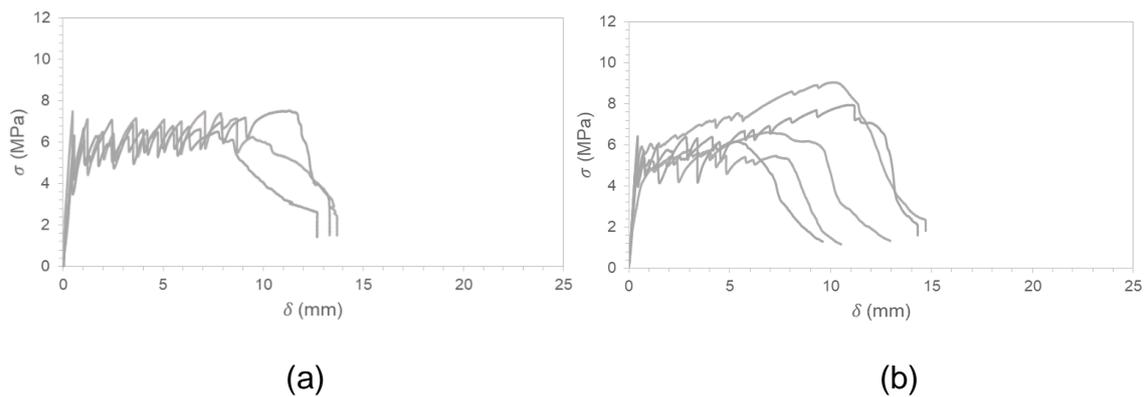


Figura 43 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M0 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.

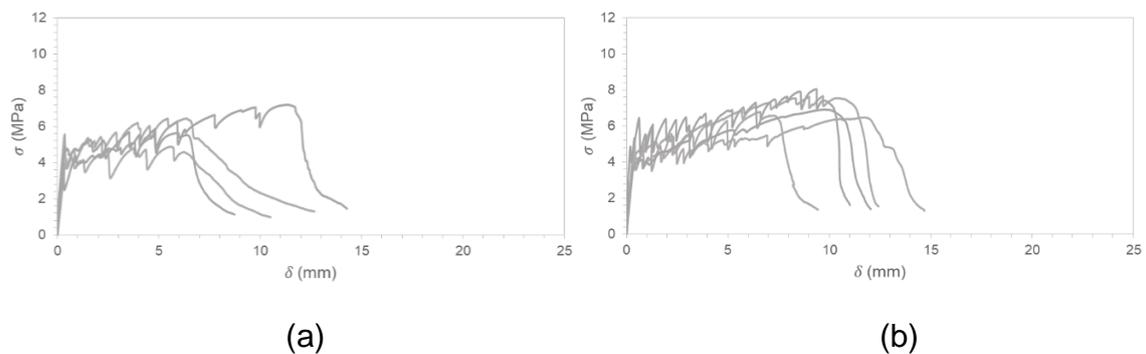


Figura 44 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M01 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.

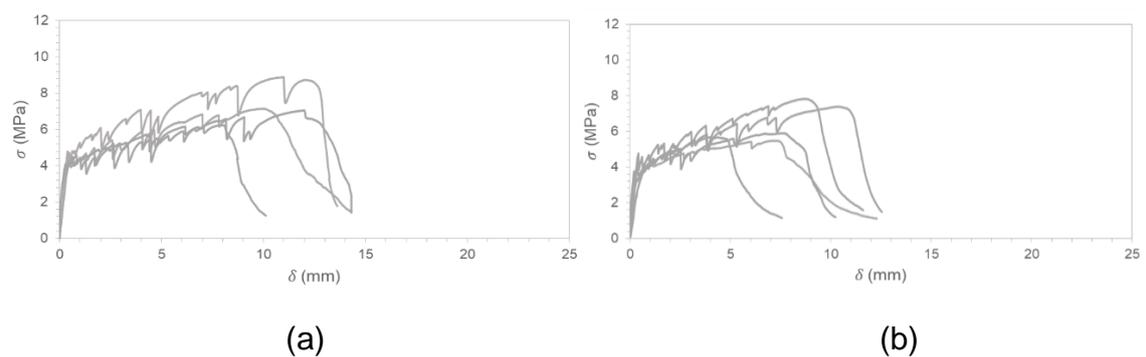


Figura 45 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.

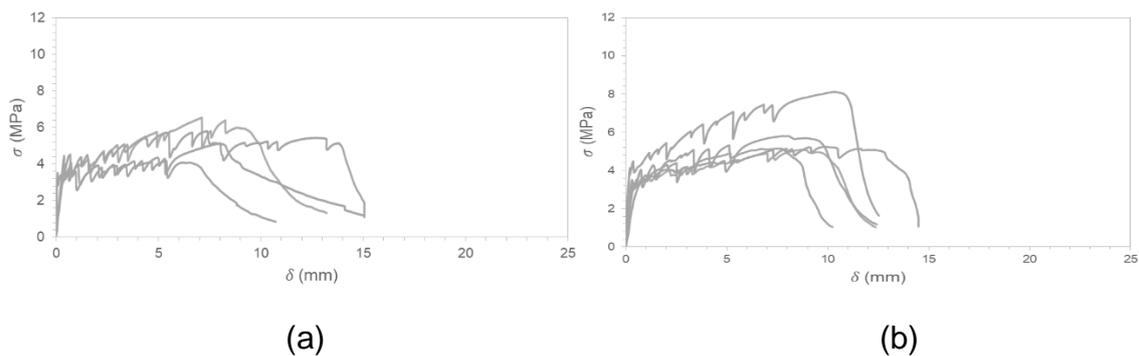


Figura 46 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M03 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.

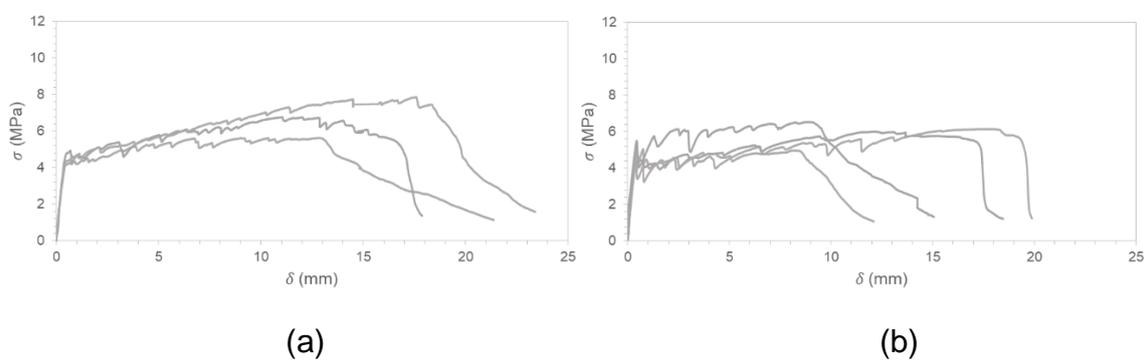


Figura 47 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02S1 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.

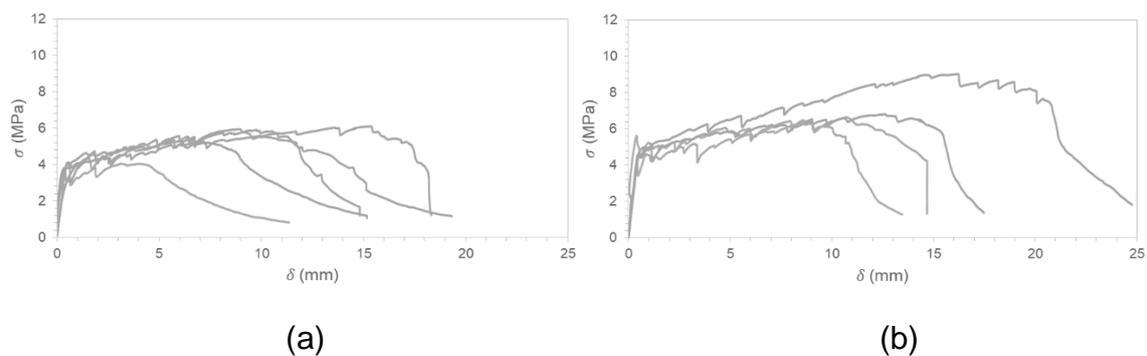


Figura 48 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02S1a na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.

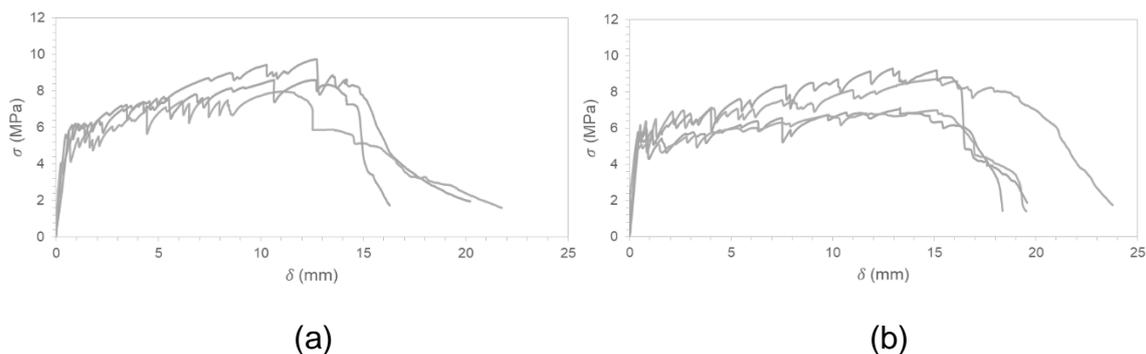


Figura 49 – Comportamento dos corpos de prova da mistura M02S2 na flexão aos (a) 7 dias, (b) 28 dias.

Na Tabela 13 são apresentados os dados de tensões e deflexões de primeira fissura dos ensaios de flexão de 4 pontos nos compósitos. Os dados de primeira fissura são tomados no ponto da curva tensão x deflexão onde é observado a primeira queda visível.

Tabela 13 – Resultados das tensões e deflexões de primeira fissura.

Misturas	Tensão de primeira fissura (MPa)				Deflexão de primeira fissura (mm)			
	7 dias		28 dias		7 dias		28 dias	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	6,00	0,45	5,66	0,53	0,51	0,04	0,38	0,04
M01	4,60	0,70	4,79	0,37	0,37	0,04	0,35	0,05
M02	4,43	0,33	4,34	0,30	0,39	0,07	0,33	0,03
M03	3,75	0,24	3,75	0,35	0,32	0,04	0,32	0,07
M02S2	5,08	0,83	5,55	0,18	0,49	0,1	0,44	0,07
M02S1	4,40	0,21	5,03	0,42	0,46	0,02	0,42	0,02
M02S1a	4,04	0,09	5,10	0,41	0,44	0,07	0,46	0,07

Na Figura 50 tem-se o gráfico comparativo entre as deflexões de primeira fissura (δ_{cc}) das misturas com variação do teor de metacaulinita.

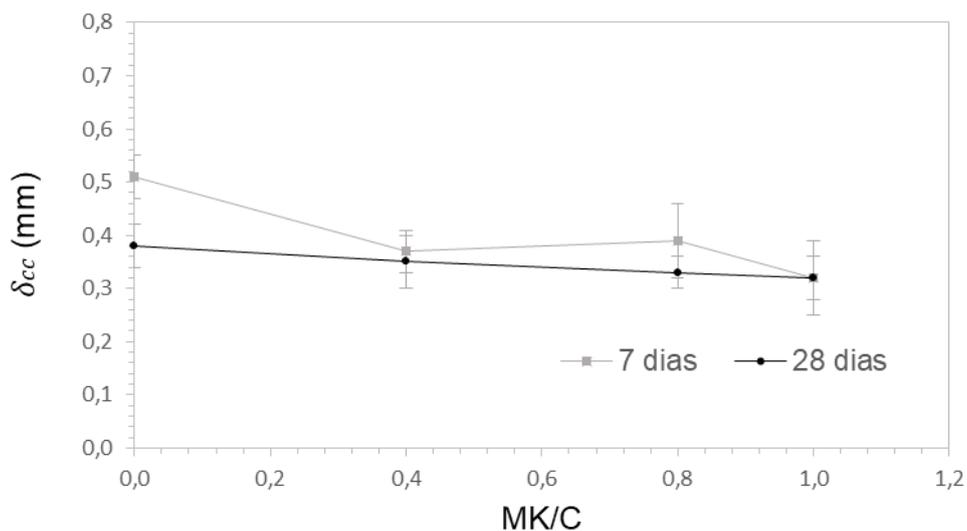


Figura 50 – Influência do teor de metacaulinita na deflexão de primeira fissura.

