

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E  
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DE RESINAS  
GEOPOLIMÉRICAS PARA RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE  
CONCRETO

**JOADELIO CHAGAS SOARES**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE

DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

AGOSTO - 2020

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E  
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DE RESINAS  
GEOPOLIMÉRICAS PARA RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE  
CONCRETO

**JOADELIO CHAGAS SOARES**

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

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

AGOSTO - 2020

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E  
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DE RESINAS  
GEOPOLIMÉRICAS PARA RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE  
CONCRETO

**JOADELIO CHAGAS SOARES**

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

Aprovada em 28 de agosto de 2020.

Comissão examinadora:

---

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

---

Prof. Felipe José da Silva, D. Sc. – CPAR/IFRJ

---

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

---

Prof. Sergio Luis González Garcia, D. Sc. – LECIV/UENF

---

Prof. Dylmar Penteado Dias, D. Sc. – LECIV/UENF

(Orientador)

À Deus e aos meus pais.

## AGRADECIMENTO

Em 2016, decidi seguir a carreira acadêmica e iniciar os estudos para o doutorado, já imaginava os diversos obstáculos e desafios ao longo dos anos. Embora o cansaço e a sombra da desistência muitas vezes estivessem lá, a vontade de seguir em frente foi maior. Em todos os momentos, sabia que tinha o apoio de algumas pessoas importantes na minha vida: família, irmãos de uma vida, amigos de coração e mestres queridos. Aqui deixo meu registro, com carinho, respeito e gratidão:

Primeiramente, agradeço aos meus pais Joadelio e Dionice que desde criança me apoiaram com os estudos e inúmeras vezes se sacrificaram para garantir que não me faltasse nada, mesmo nos momentos mais difíceis;

Ao meu irmão Fabrício que me apoia, me compreende e não me falta nunca. Uma pessoa especial que desejo amor, carinho, toda a sorte do mundo e que pode contar comigo;

Ao meu orientador prof. Dylmar Dias que é responsável pela condução do meu aprendizado desde a graduação. Obrigado pelas ideias e soluções quando tudo parecia perdido. Sempre será um professor, um orientador e uma inspiração.

Ao amigo Manoel Paulo pela amizade de quase 25 anos, sempre me incentivando a seguir e realizar os meus sonhos. Quando achei que tudo estava errado, ouvi seus conselhos, e então me fez enxergar que aquele trabalho era importante e que tudo que hoje é grande um dia começou pequeno, com muito trabalho, relevância e, portanto, era isso que eu tinha que defender.

A minha amiga de longa data, Elaine Cristina, que está presente em todas etapas da minha vida e até me irrita com tanta confiança que deposita em mim. Obrigado pelo amor, carinho, por ser uma extensão da minha família e por acreditar.

À Liege Pacheco, grande amiga que posso contar sempre.

Agradeço eternamente a Célia Marta (*in memoriam*) que foi uma grande amiga e nos deixou fisicamente mas nunca na lembrança. Saudades do ombro amigo e dos conselhos valiosos.

Aos professores Sérgio Luis González, Jonas Alexandre e Guilherme Chagas pelas orientações e experiência acadêmica.

Ao professor Eduardo Atém e ao bolsista Rômulo pela ajuda incansável na realização dos ensaios mecânicos.

Aos técnicos de laboratório: José Roberto, Vanuzia, Milton e Gabriel (LAMAV) na realização e análise dos ensaios;

Aos colegas Raphaela, Jodimar Azevedo, Patrícia Silva, Ana, Valber, Larissa e Ana Luisa pela boa convivência e troca de experiências no laboratório.

À UENF e ao IFF pelo apoio fornecendo condições para que esse trabalho pudesse ser realizado;

À Empresa Metacaulim do Brasil e Diatom pela doação dos materiais essenciais à pesquisa.

A todos muito obrigado!

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	xii	
LISTA DE TABELAS.....	xix	
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxvi	
LISTA DE SIMBOLOS.....	xxvii	
RESUMO.....	xxxI	
ABSTRACT.....	xxxii	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Justificativas.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral.....	3
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Organização da tese.....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Considerações iniciais.....	5
2.2	Geopolímeros.....	5
2.2.1	Matérias-primas.....	9
2.2.1.1	Precursores.....	9
2.2.1.2	Ativadores alcalinos.....	10
2.2.2	Trabalhabilidade.....	11
2.2.3	Tempo de pega.....	12
2.2.4	Comportamento mecânico.....	13
2.3	Resistência na interface.....	14
2.3.1	Ensaio de cisalhamento losipescu (V-notched).....	15
2.3.2	Ensaio por cisalhamento duplo.....	19
2.3.3	Ensaio de tração por compressão diametral ( <i>Splitting test</i> ).....	21
2.3.4	Ensaio de cisalhamento por compressão ( <i>Slant Shear Test</i> ).....	21
2.4	Resistência de aderência.....	24
2.4.1	Tração na flexão.....	25
2.4.2	Tirante.....	26
2.5	Estudos presentes na literatura.....	28

2.5.1	Balaguru <i>et al.</i> (1999).....	28
2.5.2	Mazza (2010).....	30
2.5.3	Ueng <i>et al.</i> (2012).....	33
2.5.4	França (2017).....	35
2.6	Considerações finais.....	38
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>39</b>
3.1	Materiais.....	40
3.1.1	Metacaulim.....	40
3.1.1.1	Massa específica.....	40
3.1.1.2	Granulometria a laser.....	40
3.1.1.3	Granulometria por sedimentação.....	41
3.1.1.4	Composição química.....	42
3.1.1.5	Difração de raios X.....	43
3.1.1.6	Análises térmicas.....	45
3.1.1.7	Índice de atividade pozolânica.....	46
3.1.1.8	Microscopia eletrônica de varredura.....	47
3.1.2	Hidróxidos.....	49
3.1.3	Silicatos.....	50
3.1.4	Agregado miúdo.....	50
3.1.5	Agregado graúdo.....	51
3.1.6	Cimento Portland.....	52
3.1.7	Superplastificante.....	52
3.1.8	Água.....	54
3.1.9	Barras de aço.....	54
3.1.10	Chapas de aço.....	56
3.1.11	Resina epóxi comercial.....	56
3.2	Métodos.....	57
3.2.1	Dosagem do substrato de cimento Portland.....	57
3.2.2	Produção do substrato de cimento Portland.....	58
3.2.3	Rugosidade do substrato.....	60
3.2.4	Dosagem das resinas geopoliméricas.....	60
3.2.5	Produção das resinas geopoliméricas.....	62
3.2.6	Produção da resina epóxi comercial.....	64



3.2.7	Ensaio no estado fresco.....	65
3.2.7.1	Densidade de massa aparente.....	65
3.2.7.2	Retenção de água.....	66
3.2.7.3	Trabalhabilidade das resinas.....	68
3.2.7.4	Tempos de início e fim de pega das resinas geopoliméricas.....	69
3.2.8	Ensaio no estado endurecido.....	70
3.2.8.1	Densidade de massa aparente.....	70
3.2.8.2	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade...	71
3.2.8.3	Absorção de água por imersão e porosidade aparente.....	72
3.2.8.4	Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral.....	73
3.2.8.5	Módulo de elasticidade longitudinal, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson.....	75
3.2.8.6	Resistência à tração na flexão.....	77
3.2.8.7	Resistência ao cisalhamento pelo método losipescu.....	78
3.2.8.8	Resistência por cisalhamento duplo.....	81
3.2.8.9	Resistências ao cisalhamento e à tração por compressão diametral ( <i>splitting test</i> ).....	84
3.2.8.10	Resistência ao cisalhamento por compressão ( <i>slant shear test</i> )....	86
3.2.8.11	Resistência de aderência à tração na flexão.....	87
3.2.8.12	Resistência de aderência por ensaio de tirante.....	88
3.2.9	Técnicas analíticas.....	90
3.2.9.1	Difração de raios X.....	90
3.2.9.2	Análises térmicas.....	91
3.2.9.3	Microscopia eletrônica de varredura.....	91
3.3	Análise estatística.....	92
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>93</b>
4.1	Dosagem das resinas geopoliméricas.....	93
4.2	Estado fresco.....	95
4.2.1	Densidade de massa.....	95
4.2.2	Retenção de água.....	96
4.2.3	Consistência <i>flow-table</i> .....	98
4.2.4	Consistência <i>squeeze-flow</i> .....	100

4.2.5	Tempos de início e fim de pega.....	102
4.3	Estado endurecido.....	103
4.3.1	Substrato.....	104
4.3.1.1	Resistência à compressão axial e tração por compressão diametral.....	104
4.3.1.2	4.3.1.2. Módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson.....	105
4.3.1.3	Rugosidade dos substratos.....	106
4.3.2	Resinas geopoliméricas.....	109
4.3.2.1	Densidade de massa aparente.....	109
4.3.2.2	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade...	110
4.3.2.3	Absorção de água por imersão e porosidade aparente.....	112
4.3.2.4	Resistência à compressão e tração por compressão diametral.....	113
4.3.2.5	Módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson.....	116
4.3.2.6	Resistência à tração na flexão.....	120
4.3.2.7	Resistência ao cisalhamento pelo método <i>Isopescu</i> .....	121
4.3.2.8	Resistência ao cisalhamento duplo.....	125
4.3.2.9	Resistências ao cisalhamento e à tração por compressão diametral ( <i>splitting test</i> ).....	131
4.3.2.10	Resistência ao cisalhamento por compressão ( <i>slant shear</i> ).....	134
4.3.2.11	Resistência de aderência à tração na flexão.....	140
4.3.2.12	Resistência de aderência por ensaio de tirante.....	143
4.4	Técnicas analíticas.....	149
4.4.1	Difração de raios X.....	149
4.4.2	Análise térmica.....	150
4.4.3	Microscopia eletrônica de varredura.....	154
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>157</b>
5.1	Conclusões.....	157
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	160
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>161</b>

**ANEXO A..... 186**  
**ANEXO B..... 206**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelo conceitual de formação do geopolímero (Adaptado de Duxson <i>et al.</i> 2007a).....	6
Figura 2.2: Tendência das pesquisas sobre concreto geopolimérico.....	9
Figura 2.3: Esquema de carregamento sobre um corpo de prova losipescu e seus respectivos diagramas de força cortante e momento fletor (Adaptado da ASTM D 5379, 1998).....	17
Figura 2.4: Padrões típicos de ruptura das amostras losipescu (Adaptado de Stojcevski <i>et al.</i> 2018).....	19
Figura 2.5: Esquema do ensaio por cisalhamento duplo (Adaptado de Larralde <i>et al.</i> 2001).....	20
Figura 2.6: (a) Geometria do corpo de prova misto para <i>splitting test</i> ; (b) Seção transversal (Costa <i>et al.</i> 2018).....	21
Figura 2.7: Esquema das tensões atuantes num plano inclinado para o ensaio de cisalhamento ( <i>slant shear test</i> ).....	22
Figura 2.8: Tipos de ruptura: (a) Ruptura adesiva, (b) Ruptura coesiva (SALDANHA <i>et al.</i> , 2013).....	24
Figura 2.9: Esquema do corpo de prova para ensaio de tirante.....	26
Figura 2.10: Seções longitudinais e transversais da viga reforçada com fibras de carbono coladas com resinas geopoliméricas (BALAGURU <i>et al.</i> , 1999).....	29
Figura 2.11: Curvas carga <i>versus</i> flecha das vigas ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos (MAZZA, 2010).....	31
Figura 2.12: Curvas carga <i>versus</i> flecha das vigas ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos, até a carga máxima de 10,80 kN (MAZZA, 2010).....	33
Figura 2.13: Dimensões dos corpos-de-prova prismáticos de argamassa de cimento Portland colados com argamassa geopolimérica (UENG <i>et al.</i> , 2012).....	34
Figura 2.14: Regressão linear para os corpos-de-prova prismáticos de argamassa de cimento com interface de geopolímero e modo de ruptura tipo II (UENG <i>et al.</i> , 2012).....	35
Figura 2.15: Esquema e dimensões das vigas reparadas com argamassa geopolimérica, para ensaios de tração na flexão a quatro pontos. Todas as dimensões em mm (FRANÇA, 2017).....	36
Figura 3.1: Etapas do programa experimental.....	39

Figura 3.2: Curva granulométrica do metacaulim.....	41
Figura 3.3: Espectrômetro de fluorescência de raios-X.....	42
Figura 3.4: Ensaio de difratometria de raios X: (a) porta amostras com metacaulim; (b) equipamento difratômetro Miniflex 600 Rigaku.....	44
Figura 3.5: Difratoograma de raios X do metacaulim.....	45
Figura 3.6: Equipamento para análises térmicas: termogravimetria (TGA) e termodiferencial (DTA).....	45
Figura 3.7: Curva termogravimétrica (TG) e sua diferencial (DTG) do metacaulim.....	46
Figura 3.8: (a) Amostra de resina geopolimérica metalizada; (b) microscópio eletrônico de varredura (MEV); (c) aparelho para metalização das amostras.....	48
Figura 3.9: Micrografias do metacaulim: (a) 3500x; (b) 7000x.....	49
Figura 3.10: Curva granulométrica da areia.....	51
Figura 3.11: Curva granulométrica da brita.....	52
Figura 3.12: (a) Ensaio de tração direta de barra de aço instrumentada com <i>clip gage</i> ; (b) barra de aço após a ruptura.....	54
Figura 3.13: Curva tensão <i>versus</i> deformação para barra de aço nervurada tipo CA-60 (4,2mm).....	55
Figura 3.14: Curva tensão <i>versus</i> deformação para barra de aço lisa tipo CA-25 (6,3mm).....	55
Figura 3.15: Fabricação do concreto: (a) betoneira 145 litros; (b) molde para ensaio de abatimento do tronco de cone.....	59
Figura 3.16: Ensaio de rugosidade das amostras: (a) bloco cúbico; (b) corpo de prova semicilíndrico; (c) bloco prismático com uma das faces inclinada a 60°.....	61
Figura 3.17: (a) pesagem da água destilada; (b) água misturada com hidróxido de sódio ou potássio; (c) pesagem do silicato de sódio alcalino ou potássio na mistura prévia; (d) pesagem do metacaulim com a areia fina.....	63
Figura 3.18: Produção das resinas geopoliméricas: (a) materiais após a pesagem; (b) solução ativadora alcalina; (c) retirada dos materiais presos à parede do recipiente e à paleta; (d) mistura final dos materiais.....	64
Figura 3.19: Resina Viapoxi Adesivo. (a) componentes A e B antes da mistura; (b) preparo da resina epóxi comercial.....	65

Figura 3.20: Ensaio de retenção de água em resinas geopoliméricas.....	67
Figura 3.21: Ensaio de índice de consistência <i>flow-table</i> : (a) resina moldada no tronco de cone; (b) retirada do tronco de cone; (c) espalhamento da resina sobre a mesa de consistência após execução dos golpes.....	68
Figura 3.22: Ensaio de consistência método <i>squeeze-flow</i> : (a) dispositivos para realização do ensaio; (b) execução do ensaio em máquina universal.....	69
Figura 3.23: Corpos de prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm).....	70
Figura 3.24: Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	72
Figura 3.25: (a) Corpos-de-prova de resinas geopoliméricas com discos de neoprene; (b) retificadora para faceamento em corpos-de-prova de concreto.....	74
Figura 3.26: Posicionamento do corpo-de-prova cilíndrico para o ensaio de tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011).....	75
Figura 3.27: Ensaio de compressão axial: (a) leitura das deformações na máquina Controls; (b) corpo de prova após ruptura.....	76
Figura 3.28: (a) Corpo de prova instrumentado; (b) ensaio de compressão axial na máquina INSTRON 5582.....	76
Figura 3.29: Ensaio mecânicos em corpos de prova prismáticos: (a) ensaio à tração na flexão; (b) ensaio à compressão axial.....	78
Figura 3.30: Dimensões dos corpos de prova para o ensaio losipescu V-Notched.....	79
Figura 3.31: Distribuição de tensões na face do corpo-de-prova no ensaio losipescu, obtida por meio do uso do método de elementos finitos.....	80
Figura 3.32: (a) Molde de acrílico; (b) corpos de prova de resinas geopoliméricas e de resina epóxi comercial; (c) amostras instrumentadas com extensômetros; (d) ensaio de resistência ao cisalhamento losipescu V-Notched.....	81
Figura 3.33: Esquema de fabricação dos corpos de prova para cisalhamento duplo: (a) cubos colados com as resinas geopoliméricas ou epóxi comercial; (b) cubos e chapas de aço colados com resinas geopoliméricas ou epóxi comercial.....	82
Figura 3.34: (a) Moldes prismáticos para cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm; (b) moldagem dos corpos de prova; (c) corpos de prova cúbicos desmoldados; (d) cura úmida dos corpos de prova.....	83

Figura 3.35: (a) Colagem dos corpos de prova; (b) ensaio de aderência por cisalhamento duplo em prensa mecânica.....	83
Figura 3.36: Moldagem dos corpos de prova cilíndricos mistos: (a) moldes com anteparos metálicos; (b) moldes preenchidos com concreto-substrato; (c) corpos de prova desmoldados; (d) corpos de prova cilíndricos mistos.....	85
Figura 3.37: Posicionamento dos corpos de prova cilíndricos na prensa mecânica com planos de interface inclinados: (a) interface concreto-substrato/resina geopolimérica; (b) interface concreto-substrato/resina epóxi.....	86
Figura 3.38: (a) Corpos de prova prismáticos desmoldados; (b) execução do ensaio de cisalhamento por compressão ( <i>slant shear</i> ).....	87
Figura 3.39: (a) Corpo de prova quebrado em duas partes após o ensaio de tração na flexão a 3 pontos; (b) corpos de prova colados com resina geopolimérica; (c) ensaio de tração na flexão a três pontos.....	88
Figura 3.40: (a) Fôrmas de madeira; (b) moldagem dos tirantes de resina geopolimérica; (c) cura dos corpos de prova (tirantes e cilindros).....	89
Figura 3.41: (a) Ensaio de tração direta nos tirantes; (b) marcação das fissuras nas quatro faces dos tirantes.....	90
Figura 3.42: Amostras de resinas geopoliméricas e epóxi comercial extraídas da zona de fratura dos corpos de prova submetidos a ensaios mecânicos.....	91
Figura 4.1: Índice de consistência das resinas geopoliméricas.....	99
Figura 4.2: Índice de consistência das argamassas geopoliméricas (OLIVEIRA, 2018).....	100
Figura 4.3: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento pelo método <i>squeeze-flow</i> para velocidade de 0,1 mm/s.....	101
Figura 4.4: Curvas carga <i>versus</i> deslocamento pelo método <i>squeez-flow</i> para velocidade de 0,3 mm/s.....	101
Figura 4.5: Carga máxima das resinas geopoliméricas pelo método <i>squeeze-flow</i> .....	102
Figura 4.6: Tempos de início e fim de pega para as resinas geopoliméricas.....	103
Figura 4.7: Curva da resistência à compressão axial do concreto-substrato, em função da idade.....	105
Figura 4.8: Curva tensão <i>versus</i> deformação do substrato convencional.....	106
Figura 4.9: Perfil da rugosidade média da superfície dos blocos cúbicos de concreto-substrato.....	107

Figura 4.10: Perfil da rugosidade média da superfície dos corpos-de-prova semicilíndricos de concreto-substrato.....	107
Figura 4.11: Perfil da rugosidade média da superfície dos corpos-de-prova prismáticos de concreto-substrato.....	108
Figura 4.12: Resistência à compressão axial das resinas geopoliméricas, em função da idade.....	114
Figura 4.13: Tipo de ruptura das resinas geopoliméricas: (a) ensaio de resistência à compressão axial; (b) ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	116
Figura 4.14: Curva tensão <i>versus</i> deformação da resina s.S - h.S até 40% da resistência.....	118
Figura 4.15: Curva tensão <i>versus</i> deformação da resina s.S - h.P até 40% da resistência.....	119
Figura 4.16: Curva tensão <i>versus</i> deformação da resina s.P - h.S até 40% da resistência.....	119
Figura 4.17: Curva tensão <i>versus</i> deformação da resina s.P - h.P até 40% da resistência.....	119
Figura 4.18: Ruptura do corpo-de-prova prismático de resina geopolimérica no ensaio de tração a flexão em 3 pontos.....	121
Figura 4.19: Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deformação da resina geopolimérica s.S – h.S.....	122
Figura 4.20: Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deformação da resina geopolimérica s.S – h.P.....	122
Figura 4.21: Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deformação da resina geopolimérica s.P – h.S.....	122
Figura 4.22: Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deformação da resina geopolimérica s.P – h.P.....	123
Figura 4.23: Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deformação da resina epóxi comercial.....	123
Figura 4.24: Modo de ruptura dos corpos-de-prova pelo método losipescu: (a) resinas geopoliméricas; (b) resina epóxi comercial.....	125
Figura 4.25: Resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina e substrato-resina-chapa de aço.....	126



Figura 4.26: Valores médios da resistência ao cisalhamento normalizada do substrato-resina em função do deslocamento.....	128
Figura 4.27: Valores médios da resistência ao cisalhamento normalizada do substrato-resina-chapa de aço em função do deslocamento.....	128
Figura 4.28: Modo de ruptura dos blocos cúbicos colados com resinas. a) s.S – h.S; b) s.S – h.P; c) s.P – h.S; d) s.P – h.P; e) resina epóxi.....	129
Figura 4.29: Modo de ruptura dos blocos cúbicos e chapas de aço coladas com resinas. a) s.S – h.S; b) s.S – h.P; c) s.P – h.S; d) s.P – h.P; e) resina epóxi.....	130
Figura 4.30: Comparação entre o coeficiente de aderência das resinas geopoliméricas e epóxi com os obtidos por Costa <i>et al.</i> (2018) para concreto convencional e concreto leve.....	132
Figura 4.31: Ruptura dos corpos de prova mistos concreto-substrato e resina geopolimérica; b) ruptura dos corpos de prova mistos concreto-substrato e resina epóxi.....	133
Figura 4.32: Modos de ruptura dos corpos de prova ensaiados a 30° e 45°.....	134
Figura 4.33: Resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina e substrato-resina-aço dos corpos-de-prova prismáticos.....	135
Figura 4.34: Comparação entre os valores experimentais e as prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resina).....	137
Figura 4.35: Comparação entre os valores experimentais e as prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resina-aço).....	137
Figura 4.36: Resistência ao cisalhamento normalizada na interface substrato-resina e substrato-resina-aço dos corpos-de-prova prismáticos.....	138
Figura 4.37: Comparação entre a resistência ao cisalhamento normalizada de substrato-resina com as obtidas por Ding <i>et al.</i> (2017) e Costa <i>et al.</i> (2018).....	140
Figura 4.38: Modos de ruptura dos corpos de prova prismáticos com interface a 60° coladas com resinas. a) s.S – h.S; b) s.S – h.P; c) s.P – h.S; d) s.P – h.P; e) resina epóxi.....	141
Figura 4.39: Modos de ruptura dos corpos de prova prismáticos e chapas de aço com interface a 60° coladas com resinas: a) s.S – h.S; b) s.S – h.P; c) s.P – h.S; d) s.P – h.P; e) resina epóxi.....	141
Figura 4.40: Resistência à tração na flexão de corpos-de-prova de substrato sem reparo e reparados com resinas geopoliméricas e epóxi comercial.....	142

Figura 4.41: Modos de ruptura sob tração na flexão dos corpos-de-prova prismáticos de substrato colado com: a) s.S – h.S; b) s.S – h.P; c) s.P – h.S; d) s.P – h.P; e) resina epóxi .....	144
Figura 4.42: Valores médios do coeficiente de conformação superficial para os tirantes confeccionados com resinas geopoliméricas.....	145
Figura 4.43: Comparação entre os valores normalizados da resistência de aderência das resinas geopoliméricas e barras lisas com os obtidos por França (2017).....	148
Figura 4.44: Comparação entre os valores normalizados da resistência de aderência das resinas geopoliméricas e barras nervuradas com os obtidos por França (2017).....	148
Figura 4.45: Difratoograma das resinas geopoliméricas.....	149
Figura 4.46: Curvas de <i>TG</i> e <i>DTG</i> da resina geopolimérica s.S – h.S.....	152
Figura 4.47: Curvas de <i>TG</i> e <i>DTG</i> da resina geopolimérica s.S – h.P.....	152
Figura 4.48: Curvas de <i>TG</i> e <i>DTG</i> da resina geopolimérica s.P – h.S.....	152
Figura 4.49: Curvas de <i>TG</i> e <i>DTG</i> da resina geopolimérica s.P – h.P.....	153
Figura 4.50: Curvas de <i>TG</i> e <i>DTG</i> da resina epóxi comercial.....	153
Figura 4.51: Micrografias das resinas geopoliméricas com silicato de sódio alcalino: (a) s.S – h.S (40x); (b) s.S – h.S (700x); (c) s.S – h.P (40x); (d) s.S – h.P (700x).....	155
Figura 4.52: Micrografias das resinas geopoliméricas com silicato de potássio: (a) s.P – h.S (40x); (b) s.P – h.S (700x); (c) s.P – h.P (40x); (d) s.P – h.P (700x).	155
Figura 4.53: Micrografias da resina epóxi comercial: (a) aumento de 40x; (b) aumento de 400x.....	156
Figura 4.54: Micrografia da resina geopolimérica s.S – h.S (700x).....	156

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Ensaio disponível para avaliar a resistência na interface concreto-concreto (adaptado de Saldanha <i>et al.</i> 2013) .....	15
Tabela 2.2: Normas disponíveis para os ensaios <i>slant shear</i> .....	22
Tabela 2.3: Resultados dos ensaios mecânicos em vigas reforçadas com fibras de carbono e resinas geopoliméricas (adaptada de Balaguru <i>et al.</i> 1999).....	30
Tabela 2.4: Valores de carga máxima e respectiva flecha máxima das vigas (adaptada de Mazza, 2010).....	32
Tabela 2.5: Modos de ruptura dos corpos-de-prova prismáticos com interface geopolimérica com diferentes inclinações (adaptada de Ueng <i>et al.</i> , 2012).....	34
Tabela 2.6: Séries e características das vigas (FRANÇA, 2017).....	37
Tabela 3.1: Diâmetro das partículas do metacaulim ( $D_{10}$ , $D_{50}$ , $D_{90}$ , $D_{\text{médio}}$ ).....	41
Tabela 3.2: Diâmetro das partículas do metacaulim ( $D_{10}$ , $D_{50}$ , $D_{90}$ , $D_{\text{médio}}$ ).....	42
Tabela 3.3: Composição química e propriedades físicas do metacaulim.....	43
Tabela 3.4: Requisitos químicos do metacaulim - NBR 12653 (ABNT, 2015)...	44
Tabela 3.5: Análise química dos hidróxidos de sódio e potássio. Valores fornecidos pelo fabricante.....	49
Tabela 3.6: Propriedades químicas e físicas do silicato de sódio alcalino e de potássio. Valores fornecidos pelo fabricante.....	50
Tabela 3.7: Composição química e propriedades físicas do cimento Portland CPV-ARI.....	53
Tabela 3.8: Características técnicas do aditivo PLASTOL 5035 (Viapol). Dados fornecidos pelo fabricante.....	53
Tabela 3.9: Propriedades físicas e mecânicas das barras de aço.....	56
Tabela 3.10: Características técnicas do Viapoxi Adesivo. Dados fornecidos pelo fabricante.....	57
Tabela 3.11: Composição do concreto em $\text{kg/m}^3$ (FRANÇA, 2017).....	58
Tabela 3.12: Tipos de corpos de prova e respectivos ensaios.....	60
Tabela 3.13: Nomenclatura das resinas geopoliméricas e componentes.....	62
Tabela 3.14: Dimensões dos tirantes, em mm.....	89