Então observa-se que houve uma redução maior da deflexão de primeira fissura das misturas, com o aumento do teor de metacaulinita, aos 7 dias, que aos 28 dias. Além disso, aos 28 dias, as misturas M0, M01, M02 e M03 apresentaram valores próximos de deflexão de primeira fissura.

Na figura 51 é apresentada a comparação de deflexão de primeira fissura (δ_{cc}) das misturas com adição de aditivo polimérico.

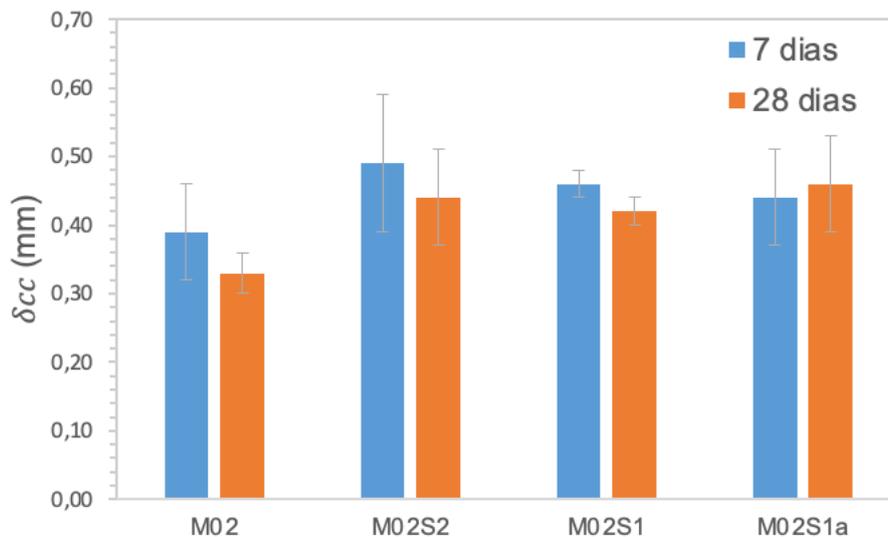


Figura 51 – Influência do teor de aditivo polimérico na deflexão de primeira fissura.

As misturas adição do aditivo polimérico tiveram deflexões de primeira fissura maiores, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, do que a mistura sem aditivo. As misturas M02S1 e M02S2 tiveram uma pequena diminuição na deflexão de primeira fissura, enquanto a mistura M02S1a obteve um aumento de cerca de 4,55%.

Na Figura 52 temos o gráfico comparativo da tensão de primeira fissura (σ_{cc}) das misturas com variação do teor de metacaulinita.

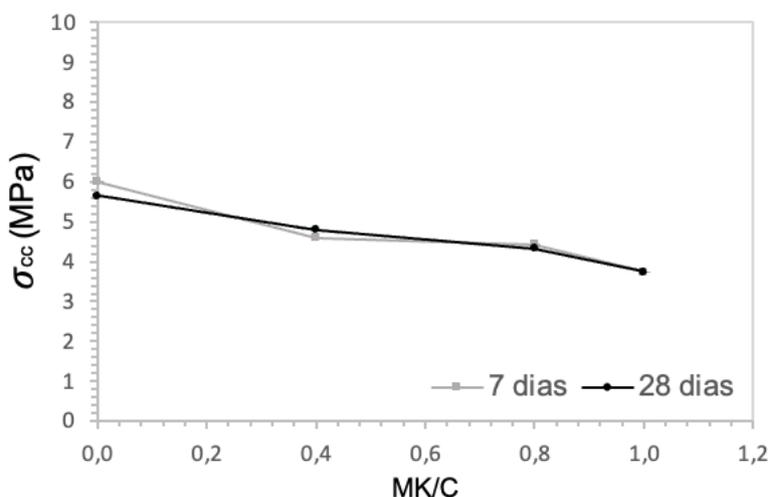


Figura 52 – Influência do teor de metacaulinita na tensão de primeira fissura.

Em geral, as tensões de primeira fissura diminuíram com o aumento do teor de metacaulinita, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias.

A comparação da tensão de primeira fissura (σ_{cc}) das misturas com adição de aditivo polimérico é feita no gráfico da Figura 53.

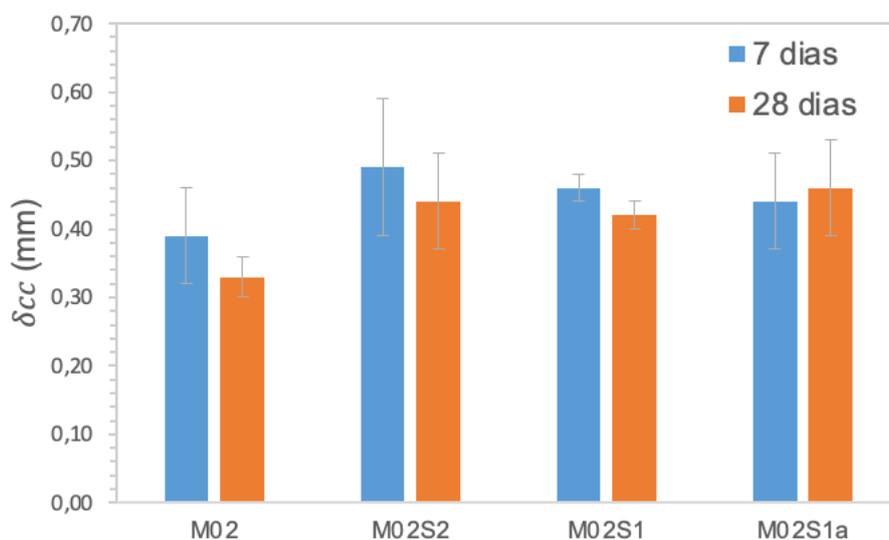


Figura 53 – Influência do teor de aditivo polimérico na tensão de primeira fissura.

Ao contrário da mistura M02 e M02S1a, as misturas M02S2 e M02S1 tiveram aumento na sua tensão de primeira fissura entre 7 e 28 dias. Aos 28 dias, todas as misturas tiveram uma maior tensão de primeira fissura que a mistura M02.

As capacidades de deflexões (δ_u), ou capacidade de deflexão, dos compósitos são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados da capacidade de deflexão dos compósitos.

Misturas	Capacidade de deflexão (mm)			
	7 dias		28 dias	
	Média	DP	Média	DP
M0	9,19	1,48	8,17	2,14
M01	8,30	2,41	9,69	1,70
M02	10,53	1,61	9,02	1,31

M03	10,49	2,52	10,15	1,73
M02S2	12,85	1,24	15,49	0,37
M02S1	15,48	2,27	15,18	4,01
M02S1a	12,33	3,16	13,94	3,94

A partir da Figura 54 podemos observar a influência do aumento do teor de metacaulinita na capacidade de deflexão das misturas.

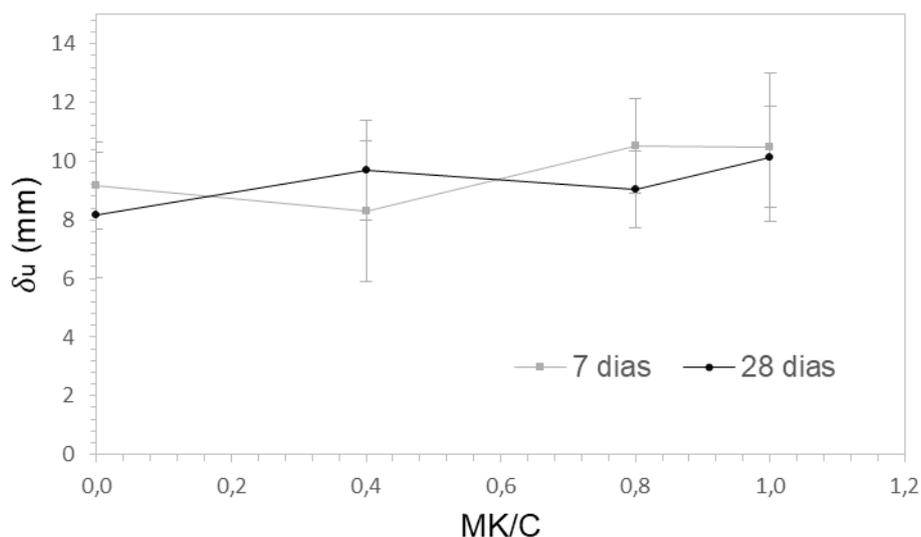


Figura 54 – Influência do teor de metacaulinita na deflexão na ruptura.

A deflexão na ruptura teve uma diminuição, entre 7 e 28 dias, nas misturas M0, M02 e M03. Já a mistura M01 teve, em sua deflexão de ruptura, um aumento de 16,75% entre 7 e 28 dias. Também pode-se observar que com o aumento do teor de metacaulinita, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, a capacidade de deflexão das misturas M02 e M03 parece ter um leve aumento com relação a mistura base M0, com exceção da mistura M01 que teve, aos 7 dias, uma queda de aproximadamente 9,68% com relação a mistura M0.

O comparativo da deflexão na ruptura (δ_u) das misturas com aditivo polimérico pode ser observado na Figura 55.

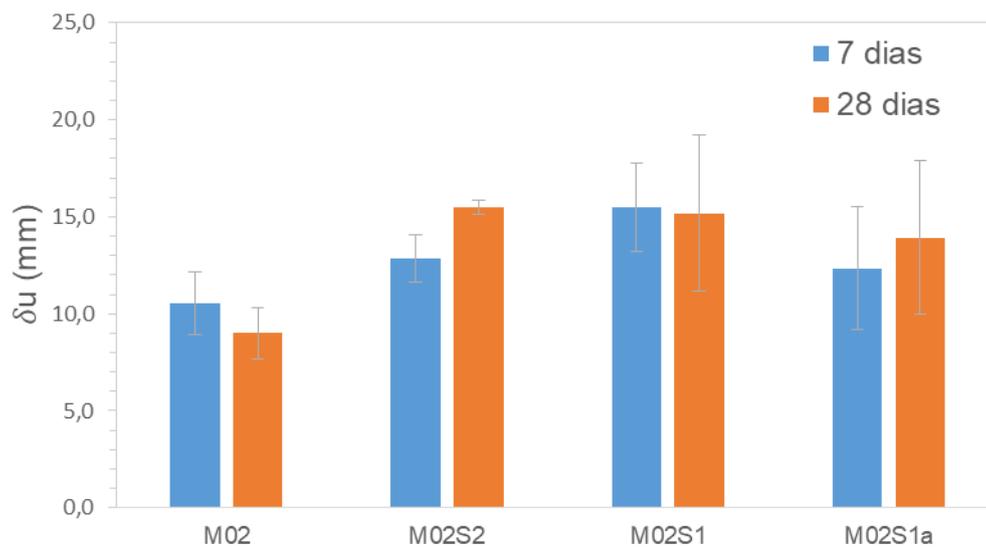


Figura 55 – Influência do teor de aditivo polimérico na deflexão na ruptura.

As misturas com uso do aditivo polimérico tiveram deflexões de ruptura maiores do que as observadas nas misturas M0, M01, M02 e M03, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias. A mistura M02S1 teve deflexões de ruptura similares aos 7 e 28 dias, enquanto as misturas M02S2 e M02S1a tiveram um aumento na deflexão de ruptura de cerca de 20,54% e 13,05%, respectivamente.

Na Tabela 15, são apresentados os dados de tensões máximas (σ_{cr}) das misturas nos ensaios de flexão.

Tabela 15 – Resultados das tensões máximas dos compósitos nos ensaios de flexão.

Misturas	Tensão máxima (MPa)			
	7 dias		28 dias	
	Média	DP	Média	DP
M0	7,37	0,20	7,52	1,07
M01	6,45	0,56	7,19	0,58
M02	6,83	0,41	6,65	0,98
M03	5,93	0,46	5,89	1,15
M02S2	8,79	0,73	8,05	1,00
M02S1	6,77	0,91	6,01	0,45
M02S1a	5,80	0,30	7,23	1,06

Na Figura 56, é feito o comparativo das tensões máximas de flexão em razão da quantidade de metacaulinita da mistura.

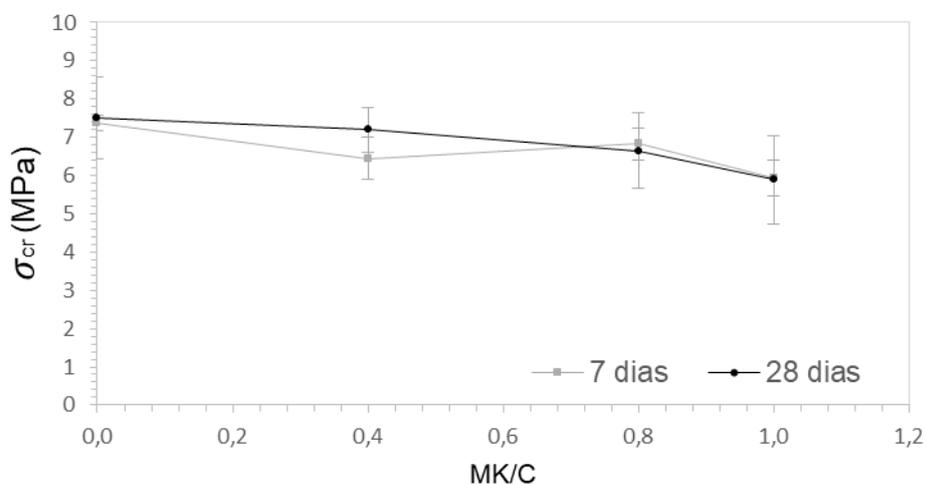


Figura 56 – Influência do teor de metacaulinita na tensão máxima.

Em geral, a tensão máxima das misturas não apresentou aumento entre 7 e 28 dias. Apenas a mistura M01 teve um pequeno acréscimo, de aproximadamente 11,47%.

Na Figura 57 é feita a comparação entre as tensões máximas (σ_{cr}) das misturas com presença de aditivo polimérico.

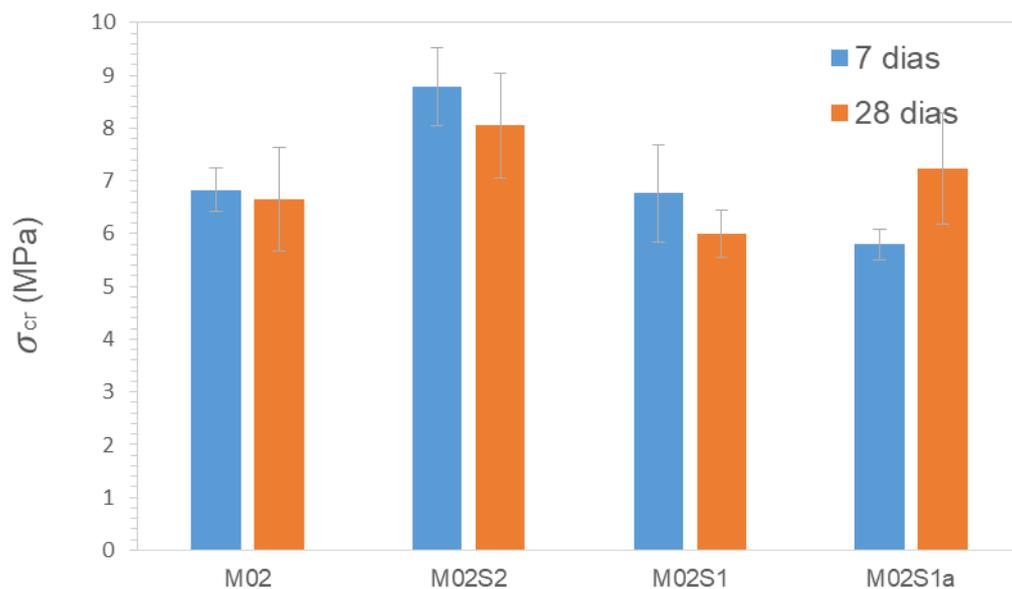


Figura 57 – Influência do teor de aditivo polimérico na tensão máxima.

Aos 28 dias, as misturas M02S2 e M02S1a tiveram uma tensão máxima maior que a da mistura M02, enquanto a tensão máxima da mistura M02S1 foi aproximadamente 9,62% menor que a da mistura M02.

3.2.1 Compressão diametral

Na Tabela 16 são apresentados os valores de tração medidos nos ensaios de compressão diametral do concreto e compósitos.

Tabela 16 – Resistência à tração por compressão diametral, medida por compressão diametral, do concreto e compósitos estudados

Resistência à tração por compressão diametral (MPa)					
Compósitos					
Mistura	7 dias		28 dias		
	Média	DP	Média	DP	
M0	5,88	0,19	6,07	0,43	
M1	5,32	0,18	7,34	0,56	
M2	4,58	0,14	7,57	0,23	
M3	4,27	0,22	6,23	0,28	
M2S2	3,76	0,27	4,32	0,42	
M2S1	3,38	0,37	3,8	0,15	
M2S1a	4,01	0,21	4,55	0,32	
Concreto					
28 dias		28 + 7 dias		28 + 28 dias	
Média	DP	Média	DP	Média	DP
2,92	0,31	2,96	0,11	3,07	0,11

Na Figura 58, é feito o comparativo da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos em razão da quantidade de metacaulinita da mistura.

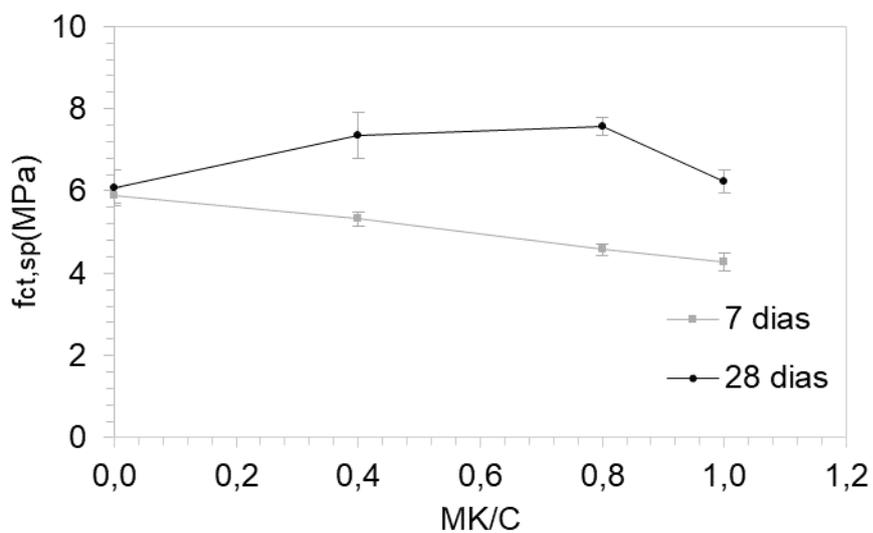


Figura 58 – Influência do teor de metacaulinita na resistência à tração.

Pode ser observado um aumento significativo na resistência à tração nas misturas com presença de metacaulinita, entre 7 e 28 dias de cura. Essas misturas apresentaram resistência menor aos 7 dias que a mistura M0 que não possui metacaulinita, porém aos 28 dias todas obtiveram resultados maiores que a mesma.

Na Figura 59, o comparativo entre as resistências à tração das misturas com aditivo polimérico pode ser observado.

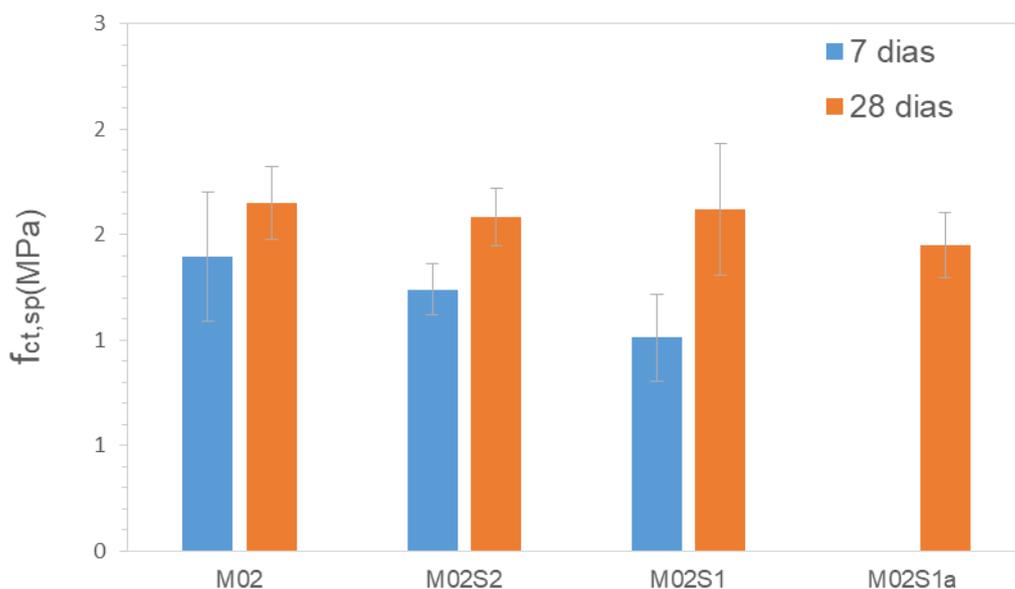


Figura 59 – Influência do teor de aditivo polimérico na resistência à tração.

A partir desse gráfico pode-se observar que apesar de também terem uma melhora na resistência à tração entre 7 e 28 dias, as misturas com o aditivo polimérico obtiveram valores similares à mistura base, M02, aos 7 dias quanto aos 28 dias de cura.

Na Figura 60 pode-se observar o modo de rompimento geral dos corpos de prova no ensaio de compressão diametral dos compósitos cimentícios e na Figura 61 o modo de ruptura dos corpos de prova de concreto.



Figura 60 – Rompimento dos corpos de prova de compressão diametral.



Figura 61 – Aspecto da ruptura dos corpos de prova de concreto

3.2 Aderência concreto-compósito

3.2.1 Ensaio de tração por compressão diametral

Na Tabela 17 pode-se observar os resultados das resistências de aderência dos ensaios de tração indireta dos conjuntos concreto-compósito para as Rugosidades R1, R2 e R3 aos 7 e 28 dias.

Tabela 17 – Resultado dos ensaios de compressão diametral dos conjuntos reparados.

Mistura	7 dias		28 dias					
	R1		R1		R2		R3	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	1,32	0,24	1,41	0,32	1,60	0,38	1,89	0,08
M01	1,21	0,14	1,43	0,22	1,61	0,39	2,22	0,68
M02	1,40	0,31	1,65	0,15	1,72	0,12	2,39	0,43
M03	1,51	0,16	1,83	0,29	1,92	0,56	2,57	0,10
M02S1	1,01	0,21	1,62	0,31	-	-	-	-
M02S1a	-	-	1,45	0,16	-	-	2,21	0,26
M02S2	1,24	0,12	1,59	0,14	-	-	-	-

Os ensaios com as misturas M02S1 e M02S2 não tiveram prosseguimento, pois ao realizar-se a caracterização e avaliação da resistência de aderência dessas misturas, pôde-se observar resistências muito abaixo do esperado.

Na Figura 62 pode-se observar a comparação da resistência dos conjuntos reparados das Rugosidades 1, 2 e 3 aos 28 dias de cura, em razão do teor de metacaulinita nas misturas do reparo.