Tabela 4.1: Razões molares e resistências à compressão axial das resinas geopoliméricas com mesma proporção em massa dos materiais.....	94
Tabela 4.2: Razões molares e resistências à compressão axial das resinas geopoliméricas com mesma proporção em massa dos materiais.....	94
Tabela 4.3: Densidade de massa para resinas geopoliméricas.....	95
Tabela 4.4: Classificação das argamassas quanto à densidade em seu estado fresco (NBR 13281, 2005).....	96
Tabela 4.5: Classificação das argamassas quanto à densidade no estado fresco (adaptado de Carasek, 2007).....	96
Tabela 4.6: Retenção de água das resinas geopoliméricas.....	97
Tabela 4.7: Classificação das argamassas quanto à retenção de água de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005).....	98
Tabela 4.8: Classificação quanto à consistência de argamassas geopoliméricas, de acordo com Ghosh <i>et al.</i> (2012).....	99
Tabela 4.9: Resistências médias à compressão e à tração por compressão diametral do concreto-substrato.....	105
Tabela 4.10: Parâmetros de rugosidade dos substratos.....	108
Tabela 4.11: Densidade de massa aparente para resinas geopoliméricas.....	109
Tabela 4.12: Classificação das argamassas quanto à densidade em seu estado endurecido aos 28 dias (NBR 13281, 2005).....	110
Tabela 4.13: Trabalhos relacionados para densidade de massa aparente para materiais geopoliméricos.....	110
Tabela 4.14: Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade das resinas geopoliméricas.....	111
Tabela 4.15: Classificação das argamassas quanto ao coeficiente de capilaridade (NBR 13281, 2005).....	111
Tabela 4.16: Absorção de água por imersão e porosidade aparente das resinas geopoliméricas.....	112
Tabela 4.17: Resistências médias à compressão axial das resinas geopoliméricas.....	115
Tabela 4.18: Resistências médias à tração por compressão diametral das resinas geopoliméricas.....	116
Tabela 4.19: Módulo de elasticidade longitudinal, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson das resinas geopoliméricas, aos 28 dias.....	117

Tabela 4.20: Resistências média à tração por flexão e à compressão aos 28 dias das resinas geopoliméricas.....	120
Tabela 4.21: Tensão de cisalhamento e módulo de cisalhamento das resinas geopoliméricas e da resina epóxi comercial aos 28 dias.....	124
Tabela 4.22: Valores médios para a resistência ao cisalhamento e o deslocamento máximo na interface substrato e as resinas.....	127
Tabela 4.23: Valores médios para a resistência ao cisalhamento e o deslocamento máximo na interface substrato, resina e chapa de aço.....	128
Tabela 4.24: Valores médios para a resistência à tração na interface substrato/resina e o coeficiente de aderência.....	131
Tabela 4.25: Valores médios para a resistência à tração nas interfaces substrato/resina inclinadas a 30° e 45°.....	133
Tabela 4.26: Valores médios para resistência ao cisalhamento, coeficientes de coesão e atrito na interface inclinada dos corpos-de-prova prismáticos colados com resinas.....	136
Tabela 4.27: Valores médios para resistência ao cisalhamento, coeficientes de coesão e atrito na interface inclinada dos corpos-de-prova prismáticos com chapas de aço colados com resinas.....	136
Tabela 4.28: Valores médios da resistência ao cisalhamento normalizada na interface substrato-resina e substrato-resina-aço dos corpos-de-prova prismáticos.....	138
Tabela 4.29: Valores médios para a resistência à tração na flexão dos substratos sem reparo e reparados com resinas.....	143
Tabela 4.30: Conformação superficial para as resinas geopoliméricas e para a argamassa geopolimérica e concreto convencional segundo França (2017).....	145
Tabela 4.31: Valores médios e normalizados das tensões de aderência para barras lisas CA-25 $\phi$ 6,3 mm.....	146
Tabela 4.32: Valores médios e normalizados das tensões de aderência para barras nervuradas CA-60 $\phi$ 4,2 mm.....	147
Tabela 4.33: Perda de massa em função da temperatura (TG).....	153
Tabela A1: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de densidade aparente no estado fresco; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ )...	187

Tabela A2: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de retenção de água; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	187
Tabela A3: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de índice de consistência <i>flow-table</i> ; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	188
Tabela A4: Tabela A4: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de consistência <i>squeeze-flow</i> (lento); (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	188
Tabela A5: Tabela A5: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de consistência <i>squeeze-flow</i> (rápido); (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	189
Tabela A6: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de densidade aparente no estado endurecido; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	189
Tabela A7: Tabela A7: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de coeficiente de capilaridade; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	190
Tabela A8: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de absorção por imersão; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	190
Tabela A9: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de porosidade aparente; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	191
Tabela A10: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão após 1 dia; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ )....	191
Tabela A11: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 3 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ )....	192
Tabela A12: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 14 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ )..	192
Tabela A13: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ )..	193
Tabela A14: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 90 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ )..	193
Tabela A15: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	194

Tabela A16: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	195
Tabela A17: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados do coeficiente de Poisson aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	195
Tabela A18: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados da resistência à tração na flexão a 3 pontos aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	196
Tabela A19: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento pelo método losipescu; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	196
Tabela A20: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados do módulo de cisalhamento pelo método losipescu; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	197
Tabela A21: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência por cisalhamento duplo substrato-resina; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	197
Tabela A22: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência por cisalhamento duplo substrato-resina-chapa de aço; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	198
Tabela A23: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados do coeficiente de aderência substrato-resina; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	198
Tabela A24: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina inclinada a 30° por <i>splitting test</i> ; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	199
Tabela A25: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina inclinada a 45° por <i>splitting test</i> ; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	199
Tabela A26: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina por <i>slant shear test</i> ; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	200

Tabela A27: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência de aderência à tração na flexão dos substratos colados com resina; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	201
Tabela A28: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de conformação superficial de barras lisas tipo CA-25 $\phi$ 6,3mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	201
Tabela A29: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de conformação superficial de barras nervuradas tipo CA-60 $\phi$ 4,2mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	202
Tabela A30: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Castro (2000), entre as resinas geopoliméricas e barras lisas tipo CA-25 $\phi$ 6,3 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	202
Tabela A31: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Castro (2000), entre as resinas geopoliméricas e barras nervuradas tipo CA-60 $\phi$ 4,2 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	203
Tabela A32: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações da NBR 6118 (ABNT, 2014), entre as resinas geopoliméricas e barras lisas tipo CA-25 $\phi$ 6,3 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	203
Tabela A33: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações da NBR 6118 (ABNT, 2014), entre as resinas geopoliméricas e barras nervuradas tipo CA-60 $\phi$ 4,2 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	204
Tabela A34: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Silva (2015), entre as resinas geopoliméricas e barras lisas tipo CA-25 $\phi$ 6,3 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	204
Tabela A35: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Silva (2015), entre as resinas geopoliméricas e barras nervuradas tipo CA-60 $\phi$ 4,2 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).....	205



Tabela B1: Valores de $c$ e $\mu$ de acordo com o Eurocode 2 (2004).....	207
Tabela B2: Valores de $c$ e $\mu$ , segundo a CAN/CSA A23.3-04 (2004).....	208
Tabela B3: Valores de $\tau_{cd}$ e $\mu$ de acordo com a NS 3473-04 (2004).....	209
Tabela B.4: Valores médios experimentais e das prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resina).....	210
Tabela B.5: Valores médios experimentais e das prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resina-aço).....	211

## LISTA DE ABREVIATURA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American society for Testing and Materials</i>
ATD	Análise térmica diferencial
BET	Superfície específica B.E.T. (Brunauer, Emmet e Teller)
BS	<i>British Standard</i>
CEB	<i>Comité Euro-Internationale du Béton</i>
CP	Corpo-de-prova
CPII-F	Cimento Portland Composto com Filler
CPII-Z	Cimento Portland Composto com Pozolana
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CV	Coefficiente de variação
DRX	Difratometria de raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
EDX	Espectrometria de fluorescência de raios X
EN	<i>European Norm</i>
EVA	Etil vinil acetato
FIP	<i>Fédération Internationale de la Précontrainte</i>
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos
GPa	Giga Pascal
H <sub>2</sub> O	Fórmula química da água
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KOH	Hidróxido de potássio
K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	Silicato de potássio
kN	Quilo Newton
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados da UENF
LCA	Laboratório de Ciências Ambientais
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil da UENF

LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Mega Pascal
N	Newton
NaOH	Hidróxido de sódio
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	Silicato de sódio alcalino
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NP	Norma Portuguesa
NS	<i>Norwegian Standards</i>
PVA	Acetato de Polivinila
PUC	Pontifícia Universidade Católica
RILEM	<i>Reunion Internationale des Laboratoires D'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions</i>
S	Desvio padrão
SST	<i>Slant Shear Test</i>
TGA	Análise Termogravimétrica
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas minúsculas

$a$	Coeficiente de adesão
$c$	Coeficiente de coesão
$c^{IF}$	Coeficiente de aderência
$d$	Densidade de massa da argamassa no estado fresco
$e_i$	Distância entre as fissuras no tirante
$f_{bd}$	Resistência de aderência de cálculo da armadura
$f_c$	Resistência à compressão do concreto
$f_{cd}$	Resistência de cálculo à compressão do concreto
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto
$f_{cm}$	Resistência média à compressão do concreto
$f_{ct}$	Resistência à tração direta do concreto
$f_{ctd}$	Resistência de cálculo à tração do concreto

$f_{ctk,inf}$	Resistência característica à tração inferior do concreto
$f_{ctm}$	Resistência média à tração direta do concreto
$f_{ctm,sp}$	Resistência à tração indireta do concreto
$f_{tim}$	Resistência à tração na interface
$f_y$	Resistência ao escoamento do aço
$h$	Altura do corpo-de-prova ou da viga
$l$	Comprimento do tirante
$m_0$	Massa inicial
$m$	Massa dos corpos-de-prova
$m_c$	Massa do recipiente com argamassa
$m_i$	Massa da amostra saturada imersa
$m_s$	Massa seca
$m_{sat}$	Massa da amostra saturada em água
$m_t$	Massa do corpo-de-prova em cada tempo
$m_v$	Massa do recipiente vazio
$m_w$	Massa de água
$V_r$	Volume do recipiente

### **Letras romanas maiúsculas**

$A$	Absorção
$A_b$	Área da interface colada com a resina
$A_c$	Área da seção transversal do concreto
$AF$	Relação água resina fresca
$Al$	Alumina
$A_t$	Absorção da água por capilaridade
$C$	Coefficiente de capilaridade
$E_c$	Módulo de elasticidade de concreto
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$G$	Módulo de cisalhamento
$I_c$	Momento de inércia da seção de concreto
$L$	Comprimento da barra do tirante
$N_y$	Força normal
$P$	Porosidade

$R_a$	Retenção de água
$R_c$	Resistência à compressão
$R_f$	Resistência à tração na flexão
$R_m$	Rugosidade media
$R_p$	Altura máxima do pico
$R_{pm}$	Altura media do pico
$R_v$	Profundidade do vale
$R_{vm}$	Profundidade media do vale
Si	Sílica

### Letras gregas

$\alpha$	Inclinação da interface substrato-resina em relação ao plano vertical
$\gamma_c$	Coefficiente de ponderação do concreto
$\gamma_{12}$	Deformação de cisalhamento
$\varepsilon_b$	Deformação específica média dos corpos de prova sob tensão maior
$\varepsilon_x$	Deformação transversal
$\varepsilon_y$	Deformação longitudinal
$\lambda$	Fator que considera a massa específica do concreto
$\eta$	Coefficiente de conformação superficial das barras
$\theta$	Diâmetro nominal da barra ou do fio
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\mu m$	Micrômetro
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Taxa de armadura
$\rho_w$	Taxa geométrica de armadura perpendicular à interface $\geq 0,001$
$\rho_{ap}$	Densidade de massa aparente no estado endurecido
$\sigma$	Desvio-padrão
$\sigma_a$	Tensão básica correspondente a deformação específica de $50 \times 10^{-6}$ expressa em MPa
$\sigma_b$	Tensão maior, em MPa, $\sigma_b = 0,3 \times f_c$ ou outra tensão especificada
$\sigma_n^f$	Tensão normal atuante na interface
$\tau$	Resistência ao cisalhamento (losipescu)

$\tau_0$	Tensão de cisalhamento puro
$\tau_b$	Tensão de cisalhamento na interface inclinada
$\tau^f$	Tensão de aderência na interface
$\tau_{cd}$	Resistência ao cisalhamento do concreto na interface
$\tau_m$	Tensão média de aderência
$\phi$	Diâmetro das barras da armadura
$\phi_c$	Coefficiente de minoração do concreto
$\phi^{IF}$	Ângulo de atrito aparente

## RESUMO

Em diversos estudos na Engenharia Civil, o reparo de estruturas de concreto é executado com materiais colados com adesivos à base de resina epóxi. O geopolímero, um polímero produzido com pozolanas naturais ou artificiais, possui algumas aplicações já estudadas nesta área. Este material apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas que mostram indícios para sua utilização como adesivo. Assim sendo, este estudo analisa as propriedades mecânicas de resinas geopoliméricas à base de metacaulim para recuperação estrutural. As resinas geopoliméricas foram confeccionadas com ativadores alcalinos compostos de silicatos e hidróxidos combinados e, em seguida, foram avaliadas a resistência ao cisalhamento e de aderência. Os resultados indicaram que todas as resinas geopoliméricas alcançaram elevada resistência mecânica nas primeiras idades, propriedade fundamental para um material ser usado na recuperação estrutural. O ganho de resistência mecânica variou de 60% no primeiro dia e de 85 a 93% aos 3 dias em comparação com os resultados obtidos aos 28 dias. Todas as resinas geopoliméricas atingiram valores de resistência à compressão superiores a 80 MPa e de resistência à tração por compressão diametral entre 5 e 6 MPa, aos 28 dias. Quanto à resistência ao cisalhamento, as resinas geopoliméricas alcançaram valores entre 92 e 125% superiores à resina epóxi comercial nos ensaios de cisalhamento por compressão (*slant shear test*). Valores similares no ensaio de cisalhamento duplo e tração indireta (*splitting test*) foram encontrados para todas as resinas. Já nos ensaios de aderência, a conformação superficial de tirantes com barras lisas e resinas geopoliméricas chegaram a alcançar valores 70% superiores aos tirantes de concreto convencional e de 5 a 45% maiores em tirantes com barras nervuradas. As diferentes propriedades avaliadas revelam a importância de se compreender o comportamento de novos materiais. Os resultados obtidos no programa experimental indicam a viabilidade e o enorme potencial para uso das resinas geopoliméricas à base de metacaulim na recuperação de estruturas de concreto armado.

**Palavras-chave:** aderência, recuperação estrutural; resina geopolimérica; resistência ao cisalhamento.

## ABSTRACT

In several studies in Civil Engineering, repairing concrete structures carried out with materials bonded with adhesives-based epoxy resin. Geopolymer, a polymer produced with natural or artificial pozzolans, has some applications already studied in this area. This material has physical, chemical and mechanical properties that demonstrate its use as an adhesive. So, this study presents the mechanical properties of metakaolin-based geopolymeric resin for structural recovery. The geopolymeric resins were made with alkaline activators composed by combined silicates and hydroxides, and the shear strength and adherence were evaluated. The results indicated that all geopolymeric resins achieved high mechanical strength in the early ages, fundamental property for a material to be used in structural recovery. The gain in the mechanical strength ranged from 60% on the first day and from 85 to 93% after 3 days compared to the results obtained at 28 days of age. All geopolymeric resins reached compressive strength values greater than 80 MPa and tensile strength between 5 and 6 MPa, at 28 days. When tested for shear strength, geopolymeric resins reached values between 92 and 125% higher than commercial epoxy resin, in slant shear tests. Similar values in double shear test and splitting test were found for all resins. However, in the adherence tests, smooth steel bars and geopolymeric resins reached values 70% higher than conventional concrete and 5 to 45% higher in tie rods with ribbed bars. The different properties studied revealed the importance of understanding the behavior of new materials. Thus, the results obtained in the experimental program indicate the viability and the enormous potential for the use of metakaolin-based geopolymeric resins in repair of reinforced concrete structures.

**Keywords:** adherence; structural repair; geopolymeric resin; shear strength.



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações iniciais

Desde os primórdios das civilizações até os dias atuais as edificações sofrem com problemas patológicos. Com isso, surge a necessidade de reabilitá-las, visto o alto custo envolvido no projeto destas construções para simplesmente inutilizá-las ou destruí-las. Também deve ser considerado que muitas destas construções podem apresentar grande valor histórico, artístico e cultural, o que inviabiliza suas demolições.

O envelhecimento natural da estrutura, a falta de manutenção, os erros de dosagem e emprego dos materiais, os erros na concepção do projeto, a má qualidade da mão de obra e, principalmente, a mudança do uso estão entre as possíveis causas de deterioração das estruturas.

De um modo geral, a reabilitação estrutural é um conjunto de processos sistêmicos de correção localizada dos problemas patológicos, com aplicação de materiais adequados. Quando estes têm a finalidade de aumentar a capacidade portante de uma estrutura são chamados de reforços, caso apenas reconstitua são chamados de reparos.

Para o caso de reparos/reforços de vigas de concreto armado, diversas soluções convencionais que apresentam resultados confiáveis podem ser utilizadas, entre as quais é possível citar: adição de um novo concreto ou argamassa de elevado desempenho com novas barras de aço longitudinal na face tracionada da viga, adição de barras de aço transversais nas faces laterais, colagem de chapas de aço na superfície da viga, com ou sem a utilização de parafusos ou rebites (chumbadores), entre outras soluções que podem utilizar técnicas combinadas.

Como as vigas estão submetidas concomitantemente aos esforços de flexão e cortante, existem várias pesquisas sobre reforços para a atuação combinada destes dois tipos de esforços (CÁNOVAS, 1985; CAMPAGNOLO *et al.*, 1994, AYKAC *et al.*, 2013; DEGHEHARD *et al.*, 2016). No entanto, Menon (2008) afirma que a importância do reforço ao cortante é que este pode ser considerado mais crítico do que o reforço à flexão, uma vez que os colapsos por esforço cortante ocorrem abruptamente e são mais catastróficos comparados com os colapsos por

flexão, os quais são geralmente mais progressivos e proporcionam amplo período de tempo para se reforçar a estrutura antes da ruptura.

Em diversos estudos na Engenharia Civil o reforço estrutural em vigas é executado com materiais colados com adesivos à base de resina epóxi. Os adesivos epóxi comerciais usados na Construção Civil para promover a adesão entre materiais em reforços estruturais são muito sensíveis a variações de temperatura. Gamage *et al.* (2011) apresentaram resultados que mostram que a temperatura das resinas epóxi não devem exceder a 70°C a fim de manter a integridade entre o concreto e o material de reforço. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de adesivos com propriedades, de um modo geral, mais estáveis quando submetidos a elevadas temperaturas.

O geopolímero, um polímero produzido com pozolanas naturais ou artificiais, possui algumas aplicações já estudadas nesta área. Pesquisas recentes indicam cada vez mais interesse na utilização dos materiais geopoliméricos na Construção Civil, devido ao seu grande potencial para substituir o cimento Portland em concretos, argamassas e grautes e, até mesmo, na produção de resinas capazes de serem utilizadas como adesivos em reforços de estruturas (POUHET e CYR, 2016; YUAN *et al.*, 2016a; Zhang *et al.*, 2018).

Devido a sua estrutura inorgânica, os geopolímeros são intrinsecamente estáveis quando submetidos a altas temperaturas (HOSAN *et al.*, 2016; ROCHA, 2017; AZEVEDO, 2019) e podem ser potencialmente aplicáveis como material de isolamento à prova de fogo e também usados em estruturas que podem vir a sofrer com incêndios (KONG e SANJAYAN, 2010).

O material adesivo para ser considerado adequado para uso em um reforço deve apresentar módulo de rigidez suficiente, boa trabalhabilidade, baixa retração durante o processo de cura e excelentes propriedades adesivas com o concreto (substrato) e o aço, sendo este último primordial para o bom funcionamento do reforço, pois proporciona a transferência de esforços entre os elementos (concreto-resina-aço).

Apesar de existir um número expressivo de pesquisas referentes aos geopolímeros, sempre há espaço para estudar suas propriedades, potencialidades, características e, conseqüentemente, propor novos usos. Assim sendo, este trabalho visa contribuir para o conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e

características microestruturais de resinas geopoliméricas quando aplicadas como adesivo em recuperação estrutural.

## **1.2. Justificativas**

Os excelentes resultados divulgados na literatura, até o momento, com relação à fabricação dos materiais geopoliméricos (ativação alcalina de pozolanas naturais e artificiais) são motivos para prosseguir com os estudos sobre o assunto no Brasil. Os geopolímeros demonstram propriedades físicas, químicas e mecânicas que revelam grande potencial de utilização como adesivo. De acordo com o *Geopolymer Institute* (2014), o aumento das pesquisas sobre geopolímeros só ganhou força, no mundo, a partir de 2004.

É fácil observar a necessidade de mais estudos que contribuam para a utilização no país de materiais álcali-ativados que sejam inovadores e alternativos, tendo por base as matérias-primas disponíveis. No âmbito científico, a ativação alcalina de materiais alternativos, visando à transformação dos mesmos em um aglomerante para o uso na Construção Civil em substituição ao cimento Portland ou até outros materiais como as resinas epóxi, é uma nova área de pesquisa.

O desenvolvimento de uma tecnologia de produção nacional para aplicação de materiais alternativos álcali-ativados como adesivo para recuperação de estruturas de concreto armado convencional pode ser uma opção interessante para atender as demandas do mercado interno, em especial no que se refere a matérias-primas e produtos utilizados na Construção Civil. Logo, a necessidade de estudos do comportamento desse material de reparo é essencial para que sua futura aplicação e comercialização seja conhecida e confiável.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Geral**

O objetivo geral deste estudo foi a avaliação do desempenho de quatro resinas geopoliméricas utilizadas como adesivo em elementos de concreto armado.

### **1.3.2. Específicos**

A fim de alcançar o objetivo geral, fez-se necessário:

- desenvolver e fabricar diferentes resinas geopoliméricas mediante combinações de silicatos e hidróxidos de sódio e de potássio, a partir do estudo de dosagem experimental;
- caracterizar física e mecanicamente as resinas geopoliméricas nos estados fresco e endurecido, visando determinar as particularidades em função dos diferentes ativadores alcalinos;
- avaliar o desempenho das resinas geopoliméricas quanto à resistência ao cisalhamento e aderência entre as interfaces resina-concreto de substrato e resina-aço;
- comparar as resinas geopoliméricas produzidas com uma resina epóxi comercial.

### **1.4. Organização da tese**

Os capítulos desta tese foram organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: realiza a introdução ao tema, destacando sua relevância e apresenta os objetivos geral e específicos desta pesquisa;
- Capítulo 2: consiste na revisão bibliográfica que aborda conceitos e trabalhos relacionados à resistência ao cisalhamento e a potencial utilização dos geopolímeros como material alternativo;
- Capítulo 3: apresenta o desenvolvimento do programa experimental, informando sobre os materiais utilizados e a metodologia para execução dos ensaios de caracterização física e mecânica das resinas geopoliméricas;
- Capítulo 4: apresenta a discussão dos resultados obtidos nos ensaios descritos no programa experimental;
- Capítulo 5: traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Considerações iniciais**

O avanço da tecnologia demanda cada vez mais, de forma expressiva, a utilização de materiais com propriedades ímpares, além do desempenho quando utilizados combinados com outros materiais (metais, cerâmicos ou polímeros). A diversidade e versatilidade dos materiais atualmente disponíveis para o uso em engenharia é muito grande, existindo materiais qualificados para várias aplicações específicas. Entretanto, sempre há espaço para o desenvolvimento de novas pesquisas nesta área.

Um grande desenvolvimento tecnológico na área de novos materiais tem sido observado nos últimos anos. Como consequência desse desenvolvimento, grandes valores são investidos anualmente em pesquisas, que visam fornecer soluções tecnológicas para que haja a utilização racional dos recursos naturais. Os polímeros, as cerâmicas avançadas e os compósitos são as áreas que apresentam as maiores inovações.

Um exemplo desses materiais são os geopolímeros, sendo neste capítulo evidenciadas suas principais propriedades e os materiais essenciais utilizados na sua produção. Em seguida, são mostradas suas propriedades físicas e seu comportamento mecânico. Por fim, são apresentados trabalhos científicos que abordam sua aplicação como material de reparo na Construção Civil.

### **2.2. Geopolímeros**

O conceito de geopolímeros foi inicialmente introduzido por Joseph Davidovits em 1978. Este polímero inorgânico composto por silicato de alumínio tridimensional era preparado principalmente a partir de resíduos industriais (DAVIDOVITS, 1988).

Os geopolímeros são compostos de unidades de silicato e de aluminato tetraédricas ligadas entre si, alternadamente, formando uma estrutura tridimensional covalente, balanceada por cátions alcalinos. As matérias-primas incluem duas partes: sólidos de aluminossilicato reativos, como cinzas volantes e argilas calcinadas, e uma solução ativadora alcalina, geralmente uma solução de hidróxido de metal alcalino ou silicatos. Os geopolímeros são também conhecidos por

polissialatos (grande cadeia molecular constituída de silício, oxigênio e alumínio). Sialato é uma abreviação para sílico-óxido-aluminato (DAVIDOVITS, 1991).

Os polissialatos são formados por cadeias de tetraedros  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  ligados alternadamente compartilhando todos os oxigênios. Os íons positivos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) devem estar presentes nas cavidades da estrutura para balancear a carga negativa do  $\text{Al}^{3+}$  em número de coordenação IV (DAVIDOVITS, 1994). De acordo com a razão Si/Al, diferentes arranjos podem ser formados e para isso é necessário que cada um dos átomos de Al seja ligado por oxigênios a quatro átomos de Si. Com isso, o valor entre Si/Al é sempre maior ou igual a 1. Os polissialatos podem ser distinguidos em: PS - Poli(sialato), PSS - Poli(sialato-siloxo) e PSDS - Poli(sialato-disiloxo) (KOMNITSAS *et al.*, 2007).

A estrutura dos polissialatos resulta da reação chamada geossíntese, usada na produção de rocha artificial à temperatura abaixo de  $100^\circ\text{C}$ , com o objetivo de obter características naturais como dureza, durabilidade e estabilidade térmica (SILVA, 2000).