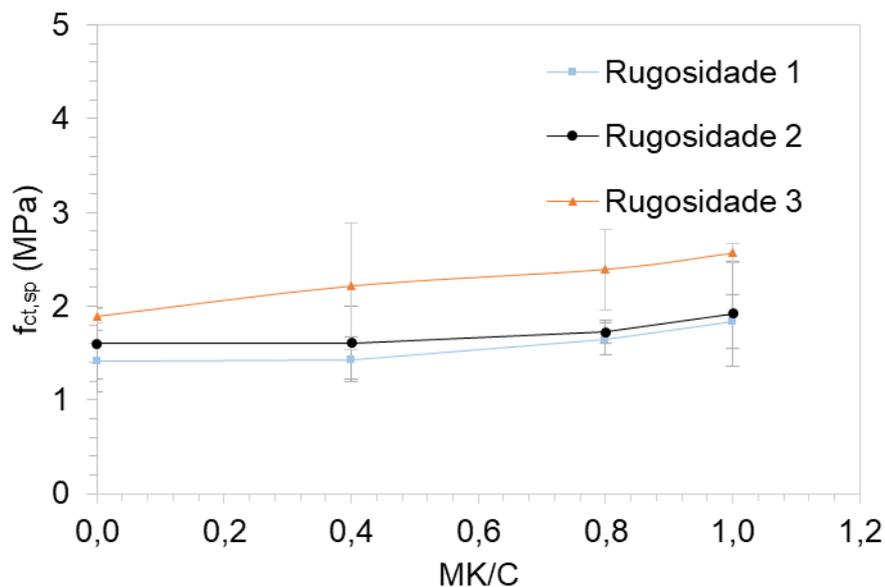


Figura 62 – Influência do teor de metacaulinita na resistência de aderência à tração, aos 28 dias, dos conjuntos reparados.

A partir desse gráfico podemos observar um aumento na resistência das misturas com o aumento do teor da metacaulinita. A mistura M1 apresenta aderência comparável a mistura M0, nas duas rugosidades, R1 e R2. Houve um progressivo aumento da resistência de aderência quando o teor de metacaulinita foi aumentado para 0,8 (M02) e 1,0 (M03), nas mesmas rugosidades. A influência do teor de metacaulinita parece ser maior na rugosidade R3. Além disso, observa-se que também há aumento da resistência de aderência com o aumento da rugosidade, como esperado.

Podemos observar na Figura 63 o comparativo das resistências dos conjuntos reparados com a Rugosidade 1 em 7 dias e 28 dias. Essa comparação é importante na definição da melhor idade para colocação em carga do sistema reparado. Com esse gráfico é possível observar que todas as misturas obtiveram aumento na resistência de aderência à tração entre 7 e 28 dias.

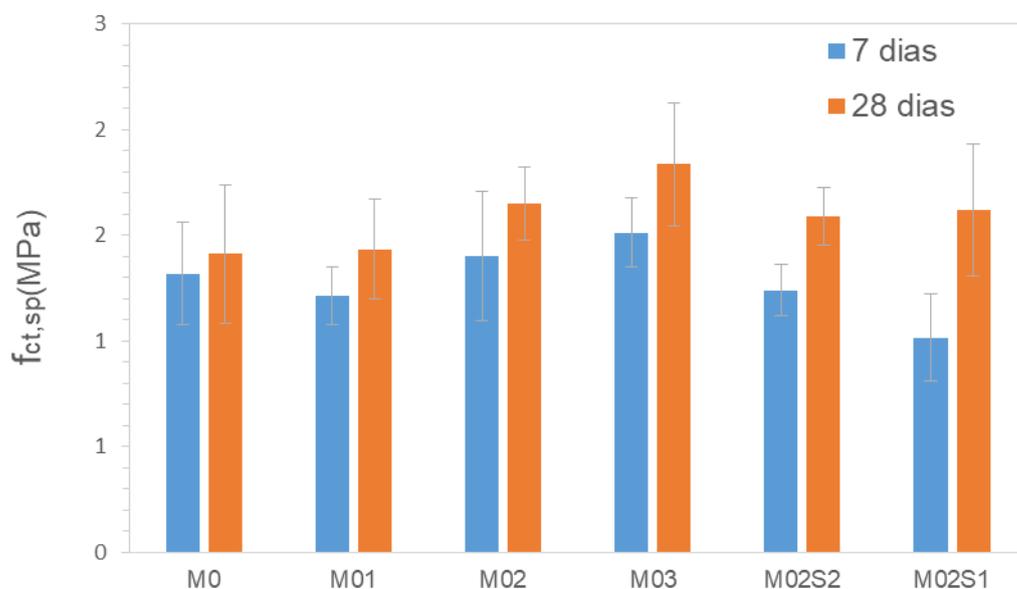


Figura 63 – Influência da idade de ensaio na resistência à tração dos corpos de prova da Rugosidade 1

Na Figura 64 é realizada o comparativo da resistência à tração com 7 e 28 dias entre as misturas com adição do aditivo polimérico. Esse comparativo foi realizado com a Rugosidade 1.

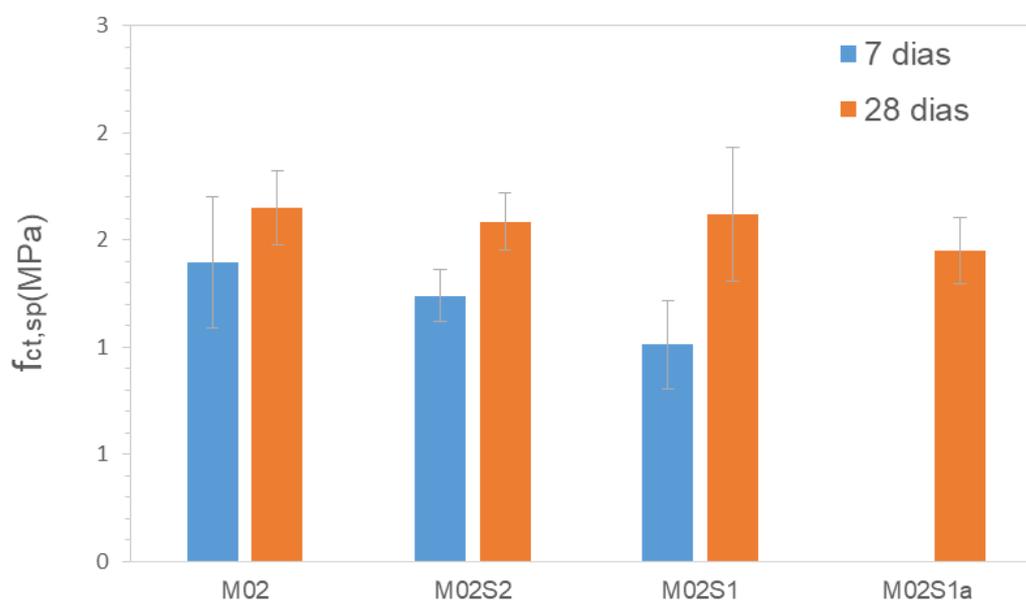


Figura 64 – Influência do teor de aditivo polimérico na resistência de aderência à tração do conjunto reparado.

Então, podemos observar que os resultados da resistência, aos 28 dias, foram semelhantes, entre as 4 misturas. Aos 7 dias, as misturas com aditivo polimérico obtiveram resultados ligeiramente menores que a mistura M02.

A ruptura dos corpos de prova reparados foi similar e aconteceu na ligação para todas as misturas utilizadas (Figura 65). Nas misturas com presença de adesivo sintético (Figura 66), no entanto, houve uma maior ligação entre o concreto e o compósito, causando uma transferência maior de material compósito para o concreto.

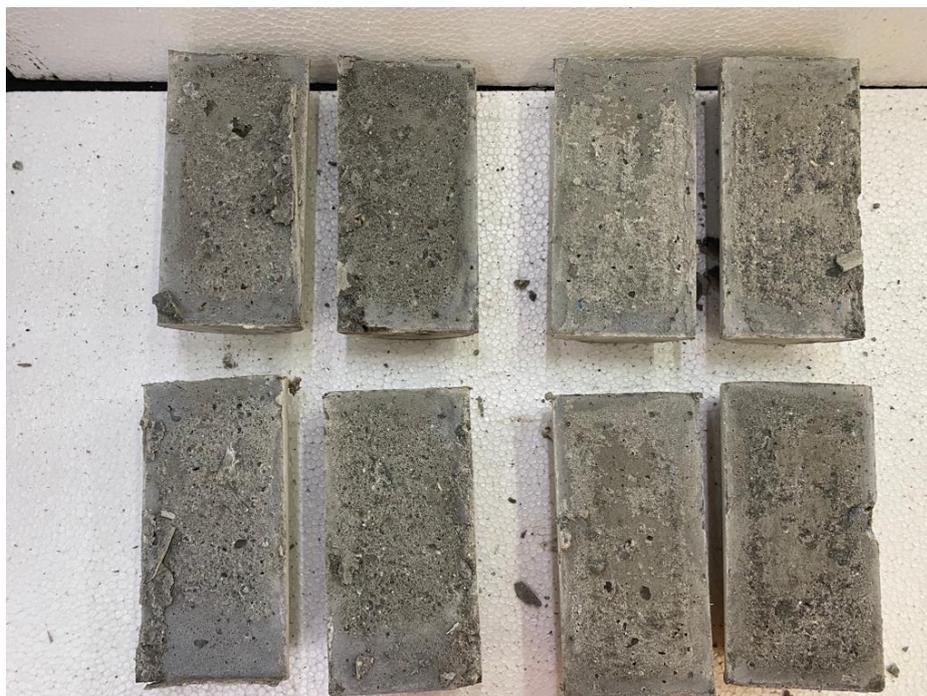


Figura 65 – Ruptura dos corpos de prova da mistura M01 reparados de compressão diametral.



Figura 66 – Ruptura dos corpos de prova reparados da mistura M02S1 com presença de adesivo sintético.

Pode-se observar que a presença do adesivo sintético interfere na aderência concreto-compósito. A partir do seu uso, os materiais apresentam transferência de material de reparo para a camada de concreto após sua ruptura, como observado na Figura 64. Portanto, o uso do adesivo limitou o valor da resistência de aderência.

3.3 Ensaios de cisalhamento oblíquo nos conjuntos reparados

3.3.1 Resistência à compressão

Na Tabela 18, os valores de resistência à compressão dos conjuntos reparados são apresentados.

Tabela 18 – Resistências à compressão dos conjuntos reparados.

Misturas	Resistência à compressão (MPa)					
	20 graus		25 graus		30 graus	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	10,80	1,06	11,99	2,13	13,72	0,71
M01	10,79	0,51	13,37	1,17	17,85	2,30
M02	13,42	2,00	16,60	1,02	21,93	4,32
M02S1	16,49	2,76	16,91	1,06	14,76	2,19
M03	19,14	0,71	22,11	2,27	25,15	0,81

Na Figura 67, é apresentada a comparação entre as resistências à compressão nas três angulações estudadas e o teor de metacaulinita.

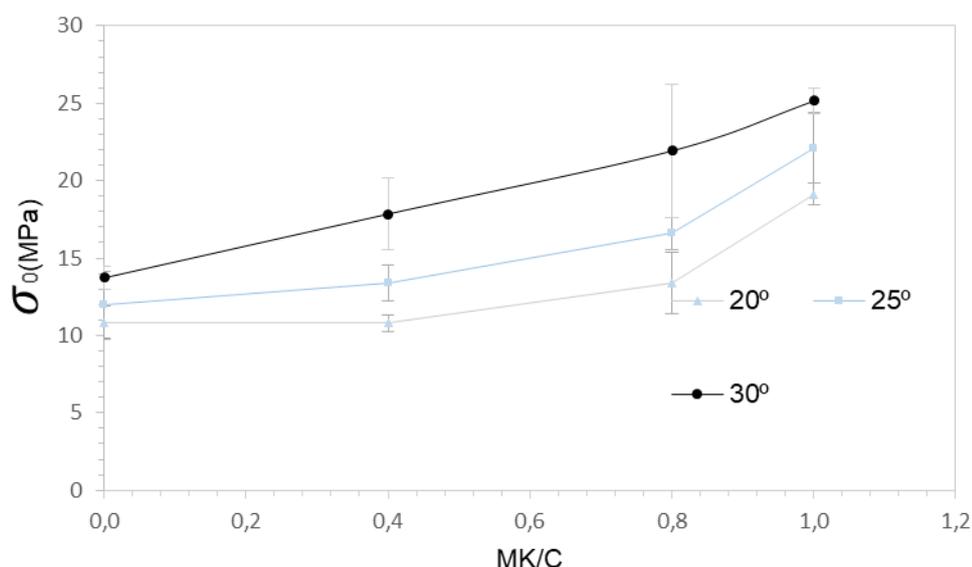


Figura 67 – Influência do teor de metacaulinita do reparo na resistência à compressão do conjunto reparado.

A partir do gráfico pode-se observar que a resistência à compressão do conjunto reparado cresce com o aumento do teor de metacaulinita das misturas. No entanto, pode-se também observar que essa resistência possui valores inferiores aos valores de resistência à compressão do concreto e compósitos aos 28 dias. Na Figura 68, é realizada uma comparação entre as misturas M02 e M02S1a.

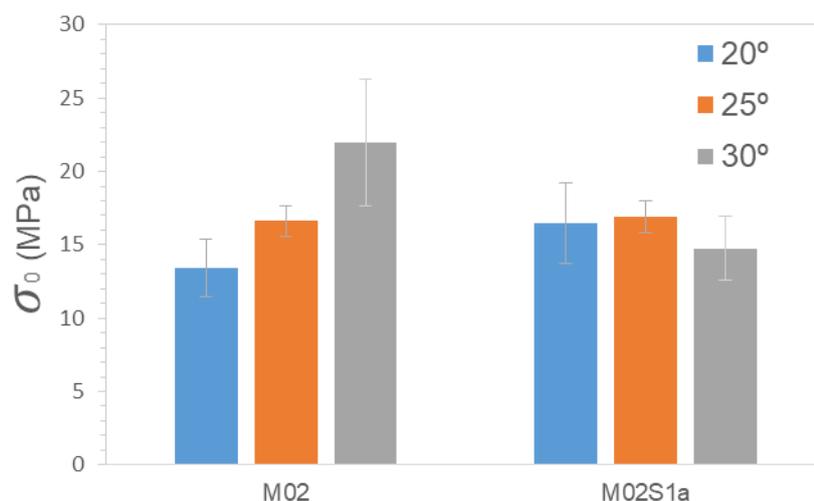


Figura 68 – Influência do teor de aditivo polimérico do reparo na resistência à compressão

Nas angulações de 20 e 25°, a resistência a compressão da mistura M02S1a foi maior em cerca de 18,62% e 1,83%, respectivamente. Já na angulação de 30°, a mistura M02 foi maior em cerca de 48,58%.

3.3.1.1 Tipos de ruptura

Na Figura 69 podemos observar o modo de ruptura da mistura M0 para as angulações de 30°, 25° e 20°.

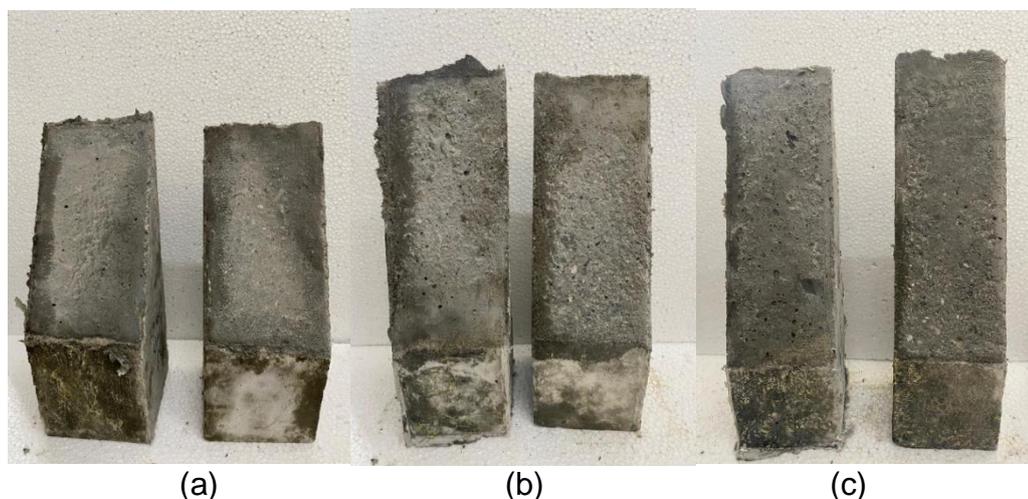


Figura 69 – Modos de ruptura para mistura M0, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.

Na Figura 70 podemos observar o modo de ruptura da mistura M01 para as angulações de 30°, 25° e 20°.

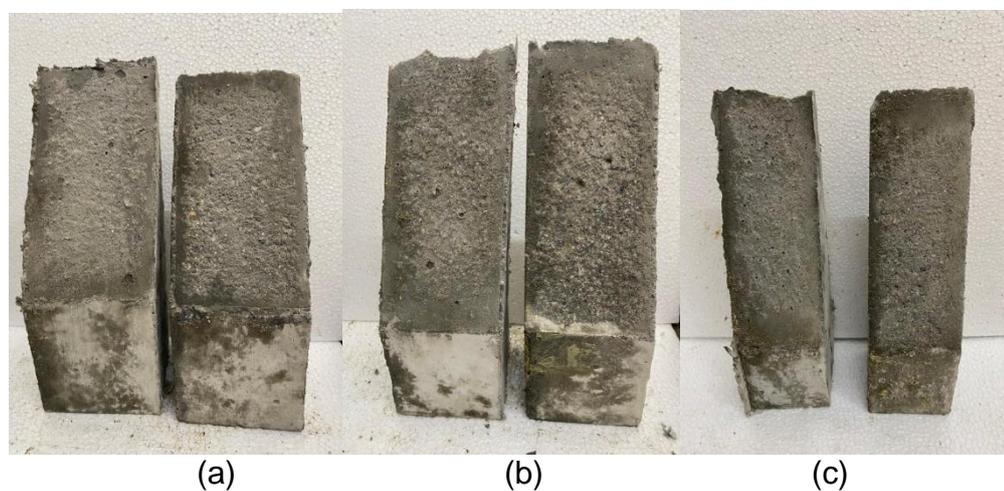


Figura 70 – Modos de ruptura para mistura M01, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.

Na Figura 71 podemos observar o modo de ruptura da mistura M02 para as angulações de 30°, 25° e 20°.

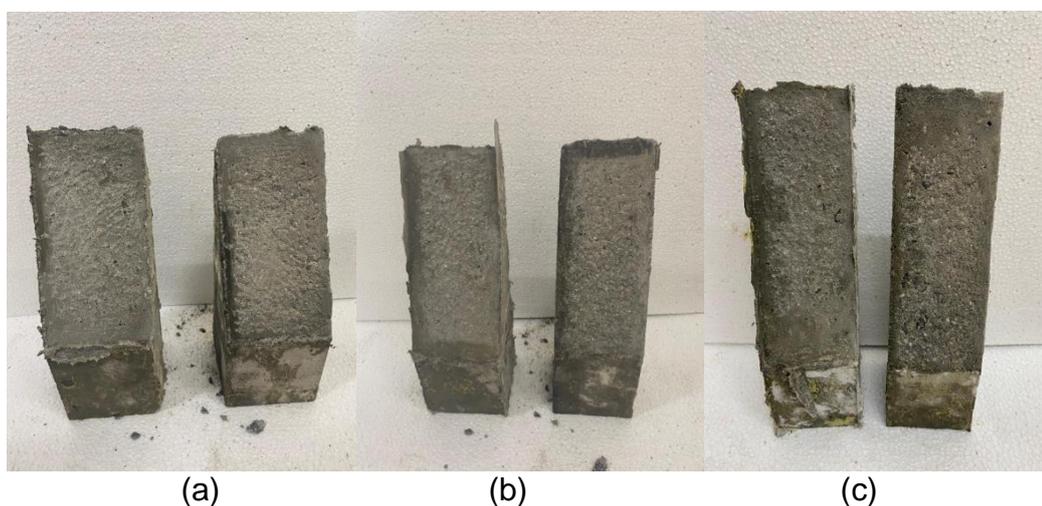


Figura 71 – Modo de ruptura para mistura M02, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.

Na Figura 72 podemos observar o modo de ruptura da mistura M02S1a para as angulações de 30°, 25° e 20°.

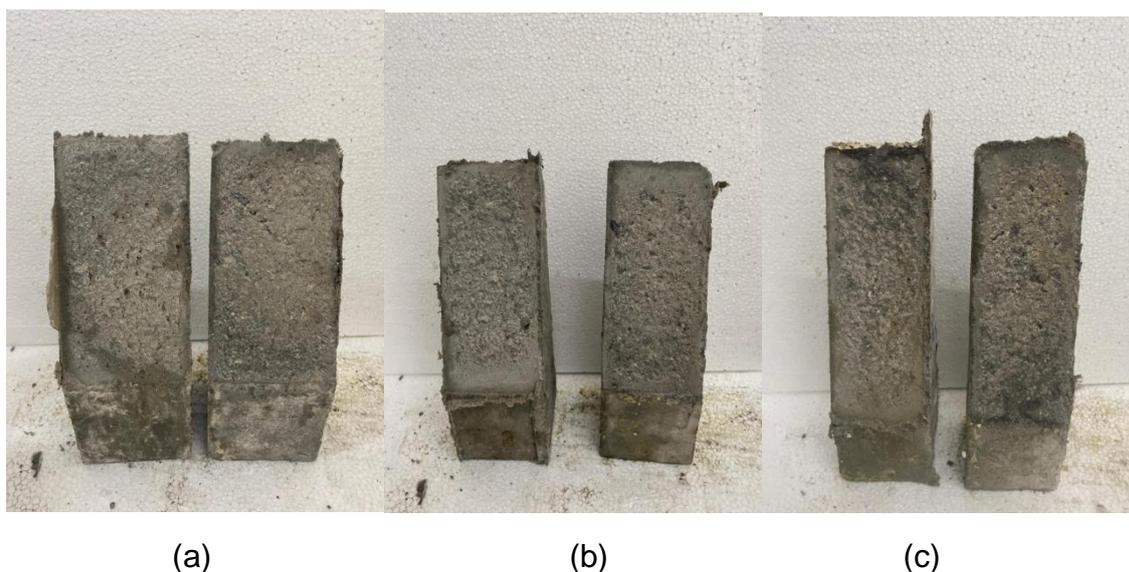


Figura 72 – Modo de ruptura para mistura M02S1a, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.

Na Figura 73 podemos observar o modo de ruptura da mistura M02S1a para as angulações de 30°, 25° e 20°.

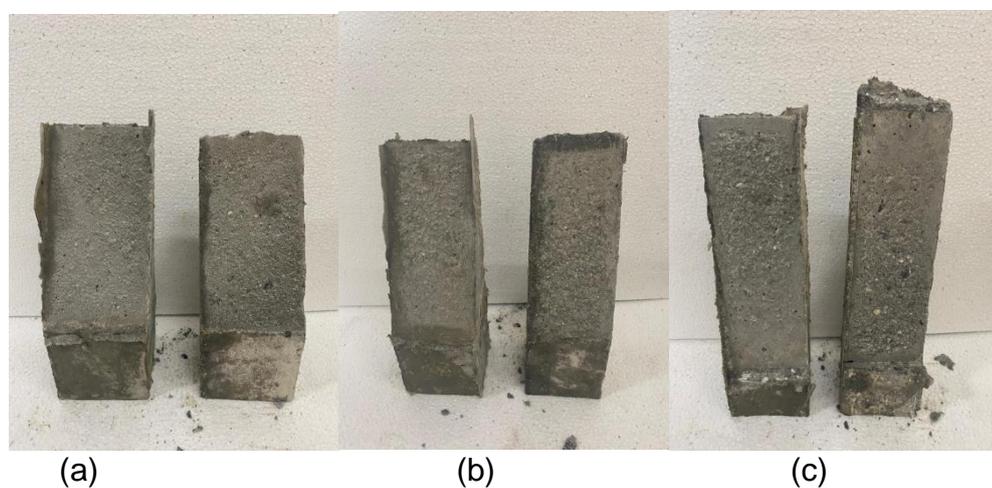


Figura 73 – Modos de ruptura para a mistura M03, (a) 30°, (b) 25°, (c) 20°.