O mecanismo de reação de síntese envolvido é chamado de geopolimerização e, de acordo com Van Jaarsveld *et al.* (1997), para o processo ocorrer é necessário que haja um meio fortemente alcalino. Baseada na cinética de álcali-ativação de escórias de alto forno desenvolvida por Glukhosky, Duxson *et al.* (2007a) propuseram um modelo para a reação dividido em seis etapas: dissolução, equilíbrio, formação de gel, reorganização e polimerização/endurecimento (Figura 2.1).

Apesar do esquema linear, as etapas ocorrem concomitantemente. Na etapa de dissolução, a alta concentração de  $\text{OH}^-$  é responsável pela quebra das ligações Si-O-Si, Si-O-Al e Al-O-Al da fonte de aluminossilicatos. Dessa forma, os principais parâmetros que influenciam nesta etapa são: o cátion a ser utilizado na solução ativadora alcalina; o tempo para a dissolução; o tipo e o grau de reatividade da fonte de aluminossilicatos, sendo este último muito importante para definir a parcela que irá ou não reagir no processo (DUXSON *et al.*, 2007a; LONGHI, 2015). Uma vez em solução, uma mistura de diferentes espécies (monômeros, dímeros, trímeros e assim por diante) de silicatos, aluminatos e aluminossilicatos é formada.

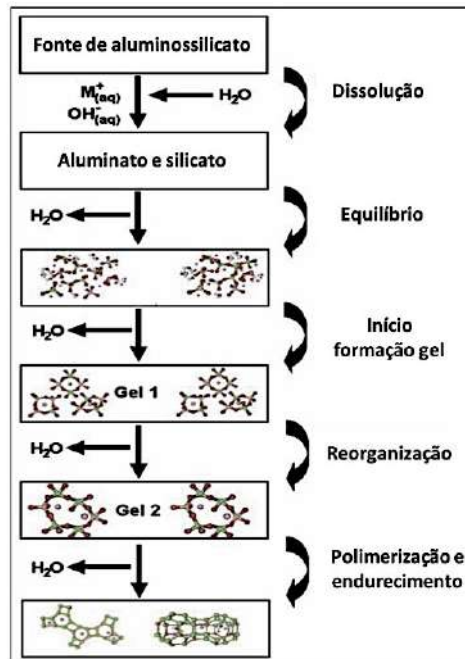


Figura 2.1: Modelo conceitual de formação do geopolímero (adaptado de Duxson *et al.*, 2007a).

Na etapa de equilíbrio, o meio se torna rapidamente supersaturado conduzindo à formação do chamado gel 1, com a condensação dos oligômeros. Esse gel é rico em alumínio devido à maior concentração do mesmo na solução inicial e também à maior fragilidade das ligações Al-O na fonte de aluminossilicatos.

A água utilizada durante a dissolução é liberada durante a formação do gel. A água possui a função de promover a reação e se encontra dentro dos poros do gel. Apesar da pequena ocorrência de radicais  $\text{OH}^-$ , provenientes da água presente na estrutura do geopolímero, a água não faz integralmente parte da sua estrutura (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009).

Na etapa de reorganização, o sistema continua a se rearranjar e reorganizar, aumentando a conectividade do gel. A fase gel 2 então é formada pela quebra de mais ligações Si-O da fonte de aluminossilicatos, aumentando a concentração de Si na solução e na fase gel, o que resulta na formação de uma rede tridimensional de aluminossilicatos.

A etapa final, chamada de polimerização e endurecimento, determina a característica da microestrutura e a distribuição dos poros do geopolímero endurecido, que são parâmetros essenciais para as propriedades físicas e mecânicas de qualquer aglomerante (DUXSON *et al.*, 2007a; DE WEERDT, 2011;).

Os geopolímeros encontram ampla gama de aplicações no campo de transportes, reparos de emergência, metalurgia, revestimentos, materiais de

membrana e encapsulamento de resíduos nucleares. Isso porque possuem várias características importantes, como: elevada resistência mecânica, à corrosão, ao ataque de ácidos, a altas temperaturas *etc.* (ZHANG *et al.*, 2004).

O cimento geopolimérico consiste em um sistema ligante que endurece a temperatura ambiente, assim como o cimento Portland comum, sendo resultado da ativação de uma matéria-prima (precursor) silicosa ou silicoaluminosa por uma solução altamente alcalina. Aplicações relacionadas aos produtos de cimento geopolimérico devem ocorrer dentro das mesmas regras de uso habitualmente utilizadas para argamassas e concreto à base de cimento Portland. Estas aplicações são mais relevantes em situações em que o ganho de resistência mecânica nas primeiras idades seja necessário, como, por exemplo, serviços de reparo e/ou reforço de estruturas, elementos pré-fabricados, serviços de pavimentação, dentre outros.

O destaque para o uso dos geopolímeros em larga escala é proveniente da empresa australiana Zeobond, que é uma das pioneiras na comercialização do produto. Fundada pelo pesquisador J. van Deventer, ela contribui efetivamente em pesquisas na área. Entre outras empresas pelo mundo, tem-se a canadense Polyrap, que produz produtos para reparos estruturais e a britânica URETEK que produz uma série de produtos pré-fabricados, reparos em estruturas e melhoramento de solos com injeção de geopolímeros expansivos. No Brasil destacam-se as empresas Geopolitec e Wincret, ambas atuantes no ramo de pré-moldados de concreto geopolimérico.

Khun Ma *et al.* (2018) elaboraram um estudo sobre a tendência das pesquisas realizadas com geopolímeros ao longo dos anos, conforme mostrado na Figura 2.2. Aparentemente, o levantamento realizado sobre os estudos feitos sobre concreto geopolimérico antes de 2001 é consideravelmente limitado. O número de estudos aumentou drasticamente a partir do ano de 2016, indicando a atenção dada pelos estudiosos em todo o mundo, neste campo em particular. Apesar de vastos e substanciais estudos serem realizados nesse sentido e o grande potencial deste material, o concreto geopolimérico ainda não obteve aceitação internacional como material de construção, sendo as causas resumidas a seguir:

- o custo de produção do concreto geopolimérico precisa ser razoavelmente competitivo;



- são necessários dados mais detalhados e confiáveis sobre a praticidade do uso do concreto geopolimérico como elementos estruturais;
- o estabelecimento de parâmetros de projetos para os elementos de concreto geopolimérico.

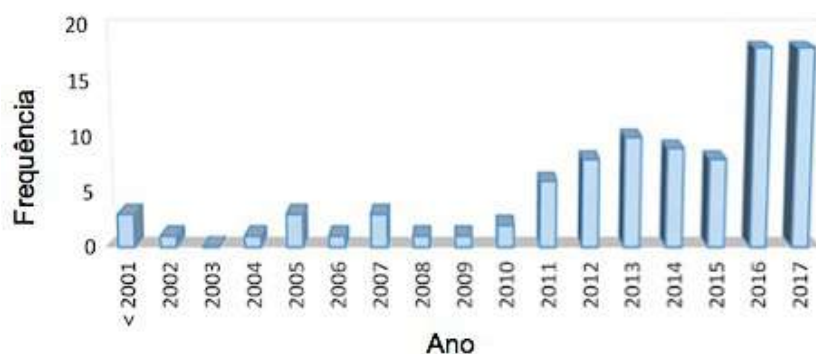


Figura 2.2: Tendência das pesquisas sobre concreto geopolimérico (adaptado de Khun Ma *et al.*, 2018).

Os geopolímeros apresentam várias opções e aplicações que não foram integralmente estudadas e, conseqüentemente, ainda não comercializadas. Porém, diante dos estudos já realizados, pode-se afirmar que o material geopolimérico é versátil e possui enorme potencial para atuar em diversas aplicações.

### 2.2.1. Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas para a fabricação dos geopolímeros são basicamente materiais amorfos ricos em sílica e alumina em presença de um ativador alcalino. A fonte de aluminossilicato deve apresentar quantidade considerável de material amorfo, bem como dimensão granulométrica adequada. O ativador alcalino deve apresentar pH elevado o suficiente para promover a dissolução da parcela amorfa do precursor sólido (LONGHI, 2015).

#### 2.2.1.1 Precursores

Os precursores mais utilizados são argilas calcinadas (metacaulim), cinzas da queima do carvão mineral e escórias de alto-forno. Porém, existem parâmetros que precisam ser analisados na escolha da matéria-prima para a produção dos geopolímeros que são considerados essenciais para o processo de polimerização,

entre eles: teor de sílica reativa (amorfa) e distribuição do tamanho das partículas (FERNANDEZ-JIMENEZ *et al.*, 2004).

Um grande número de pesquisadores utiliza argilas calcinadas como precursor na produção de geopolímeros, sendo o metacaulim a mais comum dentre elas (VAN JAARSVELD *et al.*, 2002; DUXSON *et al.*, 2007a; CHENG *et al.*, 2012; OZER *et al.*, 2015; PARK *et al.*, 2018).

O metacaulim é um material pozolânico de estrutura desordenada (amorfa) obtido por processo de moagem e ativação térmica do caulim, entre temperaturas de 600 e 850°C. Este material é composto basicamente por silicato de alumínio hidratado  $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ , que perde os íons de hidroxila de sua estrutura cristalina com a calcinação, transformando-se em metacaulim ( $Al_2Si_2O_7$ ), composto constituído essencialmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina e com elevada finura (CUNHA *et al.*, 2010).

Os geopolímeros produzidos com metacaulim apresentam características melhores do que com outros precursores, embora exijam maior demanda de água, resultando em vários problemas reológicos. Enquanto isso, os geopolímeros à base de cinza volante apresentam maior durabilidade, e os geopolímeros à base de escória de alto-forno, por outro lado, possuem maior resistência inicial e maior resistência a ácidos (DUXSON *et al.*, 2007a).

#### 2.2.1.2 Ativadores alcalinos

Para promover as ligações geopoliméricas são utilizados ativadores alcalinos, sendo os mais comuns: hidróxido de sódio (NaOH) ou de potássio (KOH); carbonato de sódio; silicato de sódio alcalino ( $nSiO_2 \cdot Na_2O$ ) ou de potássio ( $nSiO_2 \cdot K_2O$ ); e, sobretudo, misturas destes compostos (PINTO, 2004). Normalmente, é possível obter uma solução ativadora com a mistura entre silicatos alcalinos (líquido ou sólido dissolvido em água) e hidróxidos alcalinos (sólido com dissolução em água) (CRIADO *et al.*, 2005; PACHECO-TORGAL, 2011). O silicato da solução vem a ser uma fonte adicional de  $SiO_2$  ao sistema, enquanto que o hidróxido garante elevada alcalinidade à solução (LIMA *et al.*, 2005).

O hidróxido de sódio é menos expansivo. No entanto, sua solubilidade é mais sensível à temperatura, podendo levar à precipitação de NaOH quando utilizado em baixas temperaturas. Além disso, o NaOH é mais viscoso do que o KOH. Essa

característica torna o processo de preparo do geopolímero um pouco mais trabalhoso e pode afetar as propriedades reológicas do geopolímero em seu estado fresco, tornando-o menos trabalhável. Os silicatos alcalinos mais utilizados são produzidos pela mistura e reação de  $\text{Na}_2\text{O}$  ou  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Si}_2\text{O}$  e água. Assim como nos hidróxidos alcalinos, o silicato de sódio alcalino é mais viscoso do que o silicato de potássio (PACHECO-TORGAL, 2014).

Apesar de não estar totalmente esclarecido o papel específico de cada componente presente na solução ativadora, Pinto (2004) atribui aos hidróxidos de sódio e potássio a função de dissolver as matérias-primas, enquanto os silicatos o papel de ligante. Em geral, os hidróxidos e silicatos alcalinos devem apresentar valores de pH superiores a 13 para ativar os aluminossilicatos na síntese dos geopolímeros (KHALE e CHAUDHARY, 2007).

Na ativação dos aluminossilicatos, como a metacaulinita, a natureza da solução ativadora exerce papel fundamental na determinação do desempenho mecânico. Sua escolha depende principalmente da reatividade e do custo dos materiais empregados (SOMNA *et al.*, 2011).

### **2.2.2. Trabalhabilidade**

Neville (1997) estabelece que a trabalhabilidade seja a propriedade de um material recém misturado (pasta, argamassa ou concreto) que determina a facilidade com que pode ser misturado, moldado, consolidado e acabado. Essa mesma propriedade pode ser atribuída aos geopolímeros.

Estudos realizados por Torgal (2007) revelaram a baixa trabalhabilidade apresentada pelos geopolímeros, atribuída à sua alta viscosidade. Esse comportamento não foi superado nem mesmo quando um superplastificante foi utilizado nas misturas estudadas. Porém, com a utilização do aditivo, aumentou o empacotamento dos grãos e diminuiu a porosidade da microestrutura, aumentando a resistência mecânica do produto final.

A trabalhabilidade dos geopolímeros é muito dependente das características das matérias-primas, principalmente pela forma das partículas do precursor. O metacaulim, com sua estrutura em forma de placas, promove redução da fluidez, devido à elevada fricção entre as partículas durante a mistura (DUXSON *et al.*, 2007a; HEAH *et al.*, 2008; YASERI *et al.*, 2017).

Estudos com geopolímeros à base de metacaulim constataram que o aumento da relação água/sólidos melhorou a trabalhabilidade. Foi possível observar também que o aumento da relação ativador/precursor, independentemente do tipo de ativador, exerceu influência significativa sobre a trabalhabilidade. Para a mesma relação água/sólidos, composições com maior relação ativador/precursor apresentaram melhor trabalhabilidade (LEONG *et al.*, 2016; RANGEL, 2017; TRINDADE, 2017).

Outra observação importante é que as misturas ativadas por KOH apresentaram trabalhabilidade superior em comparação com as ativadas por NaOH (NEMATOLLAHI e SANJAYAN, 2014).

### **2.2.3. Tempo de pega**

O tempo de pega de materiais cimentícios está relacionado à redução do índice de consistência em relação ao tempo, a partir do momento que os materiais de uma determinada composição entram em contato e são misturados, observando as alterações de um estado fresco para um estado rígido.

Estudos realizados por meio do aparelho de Vicat revelaram que o tempo de pega em materiais geopoliméricos é uma propriedade afetada por muitos parâmetros, entre eles: natureza do material pozolânico, proporção entre matéria-prima e a fonte complementar de álcali, temperatura, composição e concentração da solução ativadora alcalina, quantidade de água na mistura e composição do agregado (TORGAL, 2007; PRYNIA, 2012).

Ensaio de ressonância magnética nuclear (RMN) realizados por Pinto (2004), com o objetivo de identificar como se processa a evolução das alterações estruturais em torno dos átomos de alumínio e de silício na formação de argamassas geopoliméricas, mostraram que as reações de geopolimerização são muito rápidas em termos de definição das ligações químicas presentes. Logo após trinta minutos de mistura, foram registrados padrões bem definidos e poucas alterações em idades mais avançadas. Porém, não foi possível, segundo o autor citado, afirmar quando ou se as reações terminaram, ou afirmar definitivamente se a geopolimerização foi concluída ou não.

#### **2.2.4. Comportamento mecânico**

Duxson *et al.* (2007c) demonstraram que a capacidade resistente e os módulos de elasticidade dos geopolímeros são determinados principalmente pelas suas características microestruturais. A microestrutura dos geopolímeros, por sua vez, é diretamente influenciada pela relação Si/Al (WANG *et al.*, 2005; GARCIA-LODEIRO *et al.* 2015), pela concentração de hidróxido (RAHIM *et al.*, 2015), pela eficiência da geopolimerização (PROVIS, 2005), pelo tipo de cátion utilizado (XU *et al.*, 2001) e pelas condições de cura (VAN JAARSVELD, 2002; SINDHUNATA *et al.*, 2006; YUAN *et al.*, 2016b).

Torgal *et al.* (2007) apontam outros fatores que podem influenciar a resistência mecânica dos geopolímeros, tais como: concentração do ativador alcalino (que está diretamente relacionado com a mineralogia do ligante geopolimérico formado); razão molar  $H_2O/Na_2O$ ; aumento da concentração de NaOH no ativador alcalino, que fornece melhor dissolução de silicatos e aluminatos (levando ainda ao aumento da resistência de união intermolecular); quantidade de água total e porosidade do produto final.

Zhang *et al.* (2017) concluíram que o processo de geopolimerização e o desenvolvimento da resistência à compressão dos geopolímeros são altamente dependentes do cátion alcalino utilizado ( $Na^+$  ou  $K^+$ ). Para a mesma razão Si/Al e concentração de  $M^+$  ( $Na^+$  ou  $K^+$ ), os compostos formados por  $Na^+$  apresentaram maior resistência à compressão em comparação com os produzidos com  $K^+$ . Isto se deve ao fato de que: em primeiro lugar, partículas de metacaulim podem ficar sem reagir devido à baixa tendência de dissolução do precursor ocasionada pelo  $K^+$  e, estas atuam como defeitos estruturais e, por fim, as morfologias contínuas observadas nos compostos  $Na^+$  corresponderam a sistemas mecanicamente mais resistentes.

Wang (2005) estudou geopolímeros fabricados com metacaulim e concluiu que suas propriedades mecânicas são dependentes principalmente da concentração da solução de NaOH. Ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão mostraram que o aumento da concentração de NaOH conduz a um aumento da resistência. Esse fato provavelmente se deve à condensação acelerada do monômero (base de formação dos geopolímeros) na presença de solução com concentração elevada de NaOH, em decorrência da melhor dissolução das

partículas de metacaulim.

Bentur *et al.* (2007) demonstraram que os módulos de elasticidade e o coeficiente de Poisson são dependentes do ativador alcalino, atingindo maiores valores com o uso de sódio. Concretos geopoliméricos são tipicamente caracterizados por baixa resistência à tração e elevada capacidade de deformação quando comparados ao concreto de cimento Portland. Vickers *et al.* (2015) sugere que a realização de reforço por fibras é uma alternativa viável a ser incorporada na matriz para vencer estas vulnerabilidades.

Os geopolímeros são materiais que podem alcançar valores elevados de resistência mecânica nas idades iniciais desde que o processo de geopolimerização seja bem sucedido (PROVIS *et al.*, 2005; SHAO *et al.*, 2015).

Estudos realizados por Silva (2000) mostraram que o cimento geopolimérico atingiu resistência à compressão de 45 MPa (com 4,5h de idade), quando submetido à cura a 65°C durante 4 horas. Entretanto, quando curado em temperatura ambiente (22°C), o mesmo nível de resistência foi alcançado aos 3 dias de idade; e após 28 dias de idade alcançou 60 MPa. Estudos mais recentes mostraram que os cimentos geopoliméricos (pastas, argamassas e concretos) podem chegar a valores da ordem de 60 a 100 MPa de resistência à compressão, aos 28 dias (AMBILY *et al.*, 2013; POUHET e CYR, 2016; ROCHA, 2017; AZEVEDO *et al.*, 2019).

Mehta e Siddique (2017) relataram que os concretos geopoliméricos atingem 92%, aos 3 dias, e 97%, aos 7 dias, da resistência à compressão aos 28 dias. Por essa característica de apresentar elevada resistência inicial, os geopolímeros mostram grande potencial na indústria de pré-moldados (RANJBAR *et al.*, 2016).

### **2.3. Resistência na interface**

Existem vários métodos disponíveis para avaliar o comportamento da interface entre diferentes materiais. Estes métodos podem ser classificados de acordo com a tensão resultante que ocorre na interface: axial, flexão e cisalhamento (Tabela 2.1).

Nos itens a seguir são detalhados os ensaios usados para a avaliação do comportamento da interface substrato-resina e substrato-resina-aço realizados no programa experimental deste estudo, baseados nas tensões de cisalhamento resultantes na interface.

### 2.3.1. Ensaio de cisalhamento losipescu (V-notched)

O ensaio losipescu é um método utilizado para determinar a resistência ao cisalhamento e o módulo de cisalhamento de materiais de engenharia, principalmente compósitos de polímero reforçado por fibras de carbono e vidro. Em 1967, N. losipescu propôs esse método inicialmente para quantificar a resistência ao cisalhamento de concretos. Entretanto, o ensaio não foi usado de maneira significativa até o início da década de 1980. Em um esforço conjunto dos pesquisadores da NASA no Centro de Pesquisas Langely, o ensaio losipescu passou de um protocolo predominantemente relevante em metais para um teste mais direcionado aos compósitos (STOJCEVSKI *et al.*, 2018).

Tabela 2.1: Ensaos disponíveis para avaliar a resistência na interface concreto-concreto (adaptado de Saldanha *et al.*, 2013).

Grupo	Método	Norma	Estudos
Axial	<i>Pull-off test</i>	BS EN 1542	Long e Murray (1984)
		ASTM C1583	-
		BS 1881: Part 207	Dellate <i>et al.</i> (2000)
	Tensão direta	ASTM C1404	Ohama <i>et al.</i> (1986)
		CAN/CSA A23.2-6B	-
	<i>Splitting test</i>	ASTM C496	Tschegg <i>et al.</i> (2000)
NP EN 12390-6		Sustersic e Zajc (1999)	
Flexão	Resistência à flexão	ASTM C78	Kunieda <i>et al.</i> (2000)
		BS EN 12636	Wall <i>et al.</i> (1986)
		NP EN 12390-5	Abu-Tair <i>et al.</i> (1996)
Cisalhamento	Cisalhamento direto	ASTM D5379 ( <i>losipescu test</i> )	Walrath <i>et al.</i> (1983) Stojcevski <i>et al.</i> (2018)
	Cisalhamento duplo	-	Larralde <i>et al.</i> (2001)
	<i>Slant shear</i>	Ver Tabela 2.2	Kriegh (1976) Santos (2009)
	<i>Push-off test</i>	-	Hofbeck <i>et al.</i> (1969) Lin e Chen (1989) Mansur <i>et al.</i> (2008)

Existem vários métodos desenvolvidos para medir as propriedades de cisalhamento dos materiais, tais como: cisalhamento a 45°, flexão a quatro pontos assimétricos (*AFPB*) e cisalhamento de feixe curto (*SBS*) (AKTAS e DENIZ, 2010). Walrath *et al.* (1983) realizaram estudos comparativos entre os métodos existentes a fim de classificar o ensaio de cisalhamento losipescu como um procedimento viável. Então, desde 1993 o ensaio losipescu (*V-notched shear test*) é um dos métodos mais populares e apresenta procedimentos claros e reconhecidos pela *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.

A maioria dos ensaios de cisalhamento apresenta inconsistências nos resultados, pelo fato das seções transversais dos corpos-de-prova não estarem em um estado de tensão de cisalhamento puro ou não serem uniformes. Por isso, o ensaio de cisalhamento losipescu (ASTM D 5379M-98) tem sido bastante utilizado para determinar as propriedades de cisalhamento, principalmente de materiais compósitos (WALRATH, 1983; GONÇALVES *et al.*, 2009; BRU *et al.*, 2017). Ainda assim, trabalhos acadêmicos e aplicações na indústria são limitados e a maioria das pesquisas é voltada para compósitos laminados (STOJCEVSKI *et al.*, 2018).

Para Dias (2004), o conhecimento das propriedades mecânicas, como resistência à flexão e módulo de cisalhamento é fundamental para a utilização correta do geopolímero como material estrutural. Entretanto, o comportamento mecânico desses materiais obtidos em centros de pesquisa permanece como uma atividade em constante desenvolvimento, devido o material não ser governado apenas pela geometria e tipo de carregamento, mas também pelas propriedades mecânicas de seus constituintes. Swanson *et al.* (1985), mediram a resistência ao cisalhamento e a tensão de cisalhamento para materiais e compósitos poliméricos. Neste trabalho o ensaio losipescu mostrou-se ideal.

De acordo com a ASTM D 5379M (1998), o princípio do método losipescu é baseado em um ensaio simples de flexão a quatro pontos em um corpo-de-prova com entalhe em V, que é montado e ensaiado em um dispositivo especialmente projetado. O corpo-de-prova pode ser um material homogêneo, um laminado composto ou um único material embebido em resina. Ao se aplicar uma carga compressiva em uma extremidade do corpo-de-prova, enquanto mantém a outra extremidade estática, uma região de tensão de cisalhamento uniforme é criada através do centro do corpo-de-prova com momento de flexão nulo (Figura 2.3). Esta é uma vantagem primordial do ensaio losipescu, pois fornece uma região



relativamente uniforme de tensão de cisalhamento puro na região central do corpo-de-prova. Isso permite que a resistência e o módulo de cisalhamento sejam calculados. É importante ressaltar que, para avaliar apenas os efeitos de cisalhamento, é ideal que haja um estado de tensão puro.

Os detalhes do corpo-de-prova (dimensões, fôrmas, moldagem e posicionamento do *strain gage*) e do dispositivo para a realização dos ensaios são mostrados no Capítulo 3.

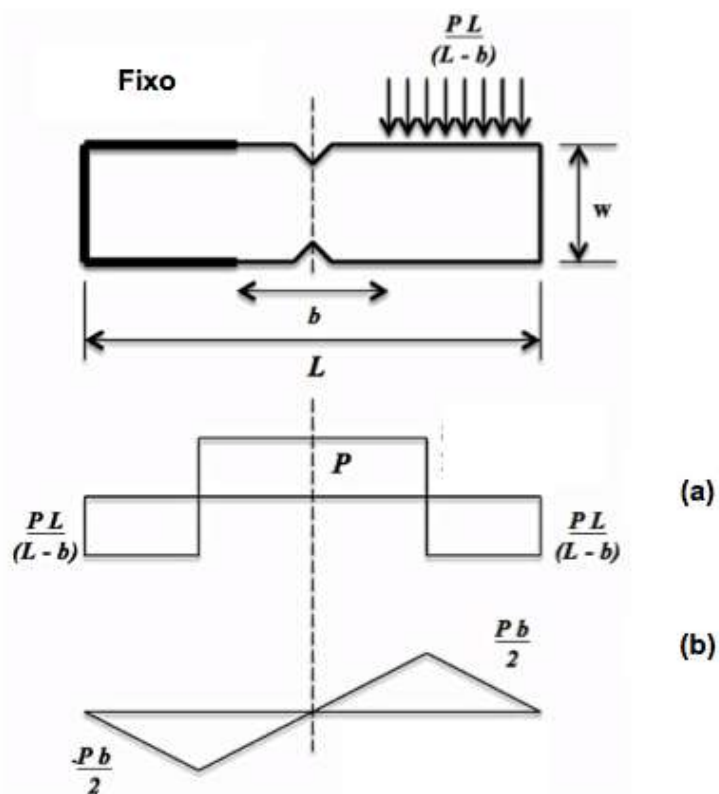


Figura 2.3: Esquema de carregamento em um corpo-de-prova no ensaio losipescu e seus respectivos diagramas de esforços: (a) cortante; (b) momento fletor (adaptado da ASTM D 5379M, 1998).

A resistência média ao cisalhamento na seção entalhada em V do corpo-de-prova é calculada usando a Equação 2.1.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

sendo,

$P$  a carga aplicada;

$A$  a área da seção transversal entre os entalhes.