Pode-se observar através dessas imagens que todas as misturas tiveram ruptura na ligação com leves vestígios de concreto e material de reparo, chamada de ruptura Tipo D, segundo a EN12615 (2001). Na mistura M02S1a,

em que o aditivo polimérico foi utilizado, podemos observar que houve uma maior transferência do material compósito cimentício para o concreto.

3.3.2 Resistência de aderência

A partir dos valores das tensões de ruptura obtidos nos ensaios, foi possível calcular as tensões de cisalhamento para as três angulações previamente apresentadas, 20°, 25° e 30°. Na Tabela 19 são apresentados os resultados das resistências de aderência calculadas para cada conjunto concreto-reparo.

Tabela 19 – Resistências de aderência dos conjuntos reparados

Misturas	Tensão de cisalhamento (MPa)					
	20 graus		25 graus		30 graus	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	3,47	0,34	4,59	0,82	5,94	0,31
M01	3,47	0,16	5,12	0,45	7,73	1,00
M02	4,31	0,64	6,36	0,39	8,62	1,26
M03	6,15	0,23	8,47	0,87	10,89	0,35
M02S1a	5,30	0,89	6,48	0,41	6,39	0,95

Na Figura 74, a comparação entre as tensões de cisalhamento nas três angulações estudadas e o teor de metacaulinita é realizada.

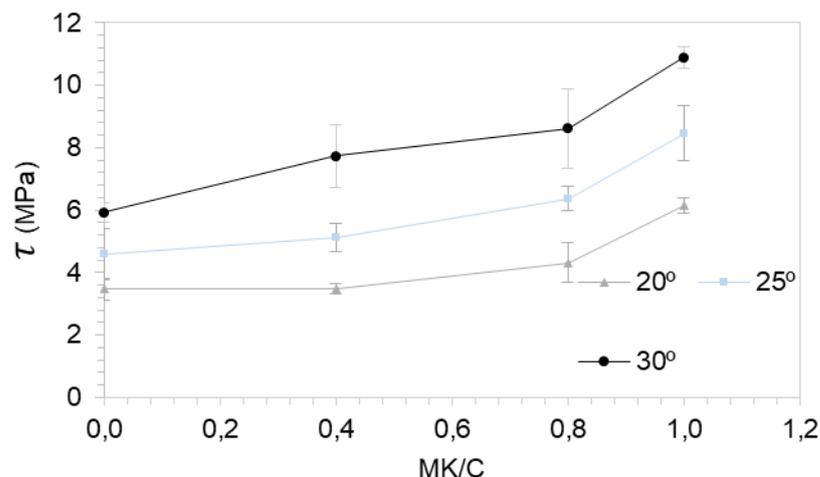


Figura 74 – Influência do teor de metacaulinita do reparo na tensão de cisalhamento

Pode-se observar a partir desse gráfico que as misturas com maior teor de metacaulinita obtiveram maiores valores de tensão de cisalhamento. Em comparação com M0, M01 manteve sua tensão de cisalhamento constante na angulação de 20° e obteve um aumento de 11,55% e 30,13% nas angulações de 25° e 30°, respectivamente. M02 cresceu 24,21% (20°), 38,56% (25°) e 45,12% (30°). Já M03, obteve crescimento de 77,23% (20°), 84,53% (25°) e 83,33% (30°) se comparado com M0.

Mirmoghtadaei *et al.* (2015) também observa que as propriedades de ligação das amostras podem ser melhoradas com a utilização da porcentagem adequada de metacaulinita. Os melhores valores de resistência de aderência obtidos no estudo deles foram com substituição de 10% de cimento por metacaulinita. Isso é explicado pela presença de aluminato no metacaulim.

Na Figura 75 pode-se ver a mesma comparação, mas agora entre a mistura base M02 e a mistura com aditivo polimérico, M02S1a.

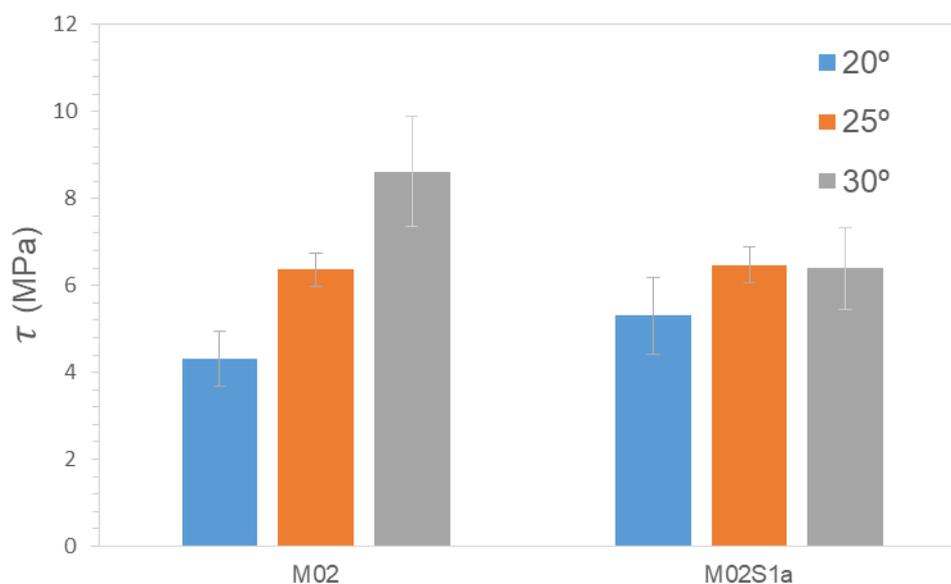


Figura 75 – Influência do teor de aditivo polimérico do reparo na tensão de cisalhamento.

A resistência de aderência de M02S1a, nas angulações de 20° e 25°, foi maior do que os respectivos valores encontrados para a mistura M02. No entanto, em 30°, a tensão de cisalhamento foi 25,87% menor na mistura M02S1a que na M02. Além disso, na mistura M02S1a também podemos observar um comportamento diferente ao encontrado nas demais misturas, onde houve uma pequena diminuição, de aproximadamente 1,4%, da resistência de aderência entre a angulação de 25° e 30°.

3.3.3 Tensões normais

Na Tabela 20 são apresentados os resultados das tensões normais calculadas.

Tabela 20 – Tensões normais dos conjuntos reparados

Misturas	Tensão normal (MPa)					
	20 graus		25 graus		30 graus	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
M0	1,26	0,12	2,14	0,38	3,43	0,18
M01	1,26	0,06	2,39	0,21	4,46	0,57
M02	1,57	0,23	2,97	0,18	4,98	0,73
M02S1	1,93	0,32	3,02	0,19	3,69	0,55
M03	2,24	0,08	3,95	0,41	6,29	0,20

A comparação entre as tensões normais nas três angulações estudadas e o teor de metacaulinita é realizada na Figura 76.

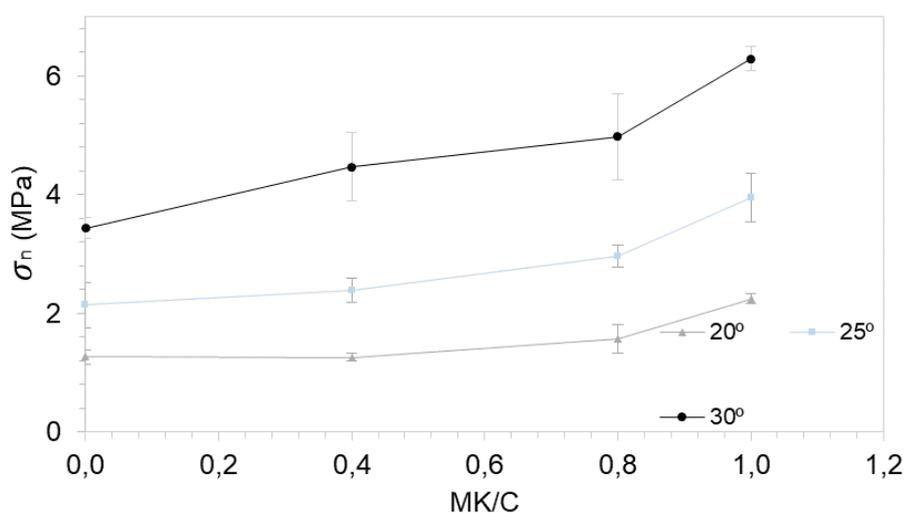


Figura 76 – Influência do teor de metacaulinita do reparo na tensão normal.

Como observado no gráfico da tensão de cisalhamento, a tensão normal também obteve maiores valores nas misturas com maior teor de metacaulinita.

Na Figura 77 podemos observar a comparação entre a mistura base M02 e a mistura com aditivo polimérico, M02S1a.

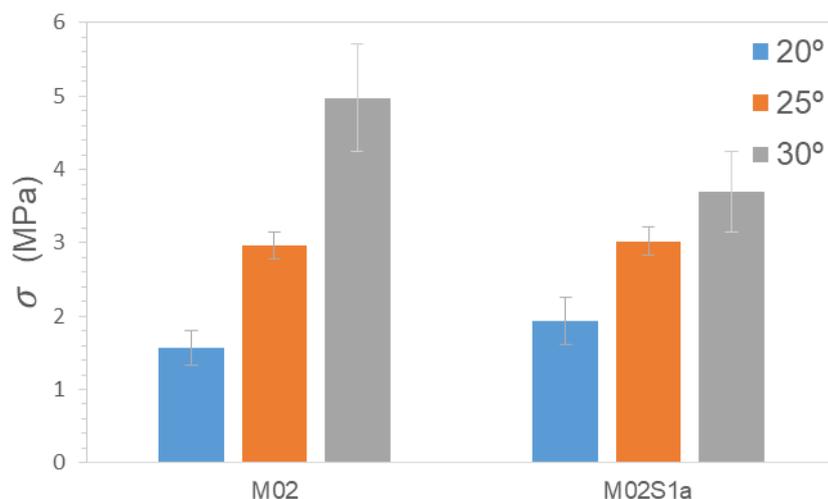


Figura 77 – Influência do teor de aditivo polimérico na tensão normal.

Na angulação de 20° e 25°, as tensões normais da mistura M02S1a foram superiores à da M02. Porém, para a angulação de 30°, a mistura M02 apresentou tensão normal maior.

3.3.4 Coesão e fricção

Na Figura 78 temos a correlação entre os valores da tensão de cisalhamento e da tensão normal. Para aritmeticamente descrever essa correlação, a equação linear de Mohr-Coulomb foi utilizada, ver a Equação 16.

$$\tau_n = c + \sigma_n \operatorname{tg}(\Phi) \quad (16)$$

Onde:

τ_n é a tensão de cisalhamento;

c é a coesão;

σ_n é a tensão normal;

Φ é o ângulo de fricção.

A coesão, c , representa o ponto onde a tensão normal é “zero”, e $\text{tg}(\phi)$, chamado de coeficiente de fricção (μ), é o coeficiente angular da reta ajustada aos pontos nas curvas.

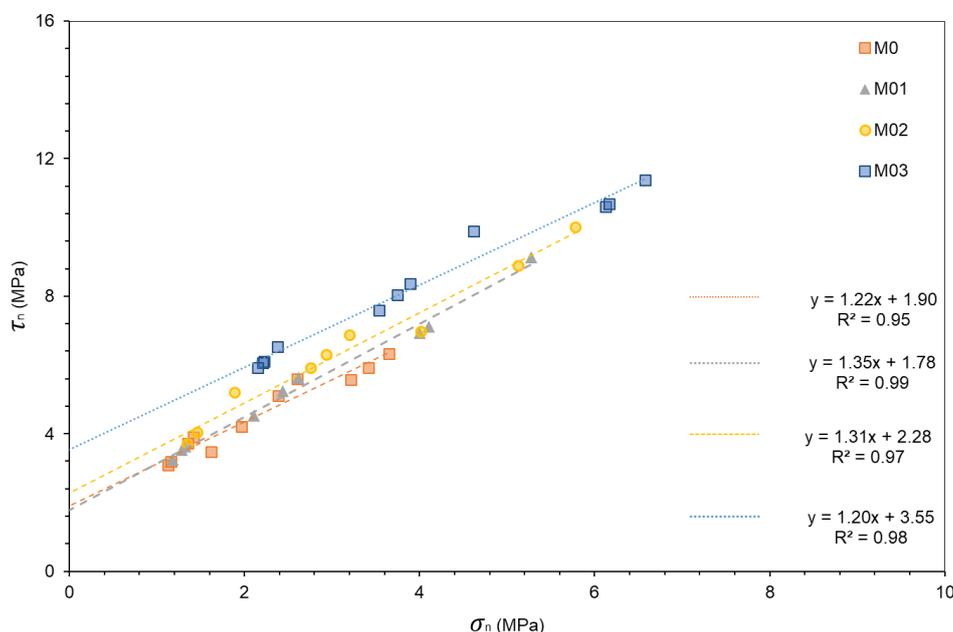


Figura 78 – Correlação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal.

O coeficiente de fricção obteve variações não significativas entre as misturas. Ele cresceu ligeiramente entre as misturas M0 e M01, cerca de 10,66%, e em seguida caiu, até atingir o seu menor valor na mistura M03, que possuía o maior teor de metacaulinita entre as misturas. De acordo com os valores dos coeficientes de fricção, foram determinados os seguintes ângulos de fricção das misturas $50,7^\circ$ (M0), $53,5^\circ$ (M01), $52,6^\circ$ (M02) e $50,2^\circ$ (M03).

Zanotti *et al.* (2018) cita que é amplamente reconhecido que a rugosidade da superfície afeta diretamente o coeficiente de fricção. Neste estudo, a rugosidade superficial dos corpos de prova, em todas as misturas, foi mantida constante, então, é de se esperar que os valores encontrados sejam similares.

Na Figura 79 pode-se observar a relação da coesão, obtida através das equações encontradas no gráfico da Figura 78, com o aumento do teor de metacaulinita no reparo.

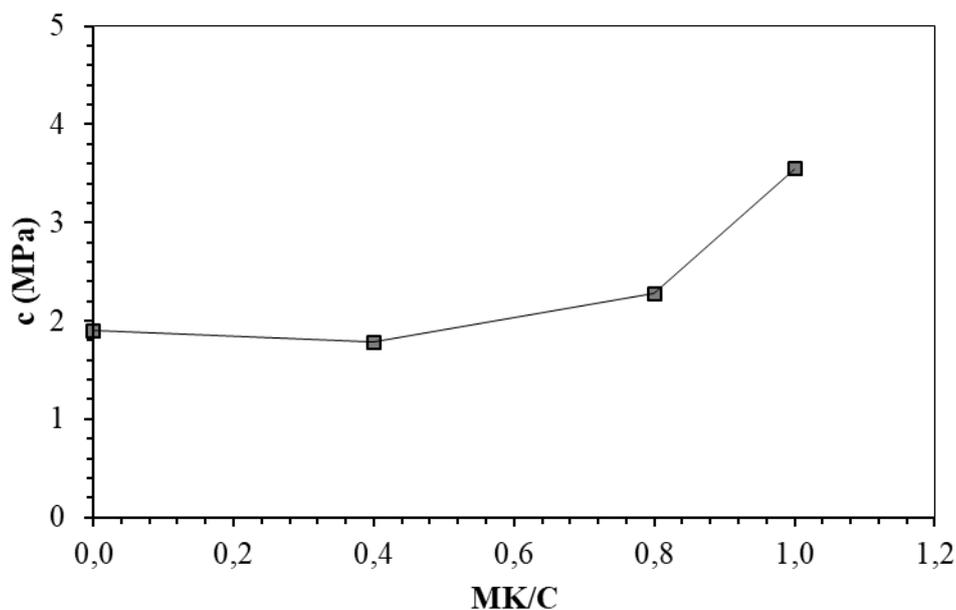


Figura 79 – Influência do teor da metacaulinita na coesão.

Nesse gráfico podemos observar uma queda de aproximadamente 6,32% na coesão na mistura M01, que possui o fator MK/C igual a 0,4, em comparação com a mistura M0. Após isso, o gráfico começa a ascender, crescendo cerca de 21,93% em M02 e 55,7% em M03, também em comparação com M0.

3.3.5 Correlação entre os ensaios de compressão diametral e slant shear

Para uma melhor comparação entre os resultados encontrados nos dois ensaios de aderência, os valores de resistência de aderência encontrados nos ensaios de compressão diametral (fct, sp) foram correlacionados com os valores encontrados nos ensaios de slant shear (τ), com a mesma rugosidade (R2) e para cada angulação. Assim, o gráfico da Figura 80 foi elaborado. O resultado mostra, neste experimento, uma correlação linear com elevado coeficiente de correlação (R^2).

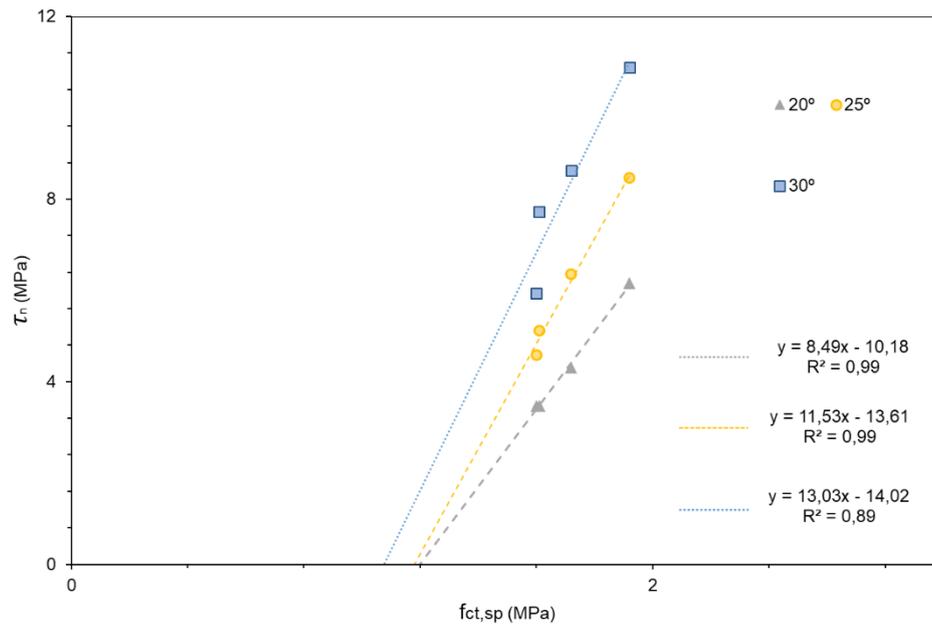


Figura 80 – Correlação entre as resistências de aderência encontradas nos ensaios de cisalhamento oblíquo e compressão diametral.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusões

Esse trabalho teve como objetivo analisar a aderência entre o concreto e reparos estruturais feitos de compósitos cimentícios com substituição parcial do cimento por metacaulinita e aditivo polimérico. Para realizar essa comparação, ensaios de tração indireta e cisalhamento oblíquo foram realizados. Além disso, ensaios de caracterização dos materiais base (concreto e compósitos) foram realizados para definir os parâmetros para um bom desempenho do material de reparo.

A partir dos ensaios de caracterização dos compósitos foi possível concluir:

- O aumento do teor de metacaulinita ocasiona o maior aumento de resistência à compressão entre 7 e 28 dias, quando comparado a mistura sem metacaulinita;
- A presença do adesivo sintético diminui significativamente a resistência à compressão das misturas comparado com as misturas sem a presença de adesivo sintético;
- As misturas com adesivo sintético apresentaram maiores valores de deflexão de primeira fissura e máxima se comparados com as misturas sem adesivo sintético;

A partir dos ensaios de compressão diametral nos conjuntos reparados foi possível concluir:

- O aumento da rugosidade representou um aumento na resistência de aderência;
- O aumento do teor de metacaulinita nos compósitos, utilizados como camada de reparo, resultou em resistências de aderência maiores;
- O envelhecimento de 7 para 28 dias resultou, como esperado, em um ganho de resistência de aderência. Essa informação serve para definir a idade adequada para colocação em carga do sistema reparado;

- As misturas com aditivo polimérico obtiveram resultados de resistência de aderência semelhantes à sua mistura base;
- A ruptura ocorreu predominantemente na ligação, havendo transferência de compósito para o concreto nas misturas com adesivo sintético.

A partir dos ensaios de cisalhamento oblíquo foi possível concluir:

- Os parâmetros estudados (resistência à compressão, tensão de cisalhamento e tensão normal) tiveram comportamento semelhantes com o aumento do teor de metacaulinita. Ao aumentar o teor de metacaulinita, esses parâmetros também cresceram;
- Houve maior transferência de material compósito para o concreto, quando utilizada a mistura com aditivo polimérico, deixando vestígios de compósito na camada de concreto;
- Os resultados obtidos com mistura com aditivo polimérico (M02S1a) foram semelhantes ou um pouco abaixo da sua mistura base (M02);
- A coesão na interface aumenta com o aumento do teor de metacaulinita;
- O coeficiente de fricção entre as misturas de reparo estudadas e o concreto não apresentou variações significativas;
- Na comparação entre as resistências de aderência encontradas nos ensaios de cisalhamento oblíquo e tração por compressão diametral, foi encontrado um elevado valor de coeficiente de correlação;
- Conforme verificado na análise dos resultados, o ângulo de 30° recomendado pela norma é o que promove a situação mais crítica para obtenção da resistência de aderência.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se que sejam realizados testes utilizando essas misturas de compósitos cimentícios com diferentes tipos de rugosidades no substrato, como as realizadas com jateamento de água e areia ou só água. Avaliando, dessa forma, os parâmetros que poderiam ser melhorados por diferentes formas de preparo de superfície.

Sugere-se averiguar que tipo de rugosidade empregada em laboratório se assemelhe aquelas usadas no campo, a rugosidade com apicoamento manual e com jato de areia e água, ou só água.

Outra sugestão é a utilização de outros materiais na substituição do cimento. Mesclando, por exemplo, cinzas volantes e metacaulinita.

Pode-se também ser utilizadas pontes de aderência na ligação entre substrato e reparo estrutural.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C882 / C882M. Standard Test Method. Bond Strength of Epoxy-Resin Systems used with Concrete by Slant Shear, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1404 / C1404M. Standard Test Method for Bond Strength of Adhesive Systems Used with Concrete as Measured by Direct Tension, 2003.

ABNT NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR 5739:2007 - Concreto: Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT NBR NM 53: 2009 – Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR 45:2006 - Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR NM30:2001 – Agregado miúdo: Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 129

ABNT NBR NM 248:2003 - Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR 8522:2017 - Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR 7222:2017 - Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR: 12653: Materiais pozolânicos-Especificação. 1992

ABNT. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR 7215: Cimento portland: Determinação da resistência à compressão.

ABNT, 1996. ABNT NBR 9833: Concreto fresco—Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. 2005.

BS 6319 – Part 4. Testing of resin compositions for use in construction. Method for measurement of bond strength (Slant Shear Test), British Standard Institution, London, 8pp, 1984. 130

BS 6319 – Part 7. Testing of Resin Compositions for Use in Construction Part 7: Method for Measurement of Tensile Strength, British Standard Institution, London, 10pp, 1985.

BS EN 12615. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of slant shear strength, 1999.

AHMED, S.F.U.; MIHASHI, H. A review on durability properties of strain hardening fibre reinforced cementitious composites (SHFRCC), *Cem. Concr. Compos.*, p. 365–376, 2007.

ALEXANDER, K.M.; WARDLAW, J.; GILBERT, D.J. Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete, in: A.E. Brooks, K. Newman (Eds.), *The Structure of Concrete*, Cement and Concrete Association, London, 1968.

AL-GEMEEL, A.N.; ZHUGE, Y. Experimental investigation of textile reinforced engineered cementitious composite (ECC) for square concrete column confinement, *Constr. Build. Mater.*, p. 594–602, 2018.

ARAIN, M.F.; WANT, M.; CHEN, J.; ZHANG, H. Study on PVA fiber surface modification for strain-hardening cementitious composites (PVA-SHCC), *Constr. Build. Materials*, p. 107–116, 2019.

AUSTIN, S.A.; ROBINS, P.J. Development of a patch test to study the behaviour of shallow concrete patch repairs, *Mag Concr Res*, p. 221–229, 1993.