A deformação de cisalhamento ( $\gamma_{12}$ ) pode ser obtida pela leitura de somente um *strain gage* a  $45^\circ$  e pode ser calculada usando-se a Equação 2.2. Caso a leitura seja feita por dois *strain gages* a  $45^\circ$  e ortogonais entre si, a deformação é calculada pela Equação 2.3.

$$\gamma_{12} = 2|\varepsilon(45^\circ)| \quad (2.2)$$

$$\gamma_{12} = |\varepsilon_{+45^\circ}| + |\varepsilon_{-45^\circ}| \quad (2.3)$$

Já o módulo de cisalhamento ( $G_{12}$ ) é calculado utilizando-se a Equação 2.4.

$$G_{12} = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (2.4)$$

sendo,

$\Delta\tau$  a diferença de tensão de cisalhamento entre dois pontos de deformação;

$\Delta\gamma$  a diferença entre os dois pontos de deformação específicos.

Devido à característica uniforme na distribuição de tensões nos corpos-de-prova no ensaio losipescu, os padrões de ruptura são razoavelmente previsíveis, o que pode ajudar a fornecer informações sobre o desempenho do material. Padrões de ruptura mais comuns são detalhados na Figura 2.4.

O padrão de falha A é comum para materiais isotrópicos ou em compósitos com um bom nível de adesão interfacial. O padrão B é observado em materiais com baixa resistência ao cisalhamento ou em compósitos com interfaces pouco ligadas. Isto sugere falta de adesão na interface fibra-matriz. Ruptura tipo C denota descolamento e craqueamento entre camadas de corpos-de-prova laminados. Para materiais isotrópicos, a fratura é mais comumente observada na raiz do entalhe e se propaga horizontalmente. O padrão de ruptura D representa uma mistura de padrões de fratura criados pela orientação cruzada das fibras, gerando distribuições complexas de tensão biaxial. Padrões de fratura que apresentem as configurações mostradas em E e F devem ser considerados como falha no ensaio e não devem ser levados em consideração. Nestes casos, a falha não ocorre na região onde seriam esperados os mais altos níveis de tensão de cisalhamento. Dessa forma, acredita-se que a ruptura esteja provavelmente associada a defeitos ou a problemas no

carregamento do corpo-de-prova (ASTM D 5379M, 1998; KUMOSA *et al.*, 2002; BRU *et al.*, 2017; STOJCEVSKI *et al.*, 2018).

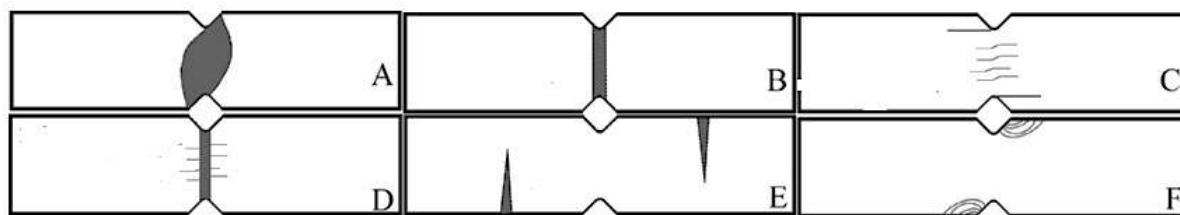


Figura 2.4: Padrões típicos de ruptura de corpos-de-prova no ensaio losipescu. (adaptado de Stojcevski *et al.*, 2018).

### 2.3.2. Ensaio por cisalhamento duplo

Existe no mercado um grande número de adesivos e materiais que podem ser usados em técnicas de recuperação externa (aço e fibras) em elementos de concreto armado, permitindo que o projetista selecione a combinação entre eles que melhor se adapte a uma aplicação específica. De modo geral, os ensaios de aderência podem fornecer mais informações sobre o comportamento da interface adesivo-reparo e, em condições de serviço, a interface dos elementos adaptados está predominantemente submetida à tensão de cisalhamento.

Embora os ensaios da ASTM C 1404 (1998), C 1042 (1999) e C 882 (2013) determinem a resistência de adesivos aplicados ao concreto, eles não refletem exatamente as condições de tensão existentes no sistema de concreto com reparo externo. Por exemplo, o procedimento da ASTM C 882 (2013), *slant shear test*, usa cisalhamento inclinado para determinar a resistência da interface substrato-resina epóxi. Neste ensaio de cisalhamento inclinado, uma parcela considerável de força normal e, portanto, de atrito, é introduzida na interface substrato-adesivo quando os corpos-de-prova são testados sob compressão axial. No teste ASTM C 1404 (1998), a resistência na interface entre o adesivo e o concreto é avaliada aplicando tração direta na interface. Novamente, a tensão de tração direta normal ao plano de interface não é o tipo predominante de tensões no sistema de concreto com reparo externo (LARRALDE *et al.*, 2001).

Na recuperação de vigas de concreto com reparo externo, a tensão crítica na interface é predominantemente cortante. Dessa forma, um procedimento alternativo e simplificado pode ser utilizado quando a natureza das tensões na interface

concreto-adesivo-material de reparo é predominantemente de cisalhamento. Este procedimento alternativo consiste em um ensaio de cisalhamento duplo de corpos-de-prova com três cubos de concreto ou argamassa. Os cubos são colados uns aos outros com adesivo e o material de reparo (Figura 2.5). A amostra fabricada é ensaiada aplicando-se uma força uniformemente distribuída na superfície superior do cubo central, enquanto os outros dois cubos nas extremidades são suportados uniformemente em toda a sua superfície inferior por uma base rígida. A configuração do ensaio é de maneira que, praticamente, somente tensões de cisalhamento atuem nas interfaces laterais entre os cubos.

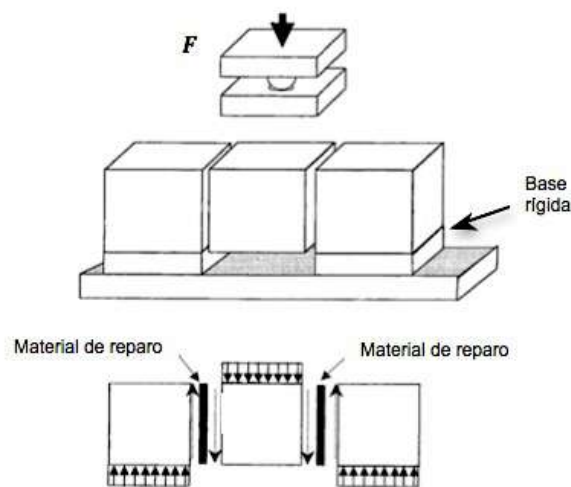


Figura 2.5: Esquema do ensaio por cisalhamento duplo (adaptado de Larralde *et al.*, 2001).

A resistência ao cisalhamento nas interfaces coladas dos corpos-de-prova cúbicos são calculadas de acordo com a Equação 2.5.

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot A_b} \quad (2.5)$$

sendo,

$\tau$  a resistência máxima de cisalhamento na interface, em MPa;

$F$  a força máxima aplicada no bloco central, em N;

$A_b$  a área das interfaces coladas com resina, em  $\text{mm}^2$ .

### 2.3.3. Ensaio de tração por compressão diametral (*splitting test*)

A NBR 7222 (ABNT, 2011) e a equivalente ASTM C 496 (2017) descrevem os procedimentos para o ensaio de tração por compressão diametral para a determinação da resistência ao cisalhamento na interface de materiais (concreto-concreto ou concreto-resina), como mostra a Figura 2.6.

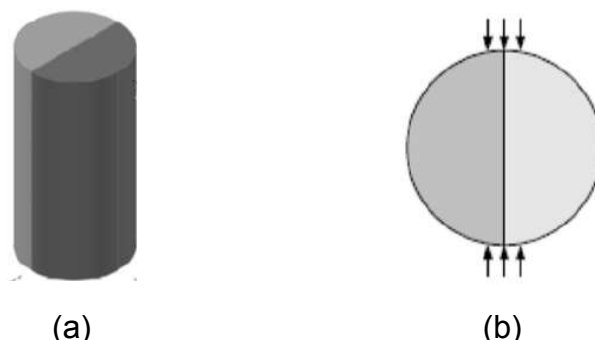


Figura 2.6: (a) Geometria do corpo-de-prova misto para *splitting test*; (b) seção transversal (COSTA *et al.*, 2018).

De acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011), a Equação 2.6 é utilizada para o cálculo da resistência ao cisalhamento à tração por compressão diametral.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d L} \quad (2.6)$$

sendo,

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

$F$  a carga de ruptura, em N;

$d$  o diâmetro do corpo-de-prova, em mm;

$L$  o comprimento do corpo-de-prova, em mm.

### 2.3.4. Ensaio de cisalhamento por compressão (*slant shear test*)

O ensaio de cisalhamento por compressão (*slant shear test*) foi proposto inicialmente por Kriegh (1976) para avaliar a resistência de cisalhamento na interface de resinas à base de epóxi em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura e com a interface de 30° em relação à vertical. Em 1978, este ensaio foi adotado por Tabor (1978) para estudar a interface concreto-

concreto usando corpos-de-prova prismáticos. Atualmente, existem vários padrões para os ensaios *slant shear test* utilizando diferentes geometrias de corpos-de-prova, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Normas disponíveis para os ensaios *slant shear test*.

Norma	Seção transversal	Altura	( $\alpha$ ) com a vertical
BS EN 12615 (1999)	100 x 100 mm <sup>2</sup>	400 mm	30°
	40 x 40 mm <sup>2</sup>	160 mm	30°
NFP18-872 (1992)	100 x 100 mm <sup>2</sup>	300 mm	30°
ASTM C882 (2013)	$\phi$ 75 mm	150 mm	30°

De todos os ensaios mencionados, o *slant shear test* - SST (Figura 2.7) é um dos mais usados para avaliar a adesão entre camadas de concreto. No SST a interface está sujeita aos estados de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e normal ( $\sigma$ ), o que permite uma distribuição de tensões relativamente uniforme na interface. O uso generalizado do SST deve-se principalmente à simplicidade da configuração experimental e à alta sensibilidade do ensaio às variações nos parâmetros de influência, a saber: procedimento de fabricação; geometria das amostras (ângulo de cisalhamento plano e a relação altura/largura da seção transversal); rigidez diferencial entre as camadas de concreto; preparação da interface (rugosidade superficial); retração diferencial entre as camadas de concreto; e tipo de material de ligação na interface (WALL e SHRIVE, 1988; CLÍMACO e REGAN, 2001; SANTOS e JÚLIO, 2011). Contudo, segundo Naderi (2009), o coeficiente de variação apresentado por esse método é relativamente alto. As tensões normais e tangenciais no plano considerado ( $\alpha$  em relação ao eixo vertical) são calculadas com o uso das Equações 2.7 e 2.8, de acordo com a representação esquemática mostrada na Figura 2.7.

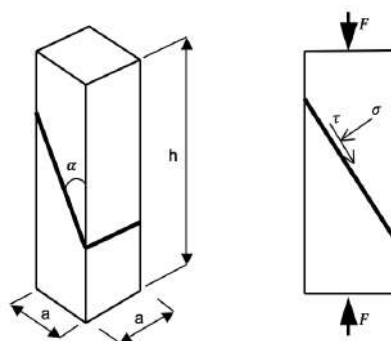


Figura 2.7: Esquema das tensões atuantes num plano inclinado para o ensaio de cisalhamento (*slant shear test*).

$$\tau_b = \frac{P \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}{a^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma_b = \frac{P \cdot \sin^2 \alpha}{a^2} \quad (2.8)$$

sendo,

$\tau_b$  a tensão de cisalhamento na interface, em MPa;

$\sigma_b$  a tensão normal na interface, em MPa;

$P$  a carga de compressão, em N;

$a^2$  a área da seção transversal quadrada do corpo-de-prova prismático, em mm<sup>2</sup>.

Segundo Santos (2009), com este ensaio também podem ser obtidos os coeficiente de coesão ( $c$ ) e de atrito ( $\mu$ ) na interface concreto-resina, por meio do uso das Equações 2.9 e 2.10, respectivamente. O coeficiente de coesão é influenciado pela força de adesão entre os diferentes materiais e o coeficiente de atrito é influenciado principalmente pela rugosidade das superfícies de contato. A mesma rugosidade foi utilizada para todos os corpos-de-prova ensaiados no presente estudo e, portanto, não foi uma variável de projeto neste ensaio.

$$c = \frac{\tau_0}{f_{ctm}} \quad (2.9)$$

$$\mu = \left( \frac{\tau_b - \tau_0}{\sigma_b} \right) \quad (2.10)$$

sendo,

$c$  o coeficiente de coesão entre concreto-resina;

$\tau_0$  a tensão de cisalhamento puro;

$f_{ctm}$  a resistência média à tração por compressão diametral;

$\mu$  o coeficiente de atrito entre concreto-resina;

$\tau_b$  a tensão tangencial atuante no plano inclinado;

$\sigma_b$  a tensão normal ao plano inclinado.

Santos e Júlio (2011) apresentam dois possíveis mecanismos de ruptura: adesiva, que ocorre pela desconexão do material da interface; e ruptura coesiva do

concreto menos resistente do que a resina, como mostra a Figura 2.8. Neste último caso somente uma estimativa pode ser obtida em função da baixa resistência da interface. Os pesquisadores em questão observaram também que o número de rupturas coesivas aumenta com a rugosidade da superfície. Também é afirmado que o número de fraturas coesivas aumenta com a rigidez diferencial entre os materiais avaliados. A retração também foi analisada por meio de diferentes condições de cura e diferentes idades entre o substrato e a camada adicionada. Concluiu-se que esse parâmetro também influencia o tipo de ruptura.

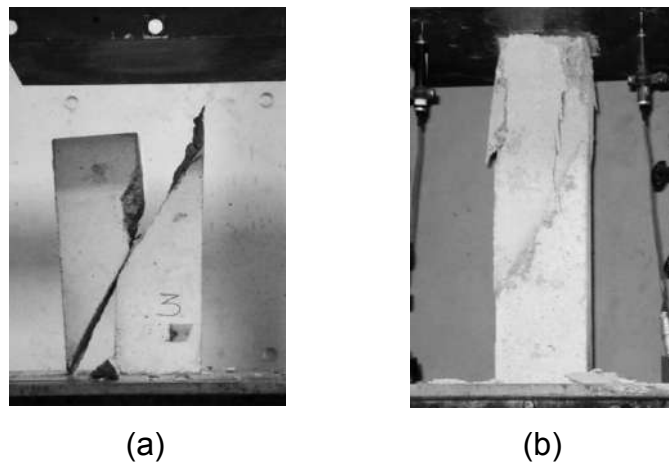


Figura 2.8: Tipos de ruptura: (a) adesiva, (b) coesiva (SALDANHA *et al.*, 2013).

De acordo com Austin *et al.* (1999), a razão de tensão normal/cisalhante é controlada pelo ângulo da interface ( $\alpha$ ), tendo por isso uma influência crucial no modo de ruptura nos ensaio SST e, portanto, na carga máxima.

#### 2.4. Resistência de aderência

Existem vários ensaios experimentais que permitem determinar a resistência de aderência entre o substrato e o material de reparo e entre o concreto e o aço. Nos itens a seguir são descritos dois ensaios que foram adotados no presente estudo, em função da simplicidade de execução, do baixo custo e além da reduzida mão de obra na confecção dos moldes. São eles: ensaio de resistência à tração na flexão - NBR 13279 (ABNT, 2005) e ensaio de tirante de concreto - NBR 7477 (ABNT, 1982).



### 2.4.1. Tração na flexão

O ensaio de tração na flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de um corpo-de-prova de geometria padronizada, o qual pode estar biapoiado ou engastado em uma das extremidades. Mede-se o valor da carga *versus* a deformação máxima. Em materiais dúcteis, quando sujeitos a esse tipo de carregamento, por serem capazes de absorver grandes deformações, não fornecem bons resultados qualitativos e quantitativos. Portanto, esse ensaio deve ser aplicado a materiais de elevada rigidez (GAMA, 2017).

As principais propriedades obtidas pelo ensaio de tração na flexão são: tensão de ruptura e módulo de elasticidade à flexão. Os resultados podem variar com a temperatura, velocidade de aplicação da carga, geometria das seções do corpo-de-prova e defeitos superficiais.

A NBR 13279 (ABNT, 2005) estabelece os procedimentos de execução do ensaio de tração na flexão a três pontos, que consiste na aplicação de carga no centro geométrico do comprimento de um corpo-de-prova prismático apoiado nas duas extremidades.

A resistência à tração na flexão é calculada utilizando-se a Equação 2.11.

$$R_f = \frac{1,5FL}{40^3} \quad (2.11)$$

sendo,

$R_f$  a resistência à tração na flexão, em MPa;

$F$  a carga aplicada, em N;

$L$  a distância entre os apoios, em mm.

A NBR 13279 (ABNT, 2005) também determina que após a ruptura dos corpos-de-prova por flexão, a resistência à compressão seja calculada de acordo com Equação 2.12.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2.12)$$

sendo,

$R_c$  a resistência à compressão, em MPa;

$F_c$  a carga máxima aplicada, em N;

1600 a área da seção transversal do corpo-de-prova (40 mm × 40 mm).

#### 2.4.2. Tirante

O ensaio de tirante consiste em exercer um esforço de tração nas duas extremidades de uma barra de aço embutida no centro de um corpo-de-prova prismático de concreto (Figura 2.9). O objetivo do ensaio é avaliar a aderência entre o concreto e o aço. De modo geral, este ensaio se destina ao estudo do coeficiente de conformação das barras de aço e reproduzem muito bem as condições reais de solicitação das barras na região tracionada de vigas fletidas (BARBOSA, 1998; SOARES, 2006; COSTA, 2012; SILVA, 2015; FRANÇA, 2017).

A determinação do coeficiente de conformação superficial é realizada por meio do ensaio de fissuração em tirantes de concreto fabricados com uma única barra ou fio e é obtida de acordo com a NBR 7477 (ABNT, 1982). Sabe-se que tirantes com barras lisas apresentam fissuras de maior abertura e mais afastadas entre si, enquanto as barras nervuradas apresentam fissuras mais próximas e com menor abertura.

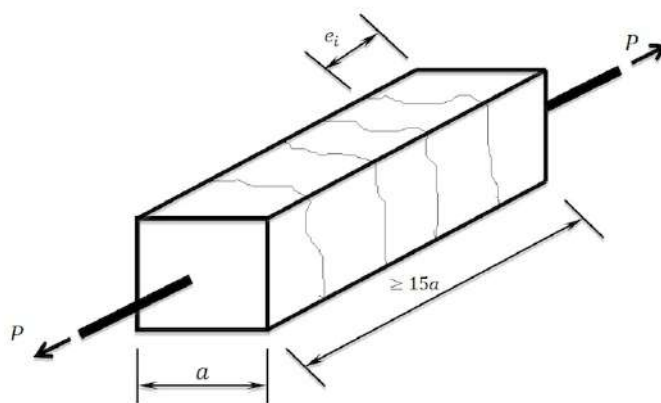


Figura 2.9: Esquema do corpo-de-prova para ensaio de tirante.

Segundo a NBR 7477 (ABNT, 1982), as distâncias registradas entre as fissuras ( $e_i$ ) permitem a determinação do coeficiente de conformação superficial aplicando-se a Equação 2.13.

$$\eta = \frac{2,25 \cdot a}{\Delta l_{m\u00e9dio}} \quad (2.13)$$

sendo,

$\eta$  o coeficiente de conforma\u00e7\u00e3o superficial (adimensional);

$a$  o lado da se\u00e7\u00e3o do tirante;

$\Delta l_{m\u00e9dio} = \frac{1}{n} \cdot \sum e_i$  a dist\u00e2ncia m\u00e9dia entre fissuras, considerando as quatro faces do tirante;

$n$  o n\u00famero de fissuras observado nas quatro faces do tirante.

A tens\u00e3o de ader\u00eancia m\u00e9dia de barras e fios de a\u00e7o, para concretos de diversas classes de resist\u00eancia, tamb\u00e9m pode ser calculado pela Equa\u00e7\u00e3o 2.14. Este modelo formulado por Castro (2000) leva em considera\u00e7\u00e3o os valores do espa\u00e7amento m\u00e9dio entre as fissuras, obtido a partir do ensaio de tirante, sendo citado e referenciado em v\u00e1rios trabalhos cient\u00edficos no Brasil.

$$\tau_m = 0,375 \cdot \frac{f_{ct} \cdot \phi}{\Delta l_{m\u00e9dio} \cdot \rho} \quad (2.14)$$

sendo,

$\tau_m$  a tens\u00e3o m\u00e9dia de ader\u00eancia, em MPa;

$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp}$  a resist\u00eancia \u00e0 tra\u00e7\u00e3o simples do concreto, em MPa;

$f_{ct,sp}$  a resist\u00eancia \u00e0 tra\u00e7\u00e3o indireta, medida a partir do ensaio de tra\u00e7\u00e3o por compress\u00e3o diametral, em MPa;

$\Delta l_{m\u00e9dio}$  a dist\u00e2ncia m\u00e9dia entre as fissuras, em mm;

$\rho = A_s/A_c$ ;

$A_s$  a \u00e1rea de a\u00e7o da se\u00e7\u00e3o transversal, em mm<sup>2</sup>;

$A_c$  a \u00e1rea de concreto da se\u00e7\u00e3o transversal, em mm<sup>2</sup>;

As Equa\u00e7\u00f5es 2.15 e 2.16 s\u00e3o dadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e fornece a resist\u00eancia de ader\u00eancia de c\u00e1lculo entre o concreto e o a\u00e7o em ancoragens de armaduras passivas.

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (2.15)$$

$$f_{cta} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (2.16)$$

sendo,

$f_{bd}$  a resistência de aderência;

$\eta_1 = 1,0$  para barras lisas;

$\eta_1 = 1,4$  para barras entalhadas;

$\eta_1 = 2,25$  para barras nervuradas;

$\eta_2 = 1,0$  para situações de boa aderência;

$\eta_2 = 0,7$  para situações de má aderência;

$\eta_3 = 1,0$  para  $\phi < 32$  mm;

$\eta_3 = (133 - \phi)/100$ , para  $\phi \geq 32$  mm.

Por meio do ensaio de tirante, Silva (2015) avaliou a aderência entre concreto e barra de aço CA-50. A partir dos resultados obtidos, foi proposta uma adaptação à NBR 6118 (ABNT, 2014) por meio da Equação 2.17.

$$f_{bd} = \eta \cdot f_{cta} \quad (2.17)$$

sendo,

$f_{bd}$  a resistência de aderência;

$\eta$  o coeficiente de conformação superficial.

## 2.5. Estudos presentes na literatura

### 2.5.1. Balaguru et al. (1999)

Balaguru et al. (1999) investigaram experimentalmente do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas por fibras de carbono coladas com resinas geopoliméricas. O estudo foi comparativo com polímeros orgânicos existentes e comumente utilizados na recuperação de estruturas.

Quatro vigas de concreto armado com dimensões 3,20 m x 0,20 m x 0,30 m (comprimento, largura e altura) foram fabricadas. Foram utilizadas 2 barras de  $\phi 4,0$  mm como armadura de tração e resistência à compressão do concreto de

47 MPa (Figura 2.10). Dentre as quatro vigas, uma não foi reforçada (controle) e três foram reforçadas com 2, 3 e 5 camadas de fibra de carbono unidirecional. As fibras usadas foram impregnadas manualmente com resina geopolimérica e fixadas na parte inferior das vigas, que foram jateadas com areia a fim de aumentar a rugosidade superficial e, conseqüentemente, a aderência entre os materiais. As vigas reforçadas foram curadas à 80°C após 24 horas de secagem. Todas as quatro vigas foram ensaiadas à flexão a 4 pontos.

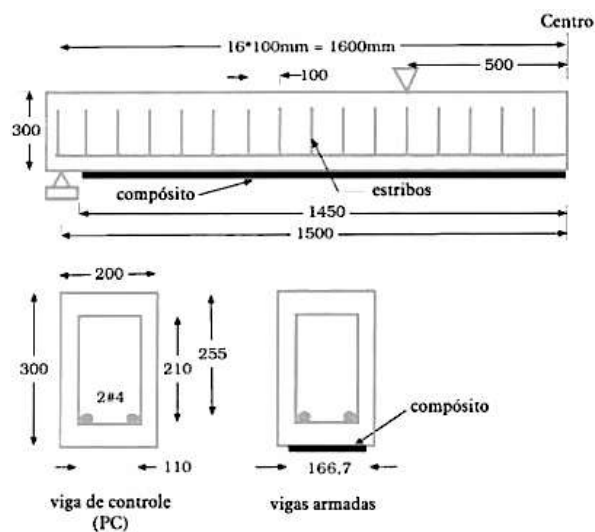


Figura 2.10: Seções longitudinais e transversais da viga reforçada com fibras de carbono coladas com resina geopolimérica (BALAGURU *et al.*, 1999).

As vigas ensaiadas com 2, 3 e 5 camadas de fibras de carbono apresentaram, respectivamente, carga de ruptura 13, 28 e 54% maiores do que a viga de controle. Como esperado, a rigidez da viga aumentou com o aumento do número de camadas de reforço, indicada pela diminuição da deflexão (Tabela 2.3).

Balaguru *et al.* (1999) compararam seus resultados com aqueles obtidos por Laboissiere (1993) em vigas reforçadas com polímero orgânico. Em ambos os estudos, a capacidade de carga das vigas foi aumentado em aproximadamente 50% em relação à viga de controle. Porém, a principal diferença observada entre o polímero orgânico e o geopolímero foi o padrão de ruptura. No estudo de Laboissiere (1993), o compósito descamou do substrato, enquanto nas vigas de Balaguru *et al.* (1999) houve a ruptura do compósito, indicando que o geopolímero oferece excelente aderência tanto à superfície de concreto quanto aos planos interlaminares do tecido de carbono.

Tabela 2.3: Resultados dos ensaios mecânicos em vigas reforçadas por fibras de carbono e resina geopolimérica (adaptada de Balaguru *et al.*, 1999).

Viga	Carga de escoamento do aço (kN)	Carga de ruptura (kN)	Deflexão na ruptura (mm)	Evento observado
Controle	55,6	71,2	89,0	Ruptura do aço
2 camadas	62,3	80,5	19,0	Ruptura do Compósito
3 camadas	70,3	91,2	23,0	Ruptura do Compósito
5 camadas	73,4	109,9	23,0	Ruptura do Compósito

Ficou evidenciado que o geopolímero possui excelente desempenho em termos de aderência e, portanto, pode ser utilizado no reforço à flexão de estruturas de concreto. Além disso, o geopolímero é um material resistente ao fogo, estável quando exposto à luz ultravioleta e quimicamente compatível com o concreto de cimento Portland. Entretanto, deve-se atentar para cuidados específicos quanto ao manuseio da resina geopolimérica pelos operários, pois existem riscos de queimadura devido à elevada alcalinidade da mistura.

### **2.5.2. Mazza (2010)**

Os estudos realizados por Mazza (2010) tiveram como objetivo a análise das propriedades mecânicas e da aderência entre argamassas de reparo de cimento geopolimérico e substrato de concreto com cimento Portland. Para isso, realizou ensaios de tração na flexão em vigas maciças de seção retangular de concreto com entalhe trapezoidal preenchido com dois tipos de argamassas geopoliméricas e um graute comercial. Na etapa inicial do trabalho foram definidos dois traços para a argamassa geopolimérica, que foram identificadas como A100 e A150. Estas argamassas foram produzidas à base de metacaulim e cimento Portland (CPIIZ-32) misturadas com um solução ativadora alcalina composta por silicato de sódio alcalino ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) e hidróxido de potássio (KOH). As argamassas geopoliméricas A100 e A150 apresentaram resistência à compressão de 26,4 e 34,3 MPa, respectivamente, e o graute comercial obteve resistência de 30,1 MPa.

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos até a ruptura (flexão pura), aos 56 dias de idade. Os dados foram coletados para determinação das curvas carga *versus* deslocamento e o carregamento foi crescente até a ruptura da viga.

A Figura 2.11 mostra as curvas carga *versus* flecha das vigas monolíticas de concreto e das vigas reparadas. As curvas mostram que as flechas registradas no meio do vão das vigas foram bem próximas. Este fato indica perfeita aderência do reparo ao substrato, que contribui para a interação solidária do sistema substrato/reparo. Independentemente da argamassa utilizada, também foi possível notar que o comportamento de cada tipo de viga reparada foi similar até a carga de aproximadamente 12 kN. Até essa carga, cada sistema (substrato/reparo) permaneceu íntegro. Após a fissuração do concreto, ficou claro o aumento da capacidade resistente nas vigas reforçadas em relação à viga monolítica.

A rigidez do sistema de reparo foi baixa devido ao entalhe realizado nas vigas com argamassas geopoliméricas e graute comercial, mesmo com o aumento da capacidade resistente das peças. Isso reduz do sistema a susceptibilidade de surgimento de ruptura frágil, que é indesejável, por possibilitar aumento da resistência à tração do sistema.

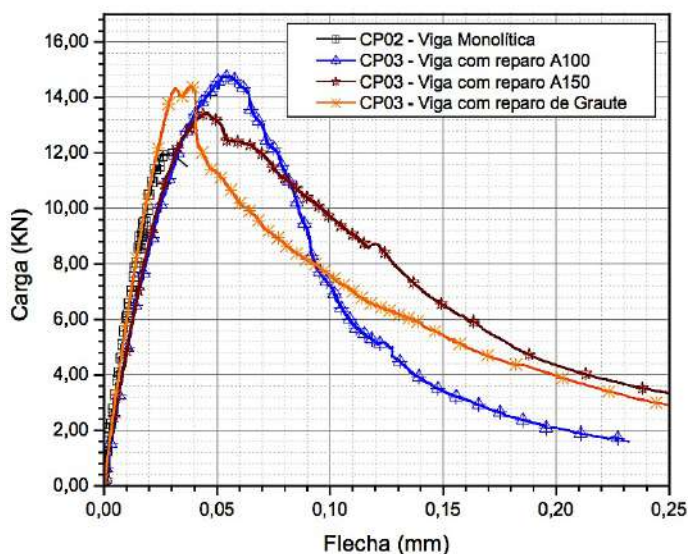


Figura 2.11: Curvas carga *versus* flecha das vigas ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos (MAZZA, 2010).

A Tabela 2.4 mostra os valores das cargas máximas e os deslocamentos verticais máximos no meio do vão de cada viga. A viga com argamassa

geopolimérica com reparo A100 mostrou-se superior às demais em relação à capacidade de deformação antes da ruptura, chegando a obter um valor 112% maior em relação à viga monolítica. Já a viga reparada com geopolímero A150 superou a monolítica em 80%. Quanto à viga reparada com graute comercial, sua deformação vertical foi inferior às vigas com reparo geopolimérico; porém, ainda assim, superou a viga monolítica em 56%.

Tabela 2.4: Valores de carga máxima e respectiva flecha máxima das vigas (adaptada de Mazza, 2010).

Viga	Carga máxima (kN)	Resistência à flexão (MPa)	Flecha máxima (mm)
Monolítica	11,99	3,60	0,025
Reparo A100	14,76	4,43	0,053
Reparo A150	13,44	4,03	0,045
Reparo graute comercial	14,41	4,32	0,039

A Figura 2.12 mostra a comparação entre as flechas, com destaque ao trecho da curva referente ao carregamento igual a 90% da carga de ruptura da viga monolítica, ou seja, carga de aproximadamente 10,80 kN. Para este carregamento, observou-se que as argamassas geopoliméricas apresentaram flechas maiores, ou seja, com menor rigidez em relação à viga monolítica e à reparada com graute comercial. Isso demonstra o bom desempenho que essas argamassas geopoliméricas obtiveram em relação à aderência, bem como à capacidade de servir como material para recuperação estrutural.

A flecha da viga com reparo geopolimérico A100 foi 33% maior do que a flecha da viga referencial. A viga reparada com o geopolímero A150 apresentou flecha um pouco menos pronunciada do que a viga A100 (diferença de 0,001 mm entre elas), porém 29% maior do que a flecha obtida pela viga monolítica. O comportamento da viga reparada com o graute foi semelhante ao da viga monolítica de concreto.

Logo, o reparo do banzo tracionado de vigas de concreto com argamassa geopolimérica mostrou-se não somente eficaz em termos de capacidade portante, como também apresentou maior flexibilidade em relação ao substrato, requisito importante no reparo de estruturas de concreto.



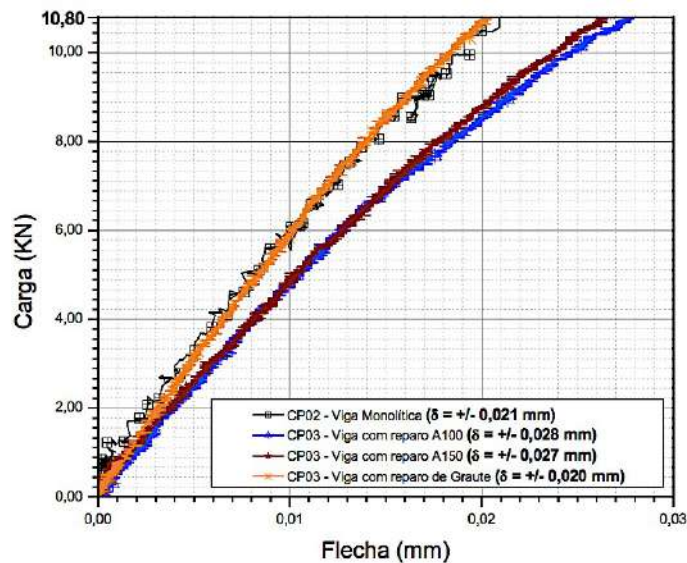


Figura 2.12: Curvas carga *versus* flecha das vigas ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos, até a carga máxima de 10,80 kN (MAZZA, 2010).

### 2.5.3. Ueng *et al.* (2012)

Ueng *et al.* (2012) estudaram a aderência entre argamassas de cimento Portland convencional e geopolimérica. Para tanto, corpos-de-prova cilíndricos foram ensaiados individualmente para determinar os parâmetros mecânicos de ambas as argamassas e corpos-de-prova prismáticos (*slant shear test*) foram usados para determinar os parâmetros de aderência na interface. A Figura 2.13 mostra as dimensões dos corpos-de-prova prismáticos. A parte superior e a inferior dos corpos-de-prova foram fabricadas com argamassa de cimento Portland e unidas entre si com uma camada de 20 mm de espessura de geopolímero, com doze ângulos de inclinação distintos em relação ao plano horizontal. Após 14 dias de cura do geopolímero os corpos-de-prova prismáticos foram ensaiados.

A argamassa de cimento foi fabricada na proporção 1:3, com cimento Portland tipo I e areia de rio graduada, alcançando resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias. Já o geopolímero foi produzido com metacaulim e solução ativadora alcalina composta por hidróxido de sódio e silicato de sódio alcalino com razão molar de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  de 1,7 e  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  de 8,3. A resistência à compressão do geopolímero foi de aproximadamente 40 MPa aos 28 dias. Todos os corpos-de-prova foram curados à temperatura ambiente.

Dois modos de ruptura foram observados sob carga compressiva uniaxial. O modo de ruptura tipo I foi caracterizado por planos fraturados na argamassa de cimento e no geopolímero (ruptura coesiva) e o modo de ruptura tipo II caracterizado

pelo cisalhamento ao longo da interface entre a argamassa de cimento e o geopolímero (ruptura adesiva).

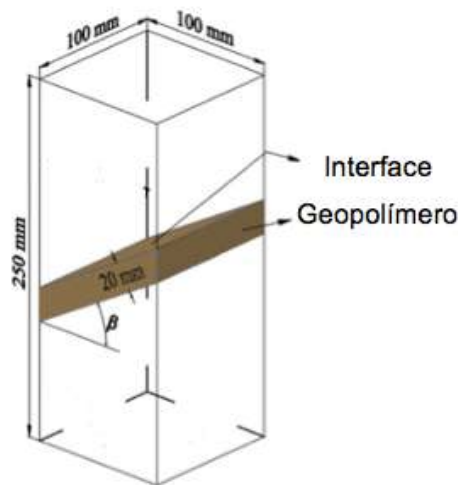


Figura 2.13: Dimensões dos corpos-de-prova prismáticos de argamassa de cimento Portland colados com argamassa geopolimérica (UENG *et al.*, 2012).

A Tabela 2.5 resume os modos de ruptura dos 48 corpos-de-prova ensaiados. Os corpos-de-prova com interface com inclinação entre 0° e 45° ou 90° apresentaram ruptura tipo I. Já para inclinações entre 50° e 60° a ruptura foi do tipo II.

Para a determinação da resistência da interface foi adotado o critério de Mohr-Coulomb, que descreve a falha da interface aderente pelo pico de tensão de cisalhamento atuando nesta região. A tensão de cisalhamento  $\tau^f$ , que depende da aderência entre a argamassa de cimento e o geopolímero  $c^{IF}$  e do ângulo de atrito aparente associado  $\phi^{IF}$ , é calculada pela Equação 2.18.

Tabela 2.5: Modos de ruptura dos corpos-de-prova prismáticos com interface geopolimérica com diferentes inclinações (adaptada de Ueng *et al.*, 2012).

Grupo	Inclinação da camada de geopolímero (°)											
	0	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	90
1	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	I
3	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	I
4	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	I

$$\tau^f = c^{IF} + \sigma_n^f \tan\phi^{IF} \quad (2.18)$$

sendo  $\sigma_n^f$  a tensão normal atuante na interface na ruptura.  $\tau^f$  e  $\sigma_n^f$  foram calculados realizando transformação de tensão com base na intensidade de pico dos corpos-de-prova prismáticos com ruptura tipo II e inclinação correspondente à camada de geopolímero. A Figura 2.14 mostra os resultados da regressão linear dos 12 corpos-de-prova com modo de ruptura tipo II, sendo  $c^{IF} = 2,75$  MPa e  $\phi^{IF} = 42,5^\circ$ . Os mesmos parâmetros foram calculados para a argamassa de cimento Portland ( $c^{CM} = 6,35$  MPa e  $\phi^{CM} = 30^\circ$ ) e para o geopolímero ( $c^{GP} = 8,12$  MPa e  $\phi^{GP} = 45,2^\circ$ ).

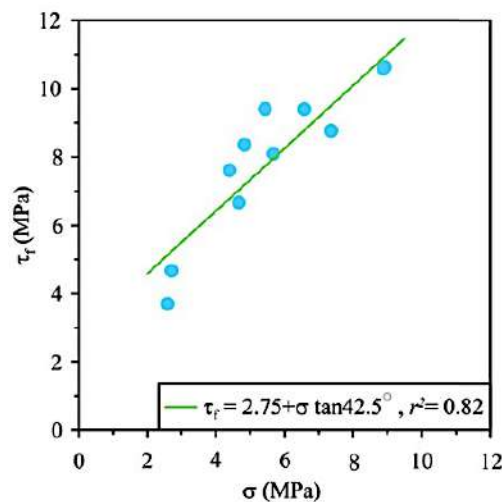


Figura 2.14: Regressão linear para os corpos-de-prova prismáticos de argamassa de cimento com interface de geopolímero e modo de ruptura tipo II (UENG *et al.*, 2012).

A aderência entre a argamassa de cimento e o geopolímero variou de 34 a 43% em comparação às coesões aparentes dos dois materiais ( $c^{GP}$  e  $c^{CM}$ ). Diante dos resultados, concluiu-se que a composição ou a resistência mecânica do geopolímero deveria ser melhorada. No entanto, o ângulo de atrito aparente da interface foi próximo ao do geopolímero e excede em muito àquele obtido pela argamassa de cimento. Logo, o geopolímero pode servir como adesivo eficaz sob estado de elevada tensão normal compressiva.

#### 2.5.4. França (2017)

França (2017) avaliou a eficácia de uma argamassa geopolimérica como material para recuperação de vigas de concreto armado convencional, a fim de

restaurar o caráter monolítico e a capacidade portante da estrutura. Para isso realizou ensaios de tração na flexão em vigas maciças de concreto com entalhe trapezoidal preenchido com dois tipos de argamassas geopoliméricas e uma argamassa comercial para reparo estrutural. As argamassas geopoliméricas AGT1 e AGT2 apresentaram resistência à compressão de 25,2 e 37,2 MPa, respectivamente. Já a argamassa comercial ACQ apresentou 24,9 MPa.

As vigas fabricadas eram prismáticas de seção transversal de 100 mm x 100 mm e comprimento de 650 mm (Figura 2.15). O dimensionamento foi realizado de forma que o elemento estrutural apresentasse ruptura na região de flexão pura no ensaio de flexão a quatro pontos. Este ensaio, em conjunto com a norma AFNOR NF P18-851 (1992), permitiu analisar o sistema de reparo na região inferior tracionada.

As vigas foram classificadas em séries combinando os tipos de armadura (CA-60  $\phi$ 4,2 mm - barras nervuradas; e CA-25  $\phi$ 6,3 mm - barras lisas) com as argamassas de reparo (AGT1, AGT2, ACQ). Para cada série foram fabricadas três vigas (Tabela 2.6).

Os resultados mostraram que, para resistência de aderência ao cisalhamento, as vigas da série G (com reparo de AGT1 e sem aço) tiveram o mesmo comportamento das vigas da série A (vigas monolíticas sem aço). As maiores flechas ocorreram para as vigas reparadas com AGT1 quando comparadas às vigas da série A. As vigas reparadas com argamassa geopolimérica apresentaram-se monolíticas, ao contrário das recuperadas com ACQT e ACQU (sendo T = cura sob temperatura ambiente, e U = cura submersa em água com cal), que apresentaram descolamento da interface substrato-reparo.

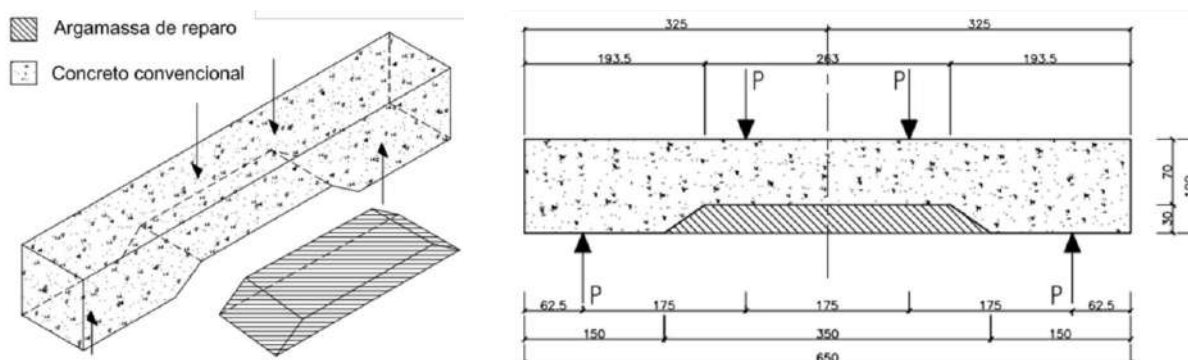


Figura 2.15: Esquema e dimensões das vigas reparadas com argamassa geopolimérica, para ensaios de tração na flexão a quatro pontos. Todas as dimensões em mm (FRANÇA, 2017).

Tabela 2.6: Séries e características das vigas (FRANÇA, 2017).

Série	Características
A	Sem reparo e sem aço
B	Sem reparo com aço CA-60 ( $\phi 4,2$ mm)
C	Sem reparo com aço CA-25 ( $\phi 6,3$ mm)
D	Com reparo ACQ e sem aço
E	Com reparo ACQ e aço CA-60 ( $\phi 4,2$ mm)
F	Com reparo ACQ e aço CA-25 ( $\phi 6,3$ mm)
G	Com reparo AGT1 e sem aço
H	Com reparo AGT1 e AGT2 e aço CA-60 ( $\phi 4,2$ mm)
I	Com reparo AGT1 e AGT2 e aço CA-25 ( $\phi 6,3$ mm)

As vigas das séries H e I (vigas armadas com aço CA-60  $\phi 4,2$  mm e com aço CA-25  $\phi 6,3$  mm e reparadas com argamassas geopoliméricas AGT1 e AGT2, respectivamente) também apresentaram comportamentos similares às vigas das séries B e C (sem reparo e com aço CA-60  $\phi 4,2$  mm e com aço CA-25  $\phi 6,3$  mm, respectivamente), enquanto que às das séries E e F (vigas armadas com aço nervurado CA-60  $\phi 4,2$  mm e com aço CA-25,  $\phi 6,3$  mm reparadas com argamassa comercial ACQT e ACQU, respectivamente), apesar de terem cargas de ruptura próximas às das vigas de referência, tiveram momentos de fissuração precoces devido à baixa aderência entre o substrato e a argamassa comercial ACQT e ACQU.

No que diz respeito à aderência, os resultados foram mais satisfatórios para as vigas reparadas com as argamassas geopoliméricas (AGT1 e AGT2), para todas as séries. Além disso, as argamassas de reparo pouco contribuíram para aumentar a capacidade portante das vigas devida à posição em que estavam localizadas, onde as armaduras de flexão eram mais solicitadas.

No entanto, enquanto as vigas reparadas com argamassa comercial (ACQ) mostraram discreta redução da capacidade portante, aquelas reparadas com AGT1 e AGT2 fizeram com que as vigas se comportassem como as vigas monolíticas de referência, mostrando, assim, o enorme potencial de uso dos geopolímeros no reparo de estruturas de concreto armado.

## **2.6. Considerações finais**

Os estudos apresentados no item anterior evidenciam claramente que a resistência ao cisalhamento e a aderência entre os materiais geopoliméricos, substratos de cimento e o aço são favoráveis. Sendo assim, novos estudos devem ser realizados a fim de garantir a aplicação segura, confiável e viável deste material na construção civil. Os excelentes resultados presentes da literatura, bem como sua escassez, motivaram o estudo das propriedades cisalhantes e aderentes dos materiais geopoliméricos para recuperação estrutural.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi elaborado para alcançar os objetivos geral e específicos desta tese e está baseado nas seguintes etapas:

- caracterização dos materiais envolvidos na elaboração do substrato de concreto de cimento Portland e das resinas geopoliméricas;
- dosagem e produção das resinas geopoliméricas;
- determinação das propriedades físicas e mecânicas das resinas geopoliméricas nos estados fresco e endurecido;
- ensaios para determinação da resistência de aderência das resinas geopoliméricas visando a recuperação estrutural.

Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Engenharia Civil (LECIV) e de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). A Figura 3.1 apresenta um fluxograma resumido das atividades realizadas neste estudo.

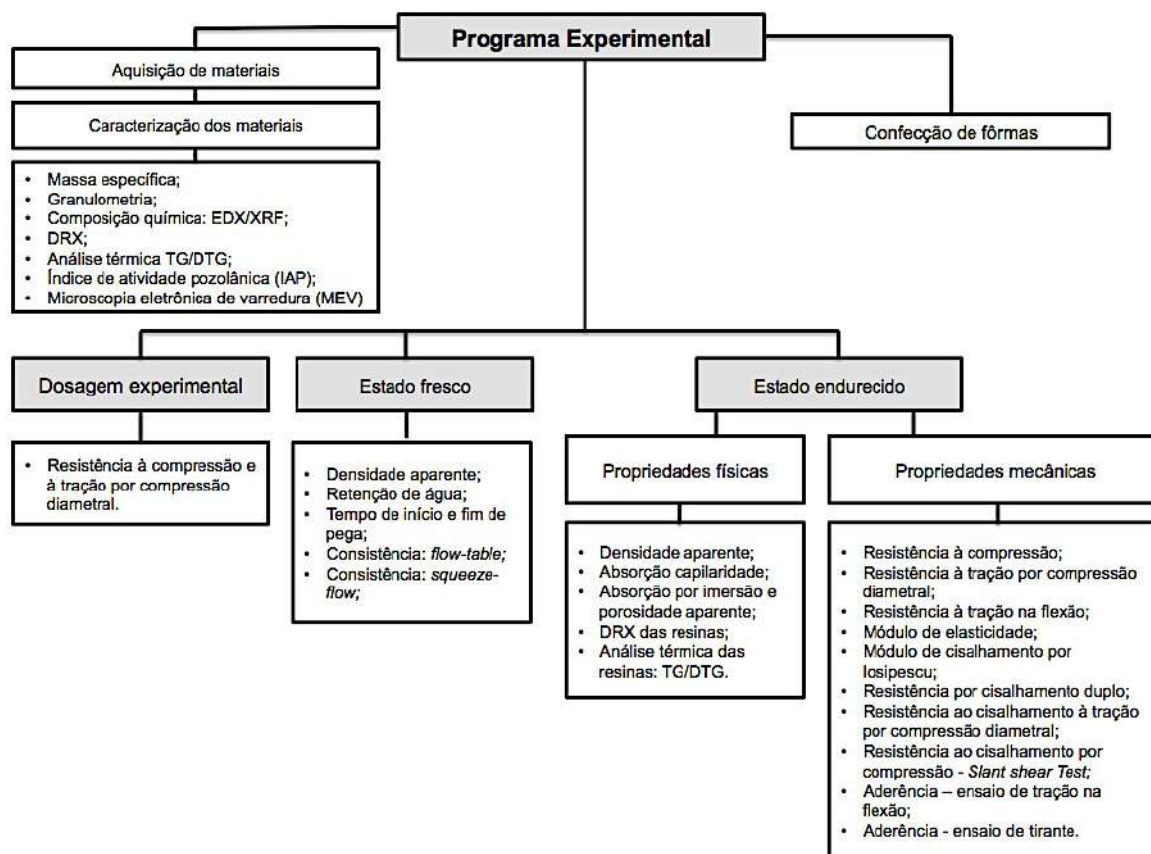


Figura 3.1: Etapas do programa experimental.

### **3.1. Materiais**

Os ensaios de caracterização dos materiais, realização de misturas e moldagens, assim como os ensaios mecânicos dos corpos-de-prova seguiram as prescrições normativas e procedimentos usuais para materiais à base de cimento Portland.

Todas as resinas geopoliméricas e o substrato de cimento Portland foram produzidos com materiais cujas características químicas, físicas e mecânicas são apresentadas a seguir.

#### **3.1.1. Metacaulim**

O metacaulim é um material constituído basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo obtido pelo processo de calcinação do caulim entre as temperaturas de 500 e 800°C. Este material foi utilizado como precursor na fabricação das resinas geopoliméricas.

O metacaulim comercial HP ultra foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil S/A e suas propriedades físicas e químicas são mostradas a seguir.

##### **3.1.1.1. Massa específica**

A massa específica de 2,57 g/cm<sup>3</sup> do metacaulim foi obtida por meio do ensaio de picnometria.

##### **3.1.1.2. Granulometria a laser**

Para se obter a distribuição granulométrica do metacaulim foi realizado o ensaio de granulometria por difração a laser em um equipamento Shimadzu SALD-3101. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Ciências Ambientais (LCA) da UENF. Previamente, as amostras foram dispersas em água destilada. As condições de ensaio foram: agitação a 1500 rpm, tempo de ultrassom de 300 segundos, obscuração de 19/0,19% e tempo de dispersão de 5 min. A Figura 3.2 mostra a curva granulométrica do metacaulim. A Tabela 3.1 mostra os diâmetros do material aluminossilicato, diâmetros estes que são definidos como tamanhos de partícula



abaixo dos quais se encontram 10% (D10), 50% (D50) e 90% (D90) da massa do material.

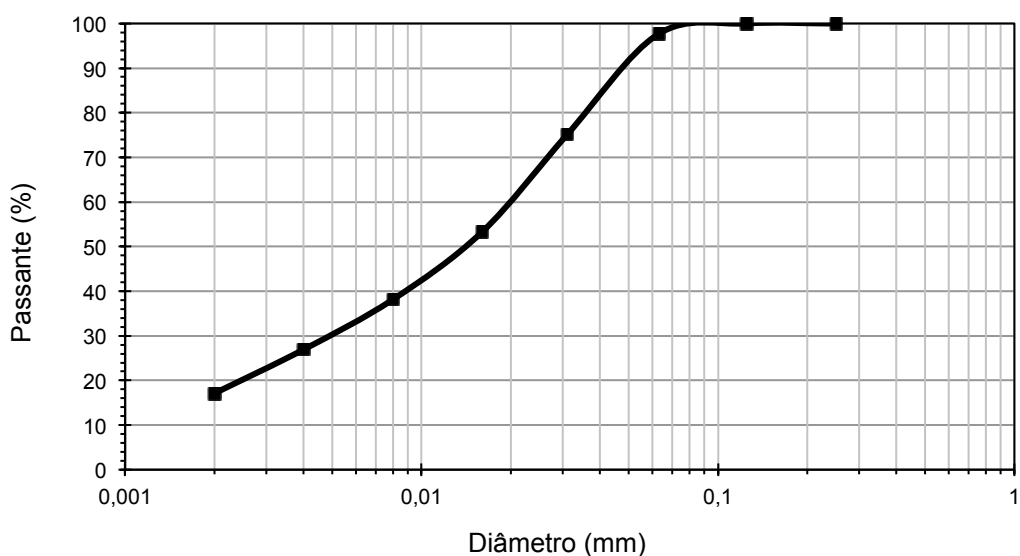


Figura 3.2: Curva granulométrica do metacaulim.

Tabela 3.1: Diâmetro das partículas do metacaulim ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ ,  $D_{\text{médio}}$ ).

Diâmetro (%)	Metacaulim ( $\mu\text{m}$ )
D10	1,55
D50	14,28
D90	52,14
$D_{\text{médio}}$	22,66

### 3.1.1.3. Granulometria por sedimentação

Outro método utilizado para obter a distribuição granulométrica do metacaulim foi o ensaio de granulometria por sedimentação, seguindo as prescrições da NBR 7181 (ABNT, 2017). É um ensaio de caracterização que compõe a análise granulométrica do material junto com o ensaio de peneiramento, sendo realizado no Laboratório de solos do LECIV. Inicialmente, as amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016) e uma parte separada para a determinação da umidade higroscópica. O metacaulim foi misturado e agitado por 15 minutos com agente dispersante e, em seguida, colocado na proveta de capacidade de 1 litro. Por fim, a água destilada foi adicionada até a marca de referência. Foram realizadas

leituras com um densímetro nos tempos predeterminados até a última 24h após o início do ensaio. Os resultados são mostrados na Tabela 3.2 e corroboram os valores obtidos por granulometria a laser.