BEUSHAUSEN, H.; Alexander, M. Bond strength development between concretes of different ages, *Mag. Concr. Res.* , p. 65–74, 2008.

BS EN 12615. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of slant shear strength, 1999.

BEUSHASEN, H.; ALEXANDER, M.G. Bond strength development between concretes of different ages. *Mag. Concr. Res.* 2008.

BRAUSTEIN, Felipe Aguiar. Estudo da aderência entre concretos e argamassas industriais e compósitos cimentícios reforçados com fibra: avaliação em diferentes idades e do uso de ponte de aderência. UERJ, Rio de Janeiro, 2020.

CARBONEL MUNOZ, M. A., HARRIS, D.K.; AHLBORN, T.M.; FROSTER, D.C. Bond performance between ultrahigh-performance concrete and normal-strength concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, p. 26, 2014.

CHESTNEY, M.A. Concrete Patch Repair Bond Strength, Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, 1996.

CEN TC104, prEN104 801—Draft European Standard on Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures, 1995.

CLÍMACO, J.C.T.S. Avaliação da resistência de aderência entre concretos de diferentes idades. 31^a Reunião do IBRACON. São Paulo. 1989.

CLÍMACO, J.C.T.S. Repair of Structural Concrete Involving the Addition of New Concrete. Thesis. Polytechnic of Central London. 1990.

CODE, CEB-FIP Model. Comité Euro-International du Béton Secretariat Permanent. Case Postale, v. 88. 2010.

ESPECHE, A.D.; LEON, J. Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test, *Construct. Build. Mater.*, p. 1222–1235, 2011.

EN 12615. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of slant shear strength. 2000.

EN 1504. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Structural and non-structural repair, 2005.

EN 1542. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods - Measurement of bond strength by pull-off. 1999.

FAROUK, A. I. B.; HARUNA, S.I. Evaluation of bond strength between ultra-high performance concrete and normal strength concrete: an overview, *Jurnal Kejuruteraan*, p. 41–51, 2020.

FELEKOGLU, B.; TOSUN-FELEKOGLU, K.; RANADE, R.; ZHANG, Q.; LI, V. C. Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC, *Compos. Part B Eng*, p. 359–370, 2014.

HOU, L.; WANG, J.; HUANG, T.; SHEN, C.; ASLANI, F.; CHEN, D. Flexural behaviour of corroded reinforced concrete beams repaired with ultra-high toughness cementitious composite, *Constr. Build. Mater*, p. 1127–1137, 2019.

JÚLIO, E.N.B.; BRANCO, F.A.B.; SILVA, V.D. Concrete-to-concrete Bond Strength. Influence of the roughness of the substrate surface, *Constr. Build. Mater*. P. 675–681, 2004.

KHATIB, J.M.; WILD, S. Sulphate resistance of metakaolin mortar. *Cement and concrete research*, p. 83-92, 1998.

LAVELLE, J.A. Acrylic latex-modified portland cement, *ACI Mater*, p. 41–48, 1988.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Estructuras de hormigón armado, Tomo I: bases para el dimensionado de estructuras de hormigón armado. Editora El Ateneo, Buenos Aires, Argentina, 1993.

LI, V. C. Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure. Springer. University of Michigan. 2019.

LI, M.; LI, V. C. High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites for Fast, Durable Concrete Repair—Material Properties. *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 1. p. 3-12. 2011.

LIN, J. X.; SONG, Y.; XIE, Z.H.; GUO, Y. C.; YUAN, B.; ZENG, J.; WEI, X. Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers, *J. Build. Eng.*, p. 29, 2020.

LIU, T.; WEI, H.; ZOU, D.; ZHOU, A.; JIAN, H. Utilization of waste cathode ray tube funnel glass for ultra-high performance concrete, *J. Clean. Prod.* p. 249. 2020.

LOPES, F. F. Blendagens de resíduos siderúrgicos na composição de adições minerais para substituição parcial de cimento Portland na produção de concreto. 2019. Belo Horizonte.

MEDINA, E. A. Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio. 2011. São Paulo.

METACAULIM do Brasil. Sustentabilidade. Metacaulim HP e HP ULTRA: contribuindo para sustentabilidade. 2022. Disponível em: <<https://www.metacaulim.com.br/sustentabilidade-metacaulim-do-brasil.html>>.

MOMAYEZ A.; EHSANI M.R.; RAMEZANIANPOUR A.A.; RAJAIE H. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research* v. 35, p. 748-757, 2005.

MONTEIRO, J.A. Evaluating patch repair bond strength, MSc Thesis, Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, 1993.

NADERI, M.; CLELAND, D.; LONG, A.E. In situ test methods for repaired concrete structures, in: *RILEM Symp. Adhesion between Polymers and Concrete*, Chapman and Hall, p. 707–718, 1986.

NADERI, M.; CLELAND, D.; LONG, A.E. Bond strength of patch repair mortars for concrete, in: RILEM Symp. Adhesion between Polymers and Concrete, Chapman and Hall Ltd, pp. 235–244, 1986.

OHAMA, Y.; DEMURA, K.; NAGAO, H.; OGI, T. Adhesion of polymer-modified mortars to ordinary cement mortar by different test methods, in: Proc. RILEM Symp Adhesion between Polymers and Concrete, Chapman and Hall, p. 719–729, 1986.

PAN, B.; LIU, F.; ZHUGE, Y.; ZENG, J.; LIAO, J. ECCs/UHPFRCCs with and without FRP reinforcement for structural strengthening/repairing: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2022.

PAN, Y.G. Bond strength of concrete patch repairs, PhD thesis, Loughborough University, 1995.

PARKER JR., F.; SHOEMAKER, M. L. PCC: Pavement Patching Materials and Procedures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, V. 3, No. 1. p. 29–47. 1991.

QIAN, S. Influence of Concrete Material Ductility on the Behavior of High Stress Concentration Zones. University of Michigan. 2007.

RILEM Report: Fracture Mechanics of Concrete Structures, L. Elfgren (ed.), Chapman and Hall, London 1989.

ROBINS, P.J.; AUSTIN, S.A. A unified failure envelope from the evaluation of concrete repair bond tests, *Mag Concr Res*, p. 57–68, 1995.

SAHMARAM, M.; YUCEL, H. E.; YILDIRIM, G.; AL-EMAM, M.; LACHEMI, M. Investigation of the bond between concrete substrate and ECC overlays. *J. Mater. Civ. Eng.* p. 167–174. 2014.

SANTOS, P.M.; JÚLIO, E.N. A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces. *Construct. Build. Mater.* p. 912–923. 2013.

SANTOS, P.M.; JÚLIO, E. N. Interface shear transfer on composite concrete members, *ACI Struct. J.* p. 113–122. 2014.

SANTANA, L. G. L.; MAGALHÃES, M. S. Influência do teor de metacaulinita em compósitos cimentícios reforçados com fibra. 4º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis. 2022.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Constr. Build. Mater.*, p. 741-751, 2015.

SILFWERBRAND, J., Shear bond strength in repaired concrete structures, *Mater. Struct.* p. 419–424, 2003.

SUI, L.; LUI, M.; fu, K.; XING, F.; LI, P.; ZHOU, Y.; CHEN, C. Effect of engineered cementitious composite on the bond behavior between fiber-reinforced polymer and concrete. *Compos. Struct.* p. 775–788. 2018.

TIAN, J.; WU, X.; ZHENG, Y.; HU, S.; DU, Y., WANG, W.; SUN, C.; ZHANG, L. Investigation of interface shear properties and mechanical model between ECC and concrete, *Constr. Build. Mater.* p. 12–27, 2019.

THOMAS, M. D. A.; HOOTON, R. D.; SCOTT, A.; ZIBARA, H. The Effect of Supplementary Cementitious Materials on Chloride Binding in Hardened Cement Paste. *Cement Concrete Res.*, p. 1–7, 2012.

Wang, B; LI, Q.; LIU, F.; XU, S.; ZHOU, H.; TAN, K. Comparison of cast-in-situ and prefabricated UHTCC repair systems under bending. *J. Mater. Civ. Eng.* 2018.

WANG, B.; XU, S.; LIU, F. Evaluation of tensile bonding strength between UHTCC repair materials and concrete substrate. *Constr. Build. Mater.* 2016.

WILD, S.; KHATIB, J.M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement Concr. Res.*, 1996.

WILD, S.; KHATIB, J.M.; ROOSE, L.J. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement-metakaolin-fly ash pastes. *Adv Cem Res.*, 1998.

YAN, Y.; LIANG, H.; LU, Y.; HUANG, Y. Behaviour of concrete-filled steel-tube columns strengthened with high-strength CFRP textile grid-reinforced high-ductility engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.*, p. 269, 2021.

YEOH, K.M.; CLELAND, D.J.; LONG, A.E. The effect of environmental conditions on interface adhesion properties of concrete patch repairs, in: *Proc. 2nd Int. Conf. Inspection, Appraisal, Repair and Maintenance of Buildings and Structures*, Jakarta, p. 237–244, 1993.

YILDIRIM, G.; SAHMARAN, M.; AL-EMAM, M.K.M.; HAMEED, R.K.H.; AL-NAJJAR, Y.; LACHEMI, M. Effects of compressive strength, autogenous shrinkage, and testing methods on bond behavior of high-early-strength engineered cementitious composites, *ACI Mater.*, p. 409–418, 2015.

YU, K.; LI, L.; YU, J.; WANG, Y.; YE, J. XU, Q. Direct tensile properties of engineered cementitious composites: a review. *Constr. Build. Mater.* p. 346–362, 2018.

YU, K. Q.; ZHU, W.; DING, Y.; LU, Z. D.; YU, J. T., XIAO, J.Z. Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP), *Cem. Concr. Res.*, p. 124, 2019.

YUCEL, H. E.; JASHAMI, H.; SAHMARAN, M.; GULER, M.; YAMAN, I. O. Thin ECC Overlay Systems for Rehabilitation of Rigid Concrete Pavements. *Magazine of Concrete Research*, V. 65, No. 2. p. 108-120. 2013.

VALIKHANI, A.; JAHROMI, A.J.; MANTWY, I.M.; AZINAMINI, A. Effect of mechanical connectors on interface shear strength between concrete substrates and UHPC: Experimental and numerical studies and proposed design equation. *Constr. Build. Mater.*, p. 267, 2021.

XU, S.L.; CAI, X.R. Experimental study and theoretical models on compressive properties of ultrahigh toughness cementitious composites, *J. Mater. Civ. Eng.*, p. 1067–1077, 2010.

ZAMBAS, C.; Structural repairs to the monuments of the Acropolis—The Parthenon, *Proc. Instn. Civ. Engrs., Civ Engng*, p. 166–176, 1992.

ZANOTTI, C.; BANTHIA, N.; PLIZZARI, G. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs, *Cement Concr. Res.*, p. 117–126, 2014.

ZANOTTI, C.; BORGES, P.H.R.; BHUTTA, A.; BANTHIA, N. - Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: Effect of curing regime and PVA fiber reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, v. 80. p. 307-316. 2017.

ZANOTTI, C.; ROSTAGNO, G.; TINGLEY, B. Further evidence of interfacial adhesive bond strength enhancement through fiber reinforcement in repairs. *Constr. Build. Mater.* 2018.

ZANOTTI, C.; RANDL, N. Are concrete-concrete bond tests comparable. *Cement and Concrete Composites*, v. 99. p. 80-88. 2019.

ZENG, J. J.; WANG, S. N.; FAN, Z. H.; XIONG, J. B. Improvement Effect and Mechanism of Metakaolin on marine concrete Chloride Penetration Resistance. *J. Wuhan Univ. Technology* 37, p. 22–28, 2015.

ZHANG, J.; LI, V. C. Monotonic and Fatigue Performance in Bending of Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composite in Overlay System. *Cement and Concrete Research*, V. 32, No. 3. p. 415-423. 2002.

ZHANG, Y.; ZHANG, C.; ZHU, Y.; CAO, J.; SHAO, X. An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC, *Constr. Build. Mater.*, p. 236, 2020.

ZHOU, J.; PAN, J.; LEUNG, C.K.Y. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression, *J. Mater. Civ. Eng.*, p. 27, 2015.