Tabela 3.2: Diâmetro das partículas do metacaulim ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ ,  $D_{\text{médio}}$ ).

Diâmetro (%)	Metacaulim ( $\mu\text{m}$ )
D10	0,60
D50	12,90
D90	52,25
$D_{\text{médio}}$	21,92

#### 3.1.1.4. Composição química

As quantidades de óxidos nas amostras foram obtidas por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX) em um equipamento Shimadzu EDX- 720 com tubo de 3 kW e alvo de ródio localizado no Laboratório de Engenharia Civil da UENF (Figura 3.3).

A composição química, em porcentagem mássica, do metacaulim é mostrada na Tabela 3.3. Os resultados comprovaram o potencial pozolânico do metacaulim, atendendo os requisitos químicos exigidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015) mostrados na Tabela 3.4.



Figura 3.3: Espectrômetro de fluorescência de raios X.

Na Tabela 3.3 é possível observar que os óxidos  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são predominantemente presentes na composição do metacaulim. O metacaulim, juntamente com os silicatos utilizados na solução alcalina foram as fontes de óxido de silício e alumínio das resinas geopoliméricas produzidas. Assim, dividindo-se a

quantidade de óxido de silício pela de óxido de alumínio pode-se obter o módulo sílica-alumina ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Tabela 3.3: Composição química e propriedades físicas do metacaulim.

Especificações	Resultados fornecidos pelo fabricante	Resultados dos ensaios	Limites - NBR 15894-1 (ABNT, 2010)
$\text{SiO}_2$ (%)	59,5	51,3	44,0 - 65,0%
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	32,2	40,4	32,0 - 46,0%
CaO (%)	0,3	0,1	CaO + MgO < 1,5%
MgO (%)	0,1	-	
$\text{TiO}_2$ (%)	1,0	1,3	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	2,2	3,8	-
$\text{K}_2\text{O}$ (%)	1,8	1,7	$0,658 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} < 1,5\%$
$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	0,1	-	< 0,5%
$\text{SO}_3$ (%)	0,3	1,3	< 1,0%
Perda ao fogo (%)	2,5	3,94	< 4,0%
Finura (%) (< #325 - 44 $\mu\text{m}$ )	8,5	-	< 10,0%
Área específica (BET, $\text{cm}^2/\text{g}$ )	225.000	-	> 150.000
Massa específica ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	2,53	2,57	-
Massa unitária ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	0,68	-	-

### 3.1.1.5. Difração de raios X

A caracterização das fases cristalinas do metacaulim foi obtido por meio de

um difratômetro Miniflex 600 da Rigaku (Figura 3.4), com tensão de 40 kV, corrente de 15 mA, radiação Cu-K $\alpha$  com passo  $2\theta = 0,02^\circ$  e velocidade de varredura  $10^\circ/\text{min}$ , faixa de leitura entre  $8$  e  $70^\circ$ .

Tabela 3.4: Requisitos químicos do metacaulim - NBR 12653 (ABNT, 2015).

Requisitos	Metacaulim	Limites - NBR 12653 (ABNT, 2015)
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	95,5	≥ 70%
SO <sub>3</sub> (%)	1,3	≤ 4%
Perda ao fogo (%)	3,94	≤ 10%
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O (%)	-	≤ 1,5%

As fases foram identificadas por comparação dos picos de difração fornecidos pelos arquivos do banco de dados das estruturas cristalinas inorgânicas do *software* PDLX 2.0 da Rigaku.

De acordo com a Figura 3.5, o metacaulim possui características amorfas com picos cristalinos de quartzo (SiO<sub>2</sub>), caulinita [Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>] e muscovita [KAl<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH,F)<sub>2</sub>]. Para o metacaulim, a presença destas fases cristalinas são comumente observadas e a presença da caulinita mostra que a calcinação realizada pelo fabricante não foi totalmente eficiente. A banda larga de  $18$  a  $38^\circ 2\theta$  mostra a presença de material com ordenamento atômico de curto alcance.

Assim, os aluminossilicatos amorfos identificados são extremamente importantes para a produção dos geopolímeros devido a sua elevada taxa de dissolução na presença de um ambiente altamente alcalino.



(a)



(b)

Figura 3.4: Ensaio de difratometria de raios X: (a) porta-amostras com metacaulim; (b) equipamento difratômetro Miniflex 600 Rigaku.

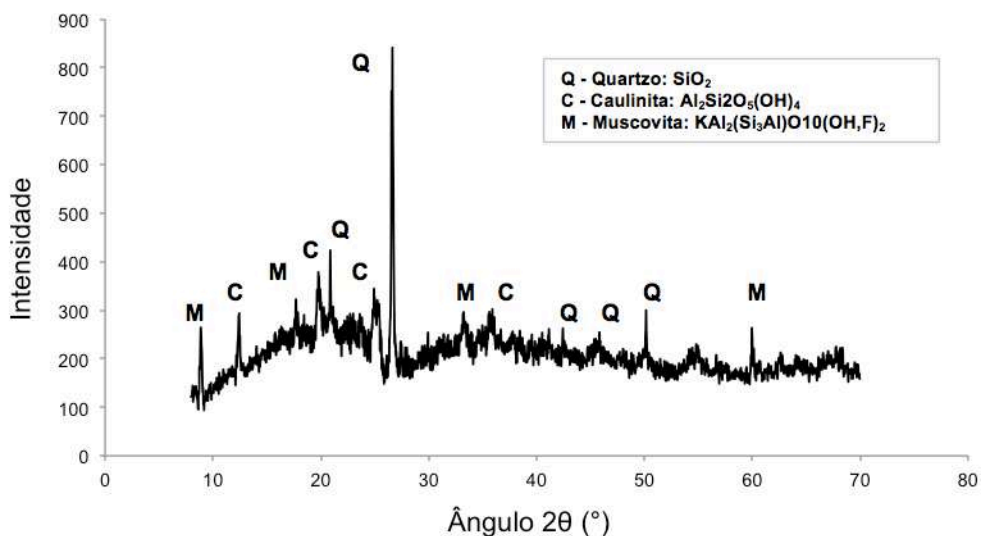


Figura 3.5: Difratoograma de raios X do metacaulim.

### 3.1.1.6. Análises térmicas

As análises termogravimétrica (TGA) e térmica diferencial (DTA) foram realizadas para verificar transformações de fase e estabilidade térmica do metacaulim. A técnica possibilitou conhecer o intervalo de temperatura em que a amostra adquire composição fixa, faixa de decomposição e reações de oxidação, desidratação, combustão *etc.* Os ensaios térmicos foram realizados no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF em um equipamento TA Instruments, modelo TGA Q 5000 (Figura 3.6).



Figura 3.6: Equipamento para análises térmicas: termogravimetria (TGA) e termodiferencial (DTA).

A análise termogravimétrica é uma técnica analítica destrutiva pertencente ao ramo das análises térmicas que monitora a variação de massa de uma amostra em

função da temperatura e/ou tempo, em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas. Durante a execução do ensaio, 10 mg do material foi colocado em um porta amostras e, em seguida, foram submetidos a uma taxa de aquecimento de 15°C/min em ambiente de oxigênio, até a temperatura de 1000°C. O material foi previamente macerado com auxílio de almofariz e pistilo de porcelana, até reduzi-lo a um pó bem fino. Os resultados para o metacaulim são mostrados na Figura 3.7.

A partir da curva termogravimétrica foi possível obter o valor de 3,94% de perda de massa do metacaulim ao longo do ensaio. O primeiro pico a 54,1°C representa a perda de água absorvida e/ou adsorvida. Na temperatura de 336,9°C ocorreu a decomposição da gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . E, por fim, a transição vítrea na qual a caulinita remanescente é convertida em metacaulinita aos 486,3°C.

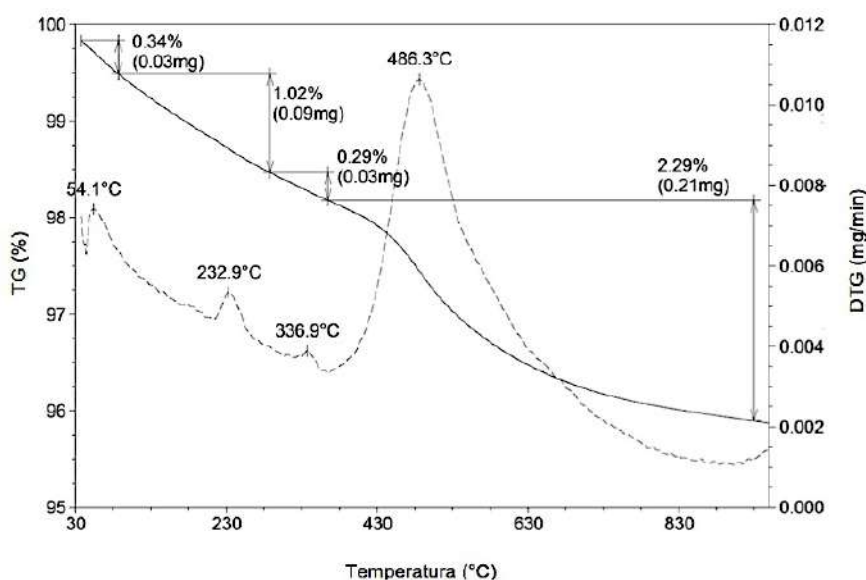


Figura 3.7: Curva termogravimétrica (TG) e sua diferencial (DTG) do metacaulim.

### 3.1.1.7. Índice de atividade pozolânica (IAP)

O índice de atividade pozolânica (IAP) pode ser determinado de duas formas: pelo índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014) ou realizado com cal aos 7 dias, de acordo com os procedimentos descritos na NBR 5751 (ABNT, 2015). Para ambos os métodos os corpos-de-prova devem ser moldados seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019).

A determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi realizada com a ruptura de 6 corpos-de-prova cilíndricos de  $\phi$  50 mm x 100 mm para a argamassa com metacaulim e 6 corpos-de-prova cilíndricos de mesmas dimensões para a argamassa de referência, contendo apenas cimento Portland do tipo CPIIF-32. As amostras foram submetidas a 28 dias de cura úmida. O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias é expresso em porcentagem (%) e foi calculado pela seguinte equação:

$$I_{\text{cimento}} = \frac{fcB}{fcA} \cdot 100 \quad (3.1)$$

sendo,

$fcB$  a resistência média aos 28 dias dos corpos-de-prova moldados com cimento CPIIF-32 e 25% de metacaulim, aproximada ao décimo e expressa em (MPa), e  $fcA$  a resistência média aos 28 dias dos corpos-de-prova moldados somente com cimento CPIIF-32, aproximada ao décimo e expressa em (MPa).

Já a determinação da atividade pozolânica com cal consiste na ruptura de 3 corpos-de-prova cilíndricos de  $\phi$  50 mm x 100 mm aos 7 dias de idade. A cura das amostras é realizada no próprio molde, sendo 24h a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e seis dias em estufa a  $55 \pm 2^\circ\text{C}$ . A norma prevê que para o material apresentar pozolanicidade deve alcançar resistência à compressão média de no mínima 6,0 MPa e um desvio relativo máximo de 6%.

Os resultados dos ensaios de índice de atividade pozolânica com o cimento Portland e com a cal confirmaram o bom desempenho do metacaulim como pozolana de alta reatividade. O índice de atividade realizado com cimento Portland foi igual a 128% e o índice de atividade pozolânica com a cal igual a 8,7 MPa. Estes valores superam as exigências da norma: de 90% para o método do cimento Portland e de 6,0 MPa para a cal.

### 3.1.1.8. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que permite a observação e análise das características morfológicas microestruturais de materiais sólidos. É essencial no conhecimento das características físicas do metacaulim; entretanto, não é de grande relevância na classificação quanto ao nível de

reatividade ou quanto a sua eficácia quando utilizado em pastas, argamassas ou produtos à base de cimento Portland.

O equipamento usado para obtenção das imagens das amostras de metacaulim estava disponível no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF e foi um microscópio Shimadzu, modelo SSX-550, operando a 20 keV.

As amostras de metacaulim foram secas em estufa a 50°C por 48h. Em seguida, as amostras foram fixadas em um porta amostras (*stub* de alumínio) com auxílio de uma fita adesiva dupla face de carbono, para garantir que ficassem carregadas negativamente durante a varredura do feixe eletrônico. Por fim, as amostras foram recobertas com ouro (processo de metalização) com uma camada de espessura adequada para a produção de elétrons secundários. O equipamento e as etapas de preparação das amostras são mostrados na Figura 3.8.



(a)



(b)

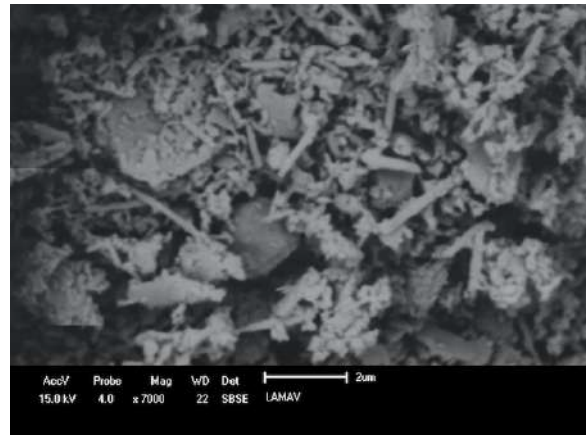
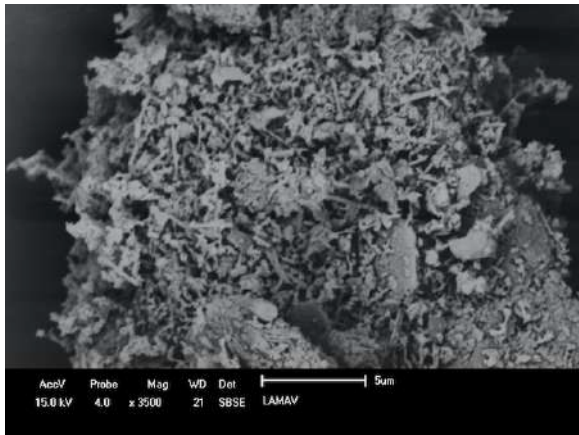


(c)

Figura 3.8: (a) Amostra de resina geopolimérica metalizada; b) microscópio eletrônico de varredura (MEV); (c) aparelho para metalização das amostras.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) gerou as micrografias da amostra de metacaulim com duas ampliações (3500x e 7000x), mostradas na Figura 3.9. Em geral, as partículas apresentam formato lamelar e também a presença de partículas tubulares, provavelmente de haloisita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Estas características passam a se sobressair nas ampliações com 7000x, observando-se também partículas aglomeradas, fato esperado devido a presença de umidade, que é comum durante a preparação das amostras.





(a)

(b)

Figura 3.9: Micrografias do metacaulim: (a) 3500x; (b) 7000x.

### 3.1.2. Hidróxidos

O hidróxido de sódio (NaOH) e o de potássio (KOH), em forma de escamas, também foram utilizados como ativadores alcalinos para a fabricação das resinas geopoliméricas. O fornecimento foi feito pela distribuidora de produtos químicos São Lázaro Ltda. A Tabela 3.5. mostra o laudo da análise química fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.5: Análise química dos hidróxidos de sódio e potássio. Valores fornecidos pelo fabricante.

Hidróxido de sódio	Resultados (%)	Parâmetros do fabricante (%)
NaOH	75,2	98,50 mín
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,24	0,50 máx
NaCl	0,027	0,05 máx
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0028	0,005 máx
Hidróxido de potássio	Resultados (%)	Parâmetros do fabricante (%)
KOH	87,1	90,00 mín
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,3	0,5 máx
KCl	0,010	0,015 máx
NaOH	0,45	1,00 máx

### 3.1.3. Silicatos

O silicato de sódio alcalino ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) e de potássio ( $\text{K}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) foram utilizados como materiais ativadores para fabricação das resinas geopoliméricas. Os silicatos foram fornecidos pela empresa Diatom Mineração Ltda. e as propriedades químicas e físicas fornecidas pelo fabricante são mostradas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Propriedades químicas e físicas do silicato de sódio alcalino e de potássio. Valores fornecidos pelo fabricante.

Especificações	Silicato de sódio alcalino	Parâmetros do fabricante ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )	Silicato de potássio	Parâmetros do fabricante ( $\text{K}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )
$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	15,17	14,50 - 15,30	-	-
$\text{K}_2\text{O}$ (%)	-	-	12,86	11,00 - 14,50
$\text{SiO}_2$ (%)	32,65	31,50 - 33,50	27,29	25,00 - 29,00
Relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (p/p)	2,15	2,15 - 2,20	-	-
Relação $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ (p/p)	-	-	2,10	1,90 - 2,25
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,576	1,56 - 1,58	1,39	1,37 - 1,41
Viscosidade (cP)	1.100	900 - 1.300	900	400 - 1.300
Sólidos totais (%)	47,82	46,50 - 48,50	40,25	36,00 - 43,50
Umidade (%)	-	-	59,75	56,5 - 64,00
Baumé 25°C (°Be)	53,00	52,00 - 53,00	40,60	39,00 - 42,00

### 3.1.4. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na fabricação das resinas geopoliméricas foi a areia normal brasileira na granulometria fina #100 e massa específica igual a 2,65

g/cm<sup>3</sup>. A produção e fornecimento deste material são atribuições do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), conforme estabelecido na NBR 7214 (ABNT, 2015).

Para a produção do substrato de concreto convencional (corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos) foi utilizada areia quartzosa de rio, lavada, com partículas menores do que 4,8 mm, seca em estufa a 110°C durante 24h. A massa específica foi igual a 2,58 g/cm<sup>3</sup>, a massa unitária 1,44 g/cm<sup>3</sup>, o módulo de finura 3,06 e classificada como areia média.

A composição granulométrica, conforme NBR-NM 248 (ABNT, 2003), é mostrada na Figura 3.10.



Figura 3.10: Curva granulométrica da areia.

### 3.1.5. Agregado graúdo

O agregado graúdo, proveniente de jazidas localizadas no Município de Campos dos Goytacazes-RJ, foi lavado durante o peneiramento e seco em estufa a 110°C por 24h. A massa específica foi igual a 2,78 g/cm<sup>3</sup>, a massa unitária 1,64 g/cm<sup>3</sup> e o diâmetro máximo 9,5 mm (brita zero). A composição granulométrica, conforme NBR-NM 248 (ABNT, 2003), é mostrada na Figura 3.11.

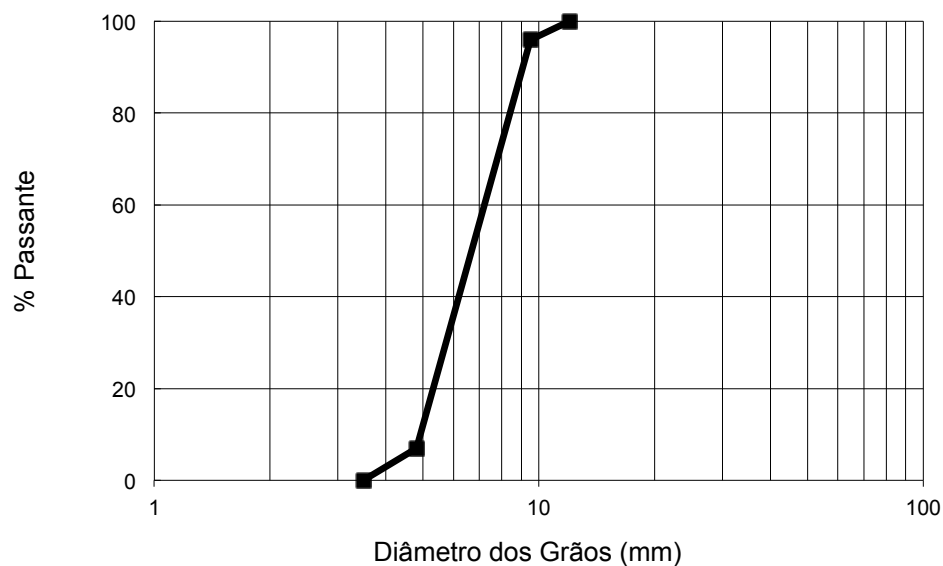


Figura 3.11: Curva granulométrica da brita.

### 3.1.6. Cimento Portland

Para a fabricação do concreto (corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos) para os ensaios mecânicos foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI Mizu. A Tabela 3.7 mostra as características químicas e físicas fornecidas pelo fabricante e os percentuais de óxidos obtidos pelo método de espectroscopia de fluorescência de raios X realizado em um equipamento Shimadzu EDX- 720 com tubo de 3 kW e alvo de ródio (Figura 3.3). O equipamento está disponível no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF.

### 3.1.7. Superplastificante

Para a fabricação do substrato de concreto à base de cimento Portland foi utilizado o superplastificante PLASTOL 5035 da Viapol. Este é um aditivo líquido, de pega normal, composto por policarboxilatos, sendo utilizado para melhorar a trabalhabilidade dos concretos mesmo com a redução de água de amassamento, sem alterar significativamente os tempos de pega e, conseqüentemente, garantindo elevados níveis de resistência mecânica.

Suas características técnicas são mostradas na Tabela 3.8.

Tabela 3.7: Composição química e propriedades físicas do CPV-ARI.

Especificações	Parâmetros do fabricante	Resultados dos ensaios	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
CaO (%)	-	75,27	
SiO <sub>2</sub> (%)	-	13,10	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	3,86	
SO <sub>3</sub> (%)	3,16	3,89	≤ 4,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	2,73	
K <sub>2</sub> O (%)	-	0,59	
TiO <sub>2</sub> (%)	-	0,32	
MnO (%)	-	0,11	
SrO(%)	-	0,13	
ZrO <sub>2</sub>	-	0,02	
Perda ao fogo (%)	4,27		≤ 4,5
Cal livre (%)	2,01		-
Resíduo insolúvel (%)	0,74		≤ 1,0
Área esp. (BLAINE, cm <sup>2</sup> /g)	4.350,96		≥ 3.000
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,06	3,06	2,8 - 3,2
Resíduo #200 (%)	0,61	-	≤ 8,0
Resíduo #325 (%)	3,42	-	-

Tabela 3.8: Características técnicas do aditivo PLASTOL 5035 (Viapol). Dados fornecidos pelo fabricante.

Características	Resultados
Base química	Solução policarboxilatos em meio aquoso
Ação principal	Aditivo superplastificante tipo SPI A
Ação secundária	Redutor de água de amassamento (A/C)
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho claro
Massa específica	≈ 1,06 g/cm <sup>3</sup>
pH	≈ 5,4
Teor de cloretos	Não contém adição de cloretos

### 3.1.8. Água

Água destilada foi utilizada na fabricação das resinas geopoliméricas para evitar possíveis contaminações e variações nas concentrações. Para os demais corpos-de-prova de concreto confeccionados com cimento Portland foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ.

### 3.1.9. Barras de aço

Para confecção dos corpos-de-prova prismáticos para os ensaios de tirante foram utilizadas barras de aço da ArcelorMittal do tipo CA-60 e CA-25, de acordo com as especificações da NBR 7480 (ABNT, 2007): barra nervurada do tipo CA-60, com diâmetro nominal de 4,2 mm, tensão de escoamento de 600 MPa e massa nominal de 0,109 kg/m; e barra lisa do tipo CA-25, com diâmetro nominal de 6,3 mm, tensão de escoamento de 250 MPa e massa nominal de 0,245 kg/m. As propriedades mecânicas das barras de aço, tais como tensão de escoamento ( $f_y$ ), deformação ( $\epsilon_y$ ) e módulo de elasticidade ( $E_s$ ) foram obtidas por meio do ensaio de tração direta. Para cada tipo de aço, três barras de 300 mm de comprimento foram testadas no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) em uma máquina de ensaios INSTRON 5582, com capacidade máxima de 100 kN e velocidade de deslocamento do travessão de 2 mm/min, seguindo as recomendações da NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2015). A Figura 3.12 mostra a execução do ensaio e o modo de ruptura dos corpos-de-prova.

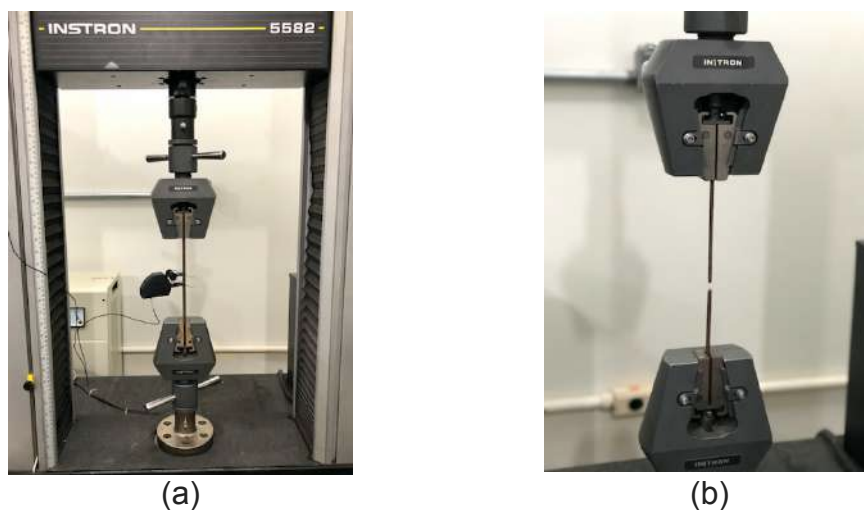


Figura 3.12: (a) Ensaio de tração direta de barra de aço instrumentada com *clip gage*; (b) barra de aço após a ruptura.

Os corpos-de-prova foram instrumentados com *clip gage* para medir as deformações durante a execução do ensaio de tração direta. As Figuras 3.13 e 3.14 mostram as curvas tensão *versus* deformação das barras de aço CA-60 e CA-25, respectivamente.

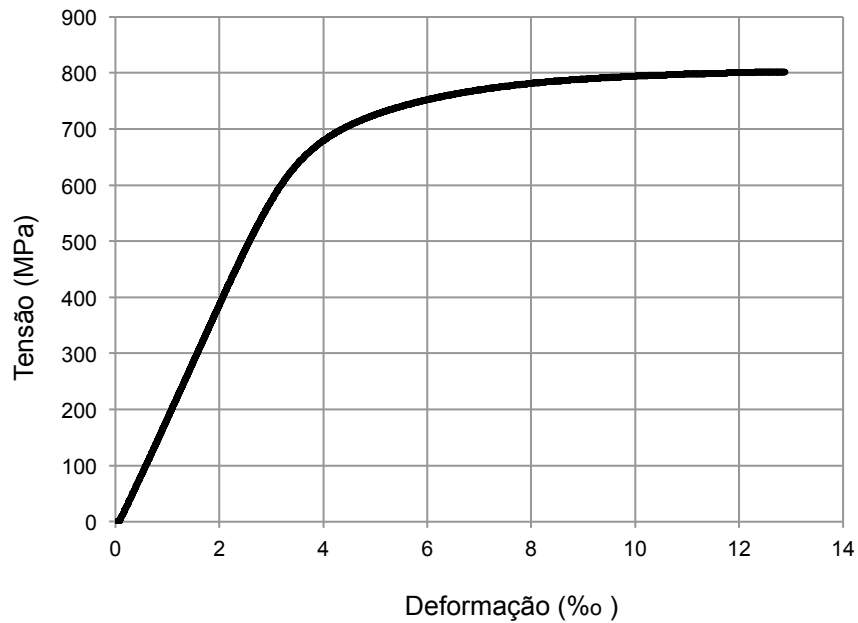


Figura 3.13: Curva tensão *versus* deformação para barra de aço nervurada tipo CA-60 (4,2mm).

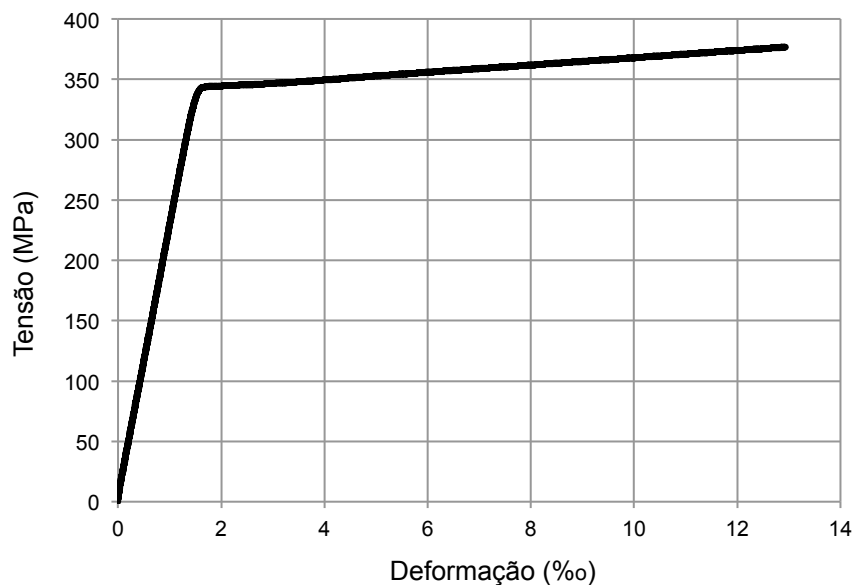


Figura 3.14. Curva tensão *versus* deformação para barra de aço lisa tipo CA-25 (6,3mm).

A tensão de escoamento das barras de aço foi obtida a partir da formação de um patamar no diagrama tensão *versus* deformação, como recomenda a NBR 7480 (ABNT, 2007). As propriedades físicas e mecânicas das barras de aço ensaiadas são mostradas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Propriedades físicas e mecânicas das barras de aço.

Barra de aço	$\phi$ (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (MPa)	$\varepsilon_y$ (‰)	$N_y$ (N)	$E_c$ (GPa)
Aço CA-25	6,3	31,17	342,35	1,56	10.671,05	219,7
Desvio padrão (MPa)			5,95	0,04	185,31	2,80
C.V.* (%)			1,74	2,56	1,74	1,28
Aço CA-60	4,2	13,85	750,98	5,50	10.401,07	210,15
Desvio padrão (MPa)			8,61	0,09	119,25	7,66
C.V.* (%)			1,15	1,73	1,15	3,64

C.V. = coeficiente de variação.

### 3.1.10. Chapas de aço

As chapas de aço carbono com 0,75 mm de espessura da classe SAE 1020 foram utilizadas nos ensaios de resistência de aderência por cisalhamento duplo em corpos-de-prova cúbicos e cisalhamento oblíquo (*slant shear test*) em corpos-de-prova prismáticos. Para estes ensaios as chapas foram cortadas nas dimensões de 50 mm x 50 mm e de 50 mm x 100 mm, respectivamente.

### 3.1.11. Resina epóxi comercial

Resina epóxi é um tipo de polímero termofixo que atinge o endurecimento, formando uma superfície sólida e rígida quando misturado com um agente catalisador. Existem vários tipos e marcas de resinas epóxi no mercado. Procurou-se uma resina que tivesse características e propriedades mecânicas próximas às das resinas geopoliméricas desse trabalho.

O produto escolhido foi o Viapoxi Adesivo. Segundo a ficha técnica fornecida pelo fabricante, é um adesivo bicomponente de base epóxi, de fluidez controlada, indicado para colagem de concreto e aço em reparos estruturais, juntas de concretagens, colagem de elementos pré-moldados, além de cerâmica, madeira e



alumínio. Na Tabela 3.10 são mostradas as características técnicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.10: Características técnicas do Viapoxi Adesivo. Dados fornecidos pelo fabricante.

Características	Especificações
Massa específica	1,60 g/cm <sup>3</sup>
Tempo para aplicação (23°C)	1 a 2h
<i>Pot-life</i>	2h
Cura inicial	24h
Cura final	7 dias
Resistência à compressão (1 dia)	40 MPa
Resistência à compressão (7 dias)	60 MPa
Temperatura de aplicação	5 - 35°C

### 3.2. Métodos

O estudo comparativo da resistência ao cisalhamento das resinas geopoliméricas e epóxi comercial tem por finalidade avaliar a possibilidade de aplicação das resinas geopoliméricas como adesivo em serviços de recuperação estrutural de vigas de concreto armado. Além das propriedades físicas e mecânicas, a aderência (substrato-aço-resina) é um parâmetro primariamente importante para analisar o desempenho da resistência ao cisalhamento.

Assim, foram formuladas quatro resinas geopoliméricas e caracterizadas as propriedades físicas e mecânicas das mesmas. Em seguida, foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento pelo método losipescu, por cisalhamento duplo, por cisalhamento por compressão axial (*slant shear test*) e tração por compressão diametral (*splitting test*). Por fim, ensaios de tração na flexão para substratos colados com as resinas e ensaios de tirantes foram realizados para avaliar a aderência das resinas ao substrato de concreto e ao aço, respectivamente.

#### 3.2.1. Dosagem do substrato de cimento Portland

A definição da proporção dos materiais que constituem o concreto é de grande importância e influenciam diretamente nas características da mistura, tanto

no seu estado fresco quanto no estado endurecido. Metha e Monteiro (1994) definem a dosagem como o processo de determinação da combinação ideal dos materiais componentes que irão produzir um concreto com propriedades desejadas e com o menor custo-benefício possível.

A dosagem utilizada foi proposta por França (2017), produzindo um concreto de resistência à compressão axial de aproximadamente 50 MPa aos 28 dias. As proporções são mostradas na Tabela 3.11 e foram definidas com a utilização do *software* BetonLab Pro3 desenvolvido por De Larrad (1999).

O concreto adotado apresenta propriedades físicas e valores de resistência mecânica acima daqueles usados em obras das regiões Norte e Noroeste Fluminense.

Tabela 3.11: Composição do concreto em kg/m<sup>3</sup> (FRANÇA, 2017).

Materiais	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CPV-ARI	511,60
Areia	719,77
Brita zero	905,20
Água	225,81
Superplastificante	1,47

Traço: (1:1,41:1,77:0,44); 0,3% aditivo

### **3.2.2. Produção do substrato de cimento Portland**

Para a confecção dos corpos-de-prova do concreto de cimento Portland foi utilizada a dosagem descrita no item 3.2.1, com os valores em peso. Para os ensaios de caracterização das amostras, foram moldados três cilindros de  $\phi$  100 mm x 200 mm para determinação da resistência à compressão, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), e três cilindros com as mesmas dimensões para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, seguindo as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011).

A consistência do concreto foi medida pelo ensaio de abatimento do troco de cone (abatimento de 80 mm – consistência plástica), de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

O concreto foi fabricado no Laboratório de Estruturas do LECIV em uma betoneira de capacidade igual a 145 litros, previamente umedecida (Figura 3.15). As misturas obedeceram a sequência abaixo:

- mistura de toda quantidade de cimento e brita, durante 1 minuto;
- durante um minuto é adicionada metade da água prevista com toda quantidade de superplastificante diluído;
- introdução de toda areia e da metade restante da água, durante 3 minutos;
- com a betoneira desligada, retira-se partes da mistura aderidas às paredes com uma colher de pedreiro;
- mistura durante mais um minuto.



(a)



(b)

Figura 3.15: Fabricação do concreto: (a) betoneira 145 litros; (b) molde para ensaio de abatimento do tronco de cone.

Ao final da mistura, o concreto foi colocado nos moldes cilíndricos para ensaios de caracterização e nos moldes prismáticos para os ensaios de aderência. O enchimento dos moldes foi feito em camadas adensadas em uma mesa vibratória durante 30 segundos. Após 24h, os corpos-de-prova de caracterização e de concreto foram desmoldados e curados durante 28 dias em tanques com água e cal. Os processos de moldagem, desmoldagem e cura de todos os corpos-de-prova foram executados seguindo as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016).

A Tabela 3.12 mostra os tipos de substrato de concreto convencional deste estudo, de acordo com suas características geométricas.

Tabela 3.12: Tipos de corpos-de-prova e respectivos ensaios.

Ensaio	Geometrias e dimensões dos corpos-de-prova
Ensaio de caracterização: resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade	Cilíndricos ( $\phi$ 100 mm x 200 mm)
Ensaio de resistência ao cisalhamento à tração por compressão diametral substrato-resina geopolimérica ( <i>splitting test</i> )	Semicilíndricos de ( $\phi$ 50 mm x 100 mm)
Ensaio de resistência ao cisalhamento duplo	Cúbicos (50 mm x 50 mm x 50 mm)
Ensaio de resistência de aderência em flexão a 3 pontos	Prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm)
Ensaio de resistência ao cisalhamento por compressão axial ( <i>slant shear test</i> )	Prismáticos com uma das faces inclinada a 60°

### 3.2.3. Rugosidade do substrato

Os blocos cúbicos para os ensaios de cisalhamento duplo, os blocos prismáticos para os ensaios de cisalhamento por compressão axial (*slant shear test*) e os corpos-de-prova cilíndricos para os ensaios de tração por compressão diametral (*splitting test*) receberam em suas faces as resinas geopoliméricas e epóxi comercial, conforme as exigências de cada método. As superfícies do substrato foram lixadas e limpas de forma que ficassem com rugosidades semelhantes. As superfícies, após receberem tratamento, foram inspecionadas e analisadas por meio do uso de um rugosímetro, adaptado com um sensor de deslocamento do tipo *high performance distance*, modelo CP35MHT80 Wenglor, e a aquisição de dados feita pelo *software* labVIEW (Figura 3.16).

### 3.2.4. Dosagem das resinas geopoliméricas

Um dos objetivos iniciais deste trabalho foi a produção de quatro resinas geopoliméricas que apresentassem propriedades adesivas e mecânicas adequadas para recuperação de estruturas de concreto armado. Mazza (2010) e França (2017) obtiveram bons resultados em reparos feitos com argamassas geopoliméricas em elementos estruturais de concreto simples. Rocha (2017) realizou estudos sobre o comportamento de argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos

quando submetidas a elevadas temperaturas. As dosagens elaboradas no presente estudo alcançaram resistências à compressão axial da ordem de 80 MPa, ou seja, superiores aos trabalhos citados.

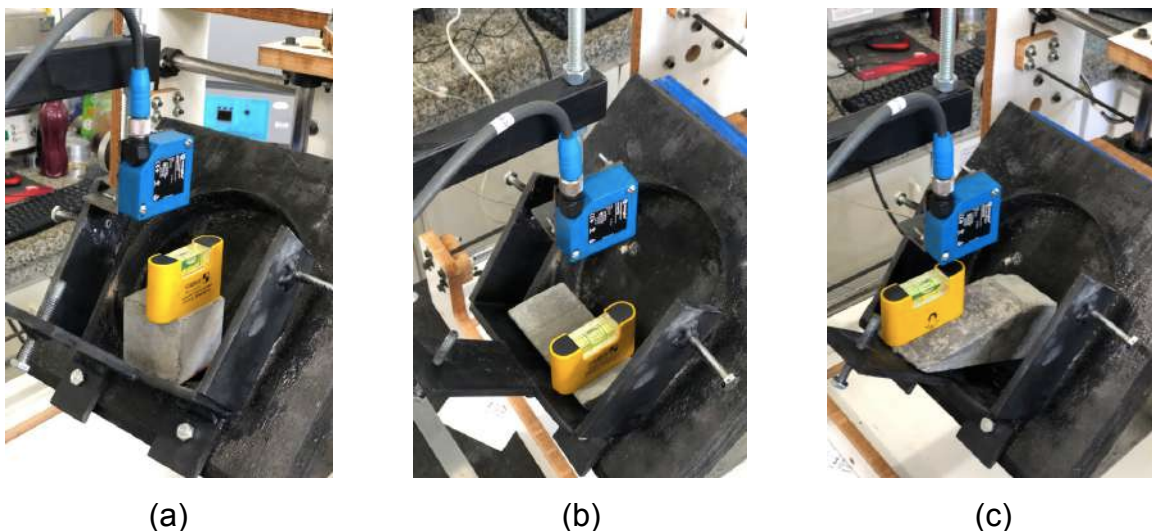


Figura 3.16: Ensaio de rugosidade das amostras: (a) bloco cúbico; (b) corpo-de-prova semicilíndrico; (c) bloco prismático com uma das faces inclinada a 60°.

Nesta etapa, quatro tipos de dosagens foram avaliadas, visando produzir resinas geopoliméricas com elevada resistência mecânica e com boa capacidade aderente. As resinas geopoliméricas foram fabricadas pela combinação de silicatos (s) e hidróxidos (h) e são mostradas na Tabela 3.13. Todas as resinas foram fabricadas utilizando como precursor o metacaulim comercial e como agregado miúdo a areia #100 (granulometria fina padronizada e fornecida pelo IPT). Para todas as dosagens, a relação em massa entre o precursor e o agregado miúdo foi de 1:0,75. As dosagens foram avaliadas por meio da resistência à compressão axial obtidas pela variação das razões molares das matérias-primas, de acordo com dados presentes na literatura nacional e internacional. A resistência à compressão axial foi determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

A dosagem adotada foi adaptada dos trabalhos de Dias (2001) e Rocha (2017), que utilizaram composições dadas pela Equação 3.2.

$$S : \text{areia} : L/S \quad (3.2)$$

sendo,

- S (sólidos): somatório de metacaulim + NaOH ou KOH + parte sólida do  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ou do  $\text{K}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ;

- L (líquido): somatório de H<sub>2</sub>O de amassamento + parte líquida do Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O ou do K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O;
- areia: é um número que corresponde à relação entre a quantidade de areia e a quantidade do parâmetro S.

Tabela 3.13: Nomenclatura das resinas geopoliméricas e componentes

Resinas (*)	Silicato	Hidróxido
s.S - h.S	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	NaOH
s.S - h.P	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	KOH
s.P - h.S	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	NaOH
s.P - h.P	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	KOH

(\*) s.S - silicato de sódio alcalino; s.P - silicato de potássio;

(\*) h.S - hidróxido de sódio; h.P - hidróxido de potássio.

### 3.2.5. Produção das resinas geopoliméricas

As quatro resinas geopoliméricas foram fabricadas de acordo com as seguintes etapas: pesagem do metacaulim com a areia, produção da solução ativadora alcalina e mistura dos constituintes sólidos à solução ativadora. A produção da solução ativadora alcalina e a pesagem do metacaulim com a areia foram realizadas 24h antes da moldagem, obedecendo a sequência abaixo:

- pesagem da água destilada (Figura 3.17a);
- pesagem do hidróxido de sódio ou potássio, adicionando-se à água e misturando em um agitador magnético durante 2 minutos (Figura 3.17b);
- por fim, o silicato de sódio alcalino ou de potássio foi adicionado e misturado durante 3 minutos com auxílio do agitador magnético (Figura 3.17c);
- Pesagem e mistura do metacaulim com a areia fina #100 padronizada pelo IPT (Figura 3.17d) até atingir homogeneidade.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.17: (a) pesagem da água destilada; (b) água misturada com hidróxido de sódio ou potássio; (c) pesagem do silicato de sódio alcalino ou potássio na mistura prévia; (d) pesagem do metacaulim com a areia fina.

A etapa seguinte foi a produção das resinas geopoliméricas por meio da mistura dos constituintes sólidos à solução ativadora alcalina em uma argamassadeira com capacidade de 5 litros da SOLOTEST, modelo GC15 - 5CV. A sequência de preparo foi:

- a solução ativadora alcalina foi colocada na cuba da argamassadeira e em seguida adicionou-se o metacaulim com a areia já homogeneizados, misturando-se durante 1 minuto e meio em velocidade baixa (Figuras 3.18a e 3.18b);
- a argamassadeira é desligada e com o auxílio de uma espátula metálica foram retirados os materiais presos às paredes do recipiente e à paleta (Figura 3.18c);

- o misturador foi religado e a mistura foi realizada por mais quatro minutos em velocidade alta (Figura 3.18d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.18: Produção das resinas geopoliméricas: (a) materiais após a pesagem; (b) solução ativadora alcalina; (c) retirada dos materiais presos à parede do recipiente e à paleta; (d) mistura final dos materiais.

### 3.2.6. Produção da resina epóxi comercial

A resina epóxi comercial foi preparada conforme as instruções do fabricante. A primeira recomendação é que a superfície de aplicação (substrato) já esteja preparada antes do início da mistura do produto.

Os componentes A e B devem ser pré-misturados separadamente. Em seguida, todo o conteúdo do componente B (endurecedor) foi adicionado ao recipiente do componente A. A mistura foi realizada por meio do uso de uma espátula metálica por no mínimo 3 minutos, até se obter um material homogêneo e sem grumos (Figura 3.19).



O fabricante também recomenda que a ficha técnica FISPQ do produto seja consultada antes do início dos trabalhos, além do uso de todos os equipamentos de segurança individual necessários.



(a)



(b)

Figura 3.19: Resina Viapoxi Adesivo. (a) componentes A e B antes da mistura; (b) preparo da resina epóxi comercial.

### **3.2.7. Ensaios no estado fresco**

O desempenho das resinas, argamassas e concretos depende de suas características no estado plástico e, conseqüentemente, no estado endurecido. Para caracterização das resinas geopoliméricas foram utilizados os procedimentos estabelecidos nas normas para argamassas de cimento Portland e que são descritos nos itens a seguir. Isso se deve ao fato de os cimentos geopoliméricos ainda não possuírem procedimentos e normas específicas para sua classificação quanto às propriedades nos estados fresco e endurecido.

#### **3.2.7.1. Densidade de massa aparente**

A densidade de massa no estado fresco foi determinada segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Um recipiente metálico, da SOLOTEST, com 400 cm<sup>3</sup> de volume foi utilizado. A mistura dos constituintes das resinas geopoliméricas seguiu as etapas descritas no item 3.2.5. O recipiente metálico padronizado foi preenchido pela resina em 3 camadas de altura aproximadamente iguais, aplicando-se 20 golpes em cada

camada. Na mesa de adensamento (*flow-table*) efetuou-se 3 quedas do recipiente. Por fim, a superfície do recipiente foi regularizada com régua metálica e, então, sua massa ( $m_c$ ) foi medida. A densidade de massa no estado fresco foi calculada pela Equação 3.3.

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \quad (3.3)$$

sendo,

$d$  = densidade de massa da argamassa no estado fresco, em  $\text{g/cm}^3$ ;

$m_c$  = massa do recipiente contendo a argamassa, em g;

$m_v$  = massa do recipiente vazio, em g;

$V_r$  = volume do recipiente, em  $\text{cm}^3$ .

#### 3.2.7.2. Retenção de água

É uma das propriedades do material em seu estado fresco que está ligada à capacidade de manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, quer seja pela evaporação ou pela absorção de água pelo substrato. A retenção de água também afeta as propriedades do material no estado endurecido, como a aderência, a resistência mecânica e a durabilidade (CARASEK, 2010).

A determinação da retenção de água das resinas geopoliméricas é descrita pela NBR 13277 (ABNT, 2005) e o procedimento de mistura dos constituintes obedeceu ao item 3.2.5.

Para a realização do ensaio utilizou-se um funil de Buchner modificado com abertura de 200 mm acoplado a uma bomba de vácuo (Figura 3.20). Um prato com um disco de papel umedecido foi colocado sobre o funil para garantir a estanqueidade.

Com a torneira fechada, a bomba de vácuo foi acionada de forma que uma sucção de 51 mm de mercúrio fosse aplicada ao sistema. Em seguida, a torneira foi aberta por 90 segundos para retirada do excesso de água do papel filtro e, logo após, foi fechada. A massa do conjunto prato-papel filtro úmido foi registrada ( $m_v$ ).

O prato foi preenchido com a resina e adensada manualmente com 37 golpes de soquete padrão, sendo 16 golpes aplicados junto à borda e 21 golpes em pontos

distribuídos na parte central da amostra, garantindo o preenchimento uniforme do prato. O excesso de material foi retirado com o uso da régua metálica com movimentos do centro do prato para a borda. A massa do conjunto com a resina rasada foi registrada ( $m_a$ ).

A torneira foi aberta novamente para aplicar à amostra uma sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos e fechada em seguida. Após esse procedimento, o prato é retirado do funil e a massa do conjunto é pesada ( $m_s$ ).

A retenção de água ( $R_a$ ) é calculada por meio das Equações 3.4 e 3.5.

$$Ra = 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)} \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (3.5)$$

sendo,

$m_a$  a massa do conjunto com argamassa, em g;

$m_s$  a massa do conjunto após a sucção, em g;

$m_v$  a massa do conjunto vazio, em g;

$AF$  a relação água/resina fresca;

$m_w$  a massa total de água acrescentada à mistura, em g;

$m$  a soma das massas dos componentes anidros da resina, em g.



Figura 3.20: Ensaio de retenção de água em resinas geopoliméricas.

### 3.2.7.3. Trabalhabilidade das resinas

A trabalhabilidade das resinas geopoliméricas foi determinada pelos métodos de índice de consistência *flow-table* e pelo método *squeeze-flow*. O procedimento experimental dos métodos são descritos nos itens a seguir:

- *Índice de consistência flow-table*

O índice de consistência *flow-table* foi realizado com as resinas geopoliméricas ainda em seu estado fresco e foi determinado pelos procedimentos estabelecidos pela NBR 13276 (ABNT, 2016). A mistura dos materiais foi realizada conforme descrito no item 3.2.5. A mesa de adensamento e os dispositivos utilizados foram da SOLOTEST (Figura 3.21).

- *Índice de consistência squeeze-flow*

O ensaio de consistência pelo método do *squeeze-flow* foi realizado com as resinas em seu estado fresco. A NBR 15839 (ABNT, 2010) define as especificações do método. A produção das resinas geopoliméricas seguiu o item 3.2.5. Para a realização do ensaio foi utilizada uma máquina universal EMIC (Figura 3.22), uma base inferior rígida de aço inox para apoiar a resina geopolimérica e outra base superior rígida de aço inox para aplicação da carga.

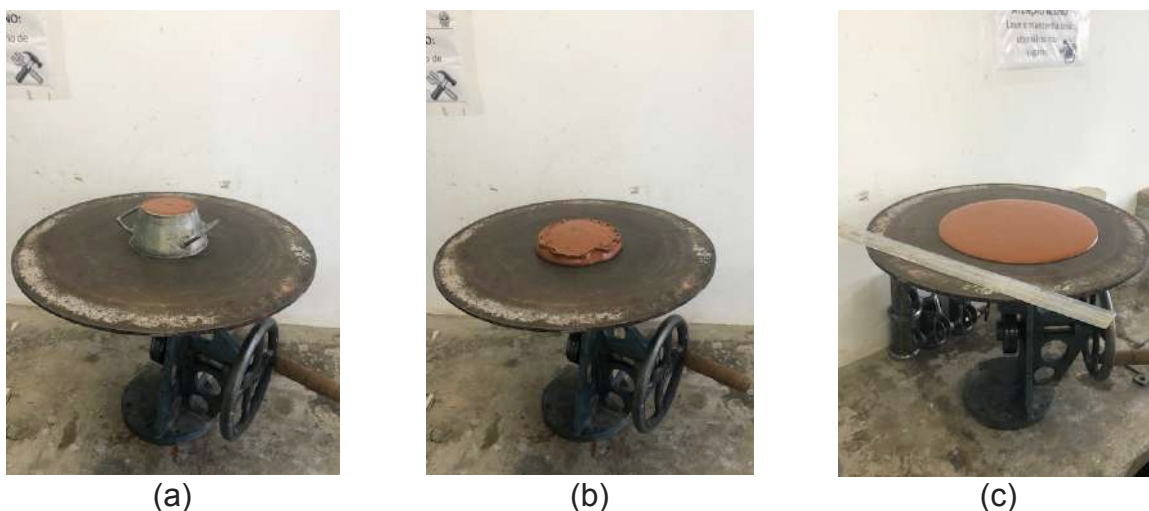


Figura 3.21: Ensaio de índice de consistência *flow-table*: (a) resina moldada no tronco de cone; (b) retirada do tronco de cone; (c) espalhamento da resina sobre a mesa de consistência após execução dos golpes.

Um anel de alumínio com 100 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura foi usado para a moldagem sobre a base inferior. O ensaio foi realizado para as velocidades de deslocamento de 0,1 mm/s e 0,3 mm/s, em corpos-de-prova diferentes. O final do ensaio ocorre quando a carga máxima aplicada atingir 1 kN ou o deslocamento de punção chegar a 9 mm.

Os dados de tempo, carga e deslocamento foram registrados por um *software* de aquisição de dados Tesc acoplado ao equipamento.

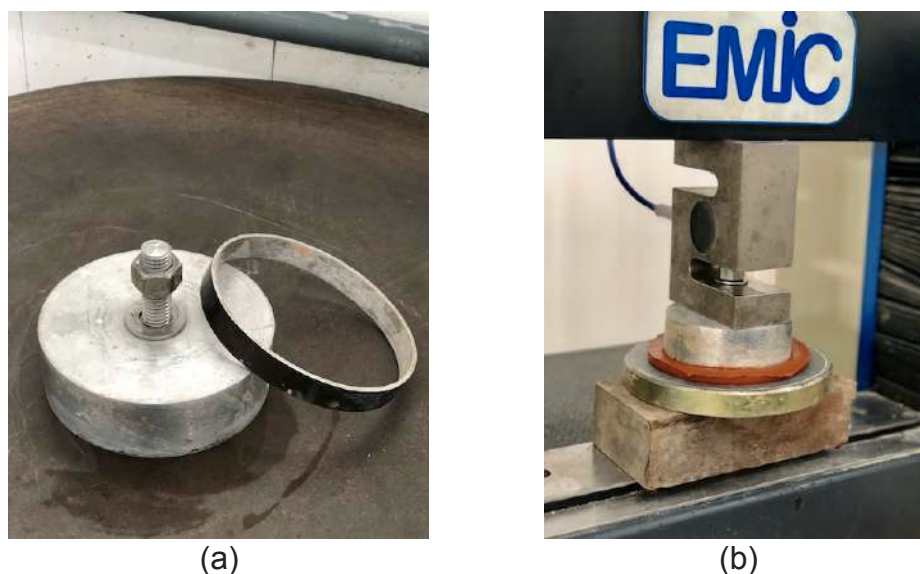


Figura 3.22: Ensaio de consistência método *squeeze-flow*: (a) dispositivos para realização do ensaio; (b) execução do ensaio em máquina universal.

#### 3.2.7.4. Tempos de início e fim de pega das resinas geopoliméricas

A partir do instante em que a água entra em contato com algum material cimentício, ocorrem reações químicas e, conseqüentemente, um gradativo aumento de viscosidade e enrijecimento da pasta. Os cimentos geopoliméricos ainda não possuem normas específicas para a determinação deste parâmetro. Assim, a NBR 16607 (ABNT, 2017) que estabelece requisitos para a determinação dos tempos de início e fim de pega para cimento Portland foi utilizada.

O procedimento de ensaio consistiu inicialmente na preparação das resinas geopoliméricas de acordo com o item 3.2.5. Em seguida, o enchimento dos moldes foi realizado seguindo as prescrições da NBR 16606 (ABNT, 2017). Em condições normalizadas de ensaio, determinou-se o tempo de início de pega pelo intervalo transcorrido desde a adição da solução ativadora alcalina ao metacaulim até momento que a agulha de Vicat penetrou na pasta a uma distância de  $4 \pm 1$  mm em

relação à placa base. Já o tempo de fim de pega foi tomado pelo intervalo de tempo transcorrido desde a adição da solução ativadora alcalina ao metacaulim até o momento em que a agulha de Vicat penetrou 0,5 mm na pasta.

Silva (2000), Torgal (2007) e Mazza (2010) ressaltam que os materiais geopoliméricos possuem tempos de pega relativamente mais rápidos do que as pastas de cimento Portland com consistência normal. Dessa forma, as leituras durante o ensaio de determinação dos tempos de início e fim de pega foram realizados em intervalos de 10 minutos nos primeiros 30 minutos de ensaio e depois desse período as leituras foram realizadas a cada 5 minutos até o fim do experimento.

### **3.2.8. Ensaios no estado endurecido**

#### **3.2.8.1. Densidade de massa aparente**

A densidade de massa aparente no estado endurecido das resinas geopoliméricas foi determinada segundo as prescrições da NBR 13280 (ABNT, 2005).

Para cada resina geopolimérica foram moldados três corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura, comprimento), seguindo o procedimento de mistura dos constituintes descrito no item 3.2.5 (Figura 3.23). A moldagem ocorreu em duas camadas, em que cada uma recebeu trinta quedas na mesa de adensamento. Os corpos-de-prova foram ensaiados aos 28 dias.



Figura 3.23: Corpos-de-prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm).

Com auxílio de um paquímetro foram medidas as dimensões dos corpos-de-prova em várias posições. A massa ( $m$ ) foi determinada em uma balança com resolução de 0,1 g. A densidade de massa aparente no estado endurecido foi, então, calculada por meio da Equação 3.6.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{h.l.c} \cdot 1000 \quad (3.6)$$

sendo,

$\rho_{ap}$  a densidade de massa aparente no estado endurecido, em kg/m<sup>3</sup>;

$m$  a média das massas dos corpos-de-prova, em g;

$h.l.c$  o volume médio dos corpos-de-prova, em cm<sup>3</sup>, calculado a partir das medidas da altura, largura e comprimento.

### 3.2.8.2. Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade das resinas geopoliméricas no estado endurecido é descrito na NBR 15259 (ABNT, 2005).

Foram moldados três corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura, comprimento) para cada resina geopolimérica, seguindo o procedimento de mistura dos constituintes descrito no item 3.2.5. O preenchimento dos moldes ocorreu em duas camadas, que receberam trinta quedas por camada na mesa de adensamento. Os corpos-de-prova foram ensaiados aos 28 dias.

A massa inicial ( $m_0$ ) de cada corpo-de-prova foi aferida em uma balança (precisão 0,01 g) após as superfícies dos corpos-de-prova serem lixadas e limpas com pincel de cerdas de náilon. Em seguida, os corpos-de-prova prismáticos foram colocados em um recipiente com água com a face quadrada sobre um suporte de borracha de etil vinil acetato (E.V.A), evitando a molhagem de outras superfícies. O nível de água no recipiente de ensaio foi mantido constante ( $5 \pm 1$  mm) acima da face do corpo-de-prova em contato com a água. A execução do ensaio é mostrada na Figura 3.24.

Após a colocação dos corpos-de-prova em contato com a água, determinou-se a massa, em gramas, aos 10 minutos ( $m_{10}$ ) e aos 90 minutos ( $m_{90}$ ). Todos

corpos-de-prova foram previamente secos com pano úmido antes de cada pesagem. A absorção de água por capilaridade, para cada tempo, foi calculada de acordo com a Equação 3.7.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (3.7)$$

sendo,

$A_t$  a absorção de água por capilaridade para cada tempo, em  $\text{g}/\text{cm}^2$ ;

$m_t$  a massa do corpo-de-prova em cada tempo (10 min ou 90 min), em g;

$m_0$  a massa inicial do corpo-de-prova, em g;

A NBR 15259 (ABNT, 2005) define o coeficiente de capilaridade ( $C$ ), por aproximação, como o valor médio das diferenças das massas de cada corpo-de-prova nos tempos de 10 e 90 minutos. A Equação 3.8 é utilizada para calcular o coeficiente de capilaridade para cada amostra.

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (3.8)$$

Sendo,

$C$  o coeficiente de capilaridade, em  $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ .

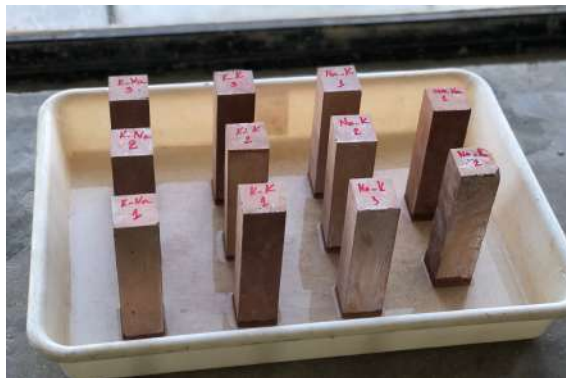


Figura 3.24: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

### 3.2.8.3. Absorção de água por imersão e porosidade aparente

A absorção de água por imersão e a porosidade aparente das resinas geopoliméricas no estado endurecido foi determinada de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2009). A absorção de água por imersão é o procedimento que faz



com que a água seja conduzida para os poros permeáveis de determinado corpo poroso, com o objetivo de preenchê-los. Já a porosidade aparente ou índice de vazios corresponde à relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

Para realização do ensaio foram moldados e curados três corpos-de-prova prismáticos de acordo com a NBR 5738 (ABNT 2016). Após 28 dias de cura em temperatura ambiente, os corpos-de-prova foram colocados na estufa por um período de 72h a uma temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , para registro de suas massas secas ( $m_s$ ). Em seguida, para se obter a saturação, as amostras foram imersas em água a uma temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e mantidas assim durante 72h. Logo após esse período, as amostras foram levadas à fervura gradual durante 5h e, terminada a etapa, determinou-se a massa com auxílio de balança hidrostática ( $m_i$ ). Por fim, retirou-se as amostras da água e aferiu-se novamente suas massas ( $m_{sat}$ ).

A absorção ( $A$ ) e a porosidade ( $P$ ), em porcentagem, é calculada pelas Equações 3.9 e 3.10.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (3.9)$$

$$P = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (3.10)$$

sendo,

$m_{sat}$  a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura, em g;

$m_s$  a massa da amostra seca em estufa, em g;

$m_i$  a massa da amostra saturada imersa em água após fervura, em g.

#### 3.2.8.4. Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral foram realizados, respectivamente, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) e a NBR 7222 (ABNT, 2011) para o substrato de concreto de cimento Portland e para as quatro resinas geopoliméricas, com o objetivo de caracterizar e avaliar o ganho de resistência mecânica ao longo do tempo. Todas as amostras

foram ensaiadas em uma prensa hidráulica SOLOTEST com capacidade de 1000 kN e velocidade de carregamento de 0,30 MPa/s.

Para o substrato de cimento Portland foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos de  $\phi$  100 mm x 200 mm para as idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Já para as resinas geopoliméricas foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos de  $\phi$  50 mm x 100 mm para as idades de 1, 3, 14, 28 e 90 dias. A média dos valores foi obtida para os dois tipos de material. Na idade de 28 dias também foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos de  $\phi$  50 mm x 100 mm para as resinas geopoliméricas e de  $\phi$  100 mm x 200 mm para o substrato para a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Durante a realização do ensaio de resistência à compressão axial, a carga aplicada foi distribuída de maneira uniforme sobre as superfícies dos corpos-de-prova. Foram utilizados nos ensaios discos de neoprene de dureza shore 70 com 52 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, confinados em pratos metálicos, dispostos em cada face dos corpos-de-prova, como mostra a Figura 3.25a. Esse sistema é utilizado como tratamento superficial em corpos-de-prova e segue as prescrições da norma ASTM C 1231 (2000). Para os corpos-de-prova de substrato foi realizado um tratamento nas duas faces em uma retificadora horizontal pneumática de cilindros Werk-Schott (Figura 3.25b).



(a)



(b)

Figura 3.25: (a) Corpos-de-prova de resinas geopoliméricas com discos de neoprene; (b) retificadora para faceamento em corpos-de-prova de concreto.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado de acordo com a configuração apresentada na Figura 3.26.

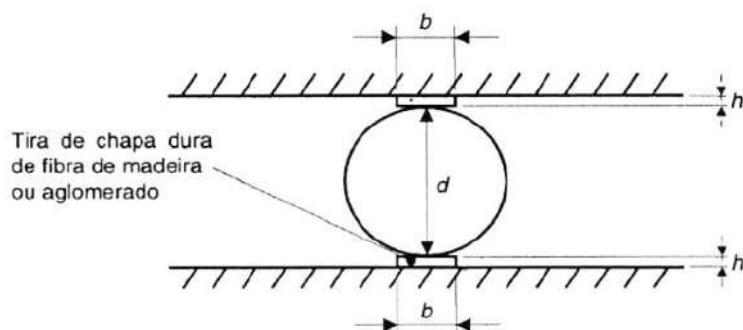


Figura 3.26: Posicionamento do corpo-de-prova cilíndrico para o ensaio de tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011).

sendo,

$d$  = diâmetro do corpo-de-prova, em mm;

$b = (0,15 \pm 0,01) \cdot d$ , em mm;

$h = (3,5 \pm 0,5)$ , em mm.

A Equação 2.6 foi empregada para o cálculo dos valores de resistência à tração por compressão diametral.

#### 3.2.8.5. Módulo de elasticidade longitudinal, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson

A NBR 8522 (ABNT, 2017) estabelece os procedimentos para a determinação do módulo de elasticidade do substrato convencional e das resinas geopoliméricas, aos 28 dias. Também foi possível obter os valores de coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento para cada material. Os resultados foram obtidos por meio do ensaio de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

As deformações dos três corpos-de-prova cilíndricos de  $\phi$  100 mm x 200 mm de substrato de cimento Portland foram obtidas em uma máquina Controls de capacidade máxima de 2000 kN (Figura 3.27). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da PUC-Rio.



(a)



(b)

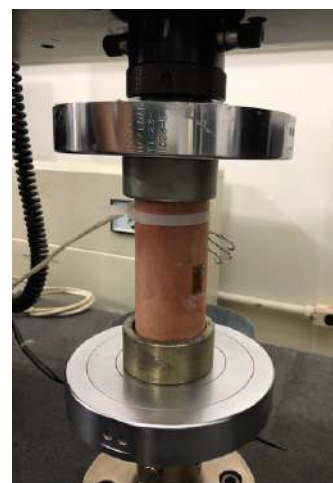
Figura 3.27: Ensaio de compressão axial: (a) leitura das deformações na máquina Controls; (b) corpo-de-prova após ruptura.

Para determinar as deformações das quatro resinas geopoliméricas foram utilizados dois extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) colados nas superfícies dos corpos-de-prova cilíndricos de  $\phi$  50 mm x 100 mm, diametralmente opostos. Este tipo de medidor afere as deformações axiais e laterais. Os *strain gages* utilizados eram da Excel Sensores, do tipo roseta dupla 90°, modelo PA-06-250TG-120L com resistência elétrica de 120 ohms e autocompensação de temperatura compatível ao coeficiente de dilatação do concreto.

Duas amostras para cada resina foram ensaiadas em uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 5582, com capacidade de 100 kN e velocidade de carregamento de 0,5 mm/min (Figura 3.28). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais Avançados da UENF (LMAV).



(a)



(b)

Figura 3.28: (a) Corpo-de-prova instrumentado; (b) ensaio de compressão axial na máquina INSTRON 5582.

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal e também do coeficiente de Poisson, os corpos-de-prova foram ensaiados somente no regime elástico, que corresponde a 40% da carga de ruptura.

A NBR 8522 (ABNT, 2008) estabelece as seguintes equações para o cálculo do módulo de elasticidade (Equação 3.11), do coeficiente de Poisson (Equação 3.12) e do módulo de cisalhamento (Equação 3.13):

$$E_c = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \text{ (GPa)} \quad (3.11)$$

sendo,

$\sigma_b$  a tensão máxima, em MPa,  $\sigma = 0,3 \cdot f_c$  ou outra tensão especificada;

$\sigma_a$  a tensão básica correspondente à deformação específica de  $50 \cdot 10^{-6}$ , em MPa;

$\varepsilon_b$  a deformação média específica dos corpos-de-prova sob a tensão máxima.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (3.12)$$

sendo,

$\varepsilon_x$  a deformação transversal;

$\varepsilon_y$  a deformação longitudinal.

$$G = \frac{E_c}{2(1 + \nu)} \quad (3.13)$$

sendo,

$G$  o módulo de cisalhamento, em GPa;

$\nu$  o coeficiente de Poisson;

$E_c$  módulo de elasticidade longitudinal, em GPa.

#### 3.2.8.6. Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão são normatizados pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram confeccionados três corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura, comprimento) para as

resinas geopoliméricas, seguindo os procedimentos de mistura do item 3.2.5 e de moldagem do item 3.2.8.1.

Os corpos-de-prova foram ensaiados, tanto à flexão quanto à compressão, aos 28 dias. Para a determinação da resistência à tração na flexão utilizou-se uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV/UENF) com capacidade de 30 kN e velocidade de carregamento de  $50 \pm 10$  N/s até a ruptura. Já para a resistência à compressão axial foram utilizadas as metades dos corpos-de-prova do ensaio de tração na flexão e os resultados foram obtidos com a utilização de uma prensa universal Shimadzu modelo UH, com capacidade máxima de 500 kN e velocidade de carregamento igual a 0,5 mm/min. Os ensaios foram realizados em máquinas diferentes, pois o *set up* disponível para realizar o ensaio de resistência à tração na flexão estava equipado em uma prensa com capacidade reduzida e não teria capacidade de romper os corpos-de-prova à compressão.

A Figura 3.29 mostra o corpo-de-prova posicionado nos dispositivos de apoio para a execução dos ensaios.

A resistência à tração na flexão e a resistência à compressão axial foram calculadas segundo a Equação 2.11 e 2.12 (capítulo 2).



Figura 3.29: Ensaios mecânicos em corpos-de-prova prismáticos: (a) ensaio à tração na flexão; (b) ensaio à compressão axial.

#### 3.2.8.7. Resistência ao cisalhamento pelo método losipescu

O método losipescu (V-Notched) foi utilizado para determinação da resistência e do módulo de cisalhamento das resinas geopoliméricas e da resina

epóxi comercial. A execução do ensaio obedeceu as recomendações da norma ASTM D 5379M/05 (1998).

As amostras das resinas em formato de tiras planas retangulares com dois entalhes em V possuíam dimensões de 76 mm x 20 mm x 8 mm (comprimento, largura e altura), como mostra a Figura 3.30. Foram confeccionados cinco corpos-de-prova para cada tipo de resina em moldes específicos de acrílico e a ruptura ocorreu aos 28 dias. As bordas superior e inferior do molde foram usinadas para serem planas, paralelas entre si e perpendiculares às faces da amostra, a fim de evitar momentos e torções fora do plano de ruptura quando da aplicação da carga.

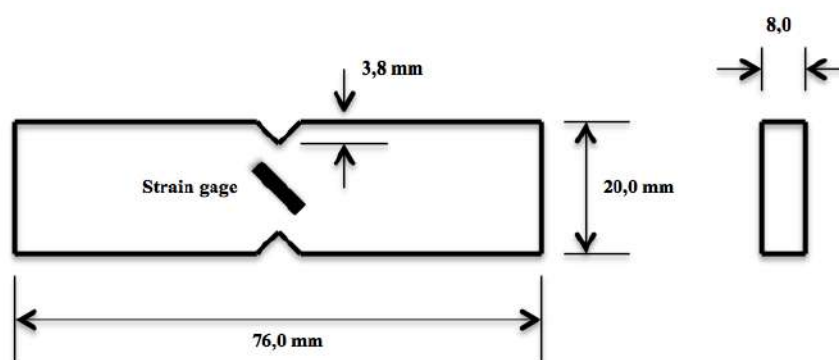


Figura 3.30: Dimensões dos corpos-de-prova para o ensaio losipescu V-Notched.

Os corpos-de-prova de prova foram instrumentados com apenas um *strain gage* da Excel Sensores modelo PA-06-125BA-120-L a 45° em relação ao eixo de carregamento e no eixo de simetria.

O método de elementos finitos foi usado para simular o comportamento dos corpos-de-prova no ensaio losipescu e um *software* comercial (ADINA Structures) foi usado posteriormente para realização das análises. Dada a natureza não simétrica da carga/fixação, foi adotada modelagem do corpo-de-prova por inteiro. Foram impostas 16 superfícies, 8 de cada lado do eixo do entalhe. A malha para este modelo foi refinada progressivamente para cada uma das superfícies, e as regiões próximas aos entalhes foram mais refinadas ainda. A convergência foi alcançada usando 24176 elementos 2D sólidos, de deformação plana, contendo 96551 nós (Figura 3.31).

A ASTM D 5379M/05 (1998) indica a colagem de *strain gage* uniaxial a  $\pm 45^\circ$  em cada face do corpo-de-prova, mas essa solução é voltada para materiais compósitos, em que as direções são importantes. Nesse caso, o material estudado (geopolímero) foi considerado homogêneo e isotrópico, o que tornou redundante a

medição de uma segunda deformação. Portanto, este trabalho optou pelo uso de um único extensômetro em somente uma das faces dos corpos-de-prova.

A ASTM D 5379M/05 (1998) ainda recomenda o uso de um extensômetro de tamanho mínimo, dada a natureza do material estudado, ou seja, compósito. O objetivo é minimizar o gradiente capturado pela grade do *strain gage*. A simulação por elementos finitos considerando as resinas como um material elástico, homogêneo e isotrópico também mostrou que existe uma área em que o valor de cisalhamento é constante, em forma aproximada de diamante, tocando os vértices dos entalhes e com largura de cerca de 12 mm. Essa região de cisalhamento pôde facilmente alocar o extensômetro usado neste trabalho.

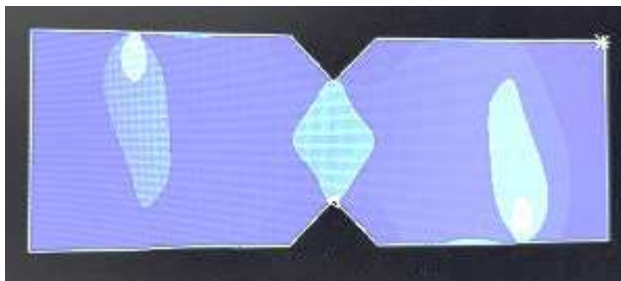
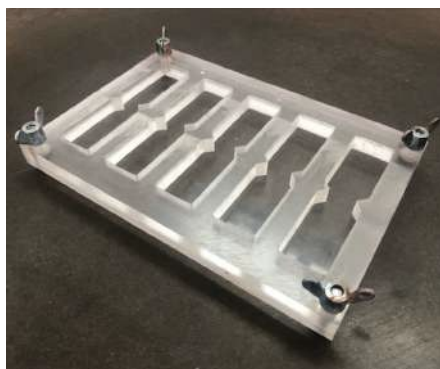


Figura 3.31: Distribuição de tensões na face do corpo-de-prova no ensaio losipescu, obtida por meio do uso do método de elementos finitos.

Os detalhes da fabricação dos corpos-de-prova e da realização do ensaio losipescu são mostrados na Figura 3.32.

Os corpos-de-prova foram posicionados em dispositivos específicos para o ensaio, com o entalhe localizado ao longo da linha de ação do carregamento. Os ensaios foram realizados no LAMAV/UENF em uma máquina de ensaio INSTRON 5582, com capacidade de 100 kN e velocidade de deslocamento do travessão de 2 mm/min. Durante a execução do ensaio, as duas metades do dispositivo eram comprimidas, enquanto a carga e a deformação foram registradas em resposta ao cisalhamento provocado no sistema. As leituras foram feitas simultaneamente por meio do sistema de aquisição de dados da própria máquina de ensaio e de um transdutor de deformação modelo P3 da VISHAY.

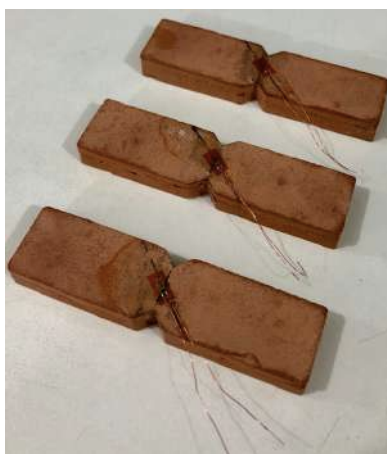




(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.32: (a) Molde de acrílico; (b) corpos-de-prova de resinas geopoliméricas e de resina epóxi comercial; (c) amostras instrumentadas com extensômetros; (d) ensaio de resistência ao cisalhamento losipescu V-Notched.

#### 3.2.8.8. Resistência por cisalhamento duplo

Um procedimento alternativo simplificado foi utilizado para avaliar a resistência ao cisalhamento entre as resinas geopoliméricas ou resina epóxi comercial, o substrato e o aço.

O ensaio consiste em um ensaio de cisalhamento duplo de corpos-de-prova fabricados com três cubos de substrato de concreto de cimento Portland. Os cubos têm arestas de 50 mm e foram colados conforme duas situações a serem avaliadas, a saber:

- faces dos cubos de substrato coladas entre si com as resinas geopoliméricas ou com a resina epóxi comercial (Figura 3.33a);
- faces dos cubos de substrato e chapa de aço colados entre si com as resinas geopoliméricas e a resina epóxi comercial (Figura 3.33b).

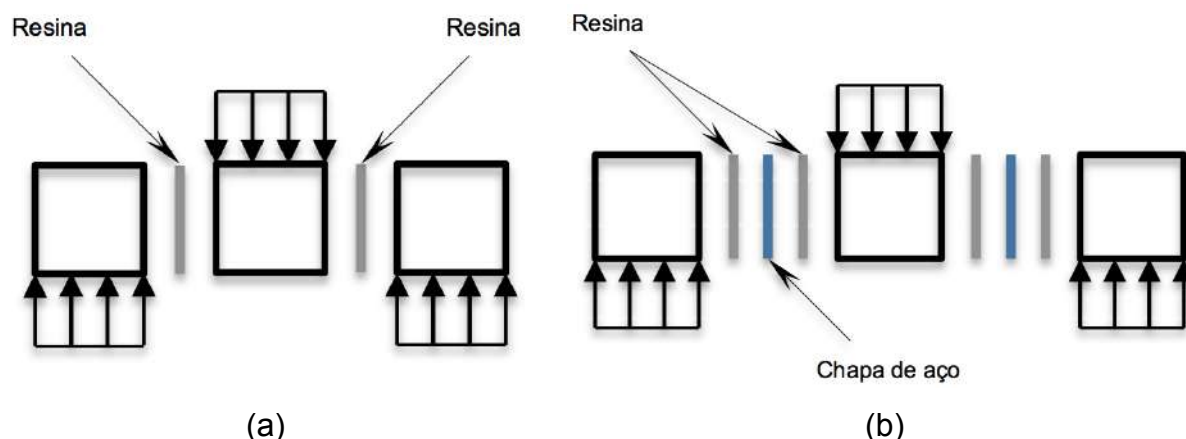


Figura 3.33: Esquema de fabricação dos corpos-de-prova para cisalhamento duplo: (a) cubos colados com as resinas geopoliméricas ou epóxi comercial; (b) cubos e chapas de aço colados com resinas geopoliméricas ou epóxi comercial.

Após 24h da moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em cura imersa em tanques com água e cal. A Figura 3.34 mostra os procedimentos de moldagem dos corpos-de-prova cúbicos de substrato de cimento Portland.

Após 28 dias, os corpos-de-prova cúbicos foram retirados dos tanque de cura e deixados ao ar livre para a secagem durante 24h. Posteriormente, as faces que receberiam as resinas foram preparadas removendo-se a pasta de cimento com uma lixa de parede n.º 100. A superfície foi limpa com ar pressurizado para retirar o pó e partículas soltas remanescentes do lixamento.

A colagem dos três blocos cúbicos, com ou sem as chapas de aço, foi realizada aplicando-se uma quantidade adequada de resina às superfícies com o auxílio de uma espátula metálica e, em seguida, os corpos-de-prova colados foram pressionados com grampos de aço durante 24h (Figura 3.35a). Nesse processo foi tomado o cuidado para garantir que a espessura das resinas entre os blocos de substrato fosse de 2 mm, inclusive para as amostras coladas com aço.

Os ensaios foram realizados após 28 dias de cura das amostras em temperatura ambiente, a fim de obter a resistência ao cisalhamento, as deformações e os mecanismos de fratura das quatro resinas geopoliméricas e da resina epóxi comercial. Os corpos-de-prova foram ensaiados em uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC de capacidade máxima de 30 kN e velocidade de deslocamento do travessão de 0,5 mm/min. Os dados foram obtidos por um sistema de aquisição de dados Tesc (versão 3.01) acoplado à máquina. A Figura 3.35b mostra a configuração de montagem e execução dos ensaios.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.34: (a) Moldes prismáticos para cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm; (b) moldagem dos corpos-de-prova; (c) corpos-de-prova cúbicos desmoldados; (d) cura úmida dos corpos-de-prova.



(a)



(b)

Figura 3.35: (a) Colagem dos corpos-de-prova; (b) ensaio de cisalhamento duplo em máquina de ensaio.

A resistência ao cisalhamento nas interfaces coladas dos corpos-de-prova cúbicos foram calculadas de acordo com a Equação 2.5 (capítulo 2).

### 3.2.8.9. Resistências ao cisalhamento e à tração por compressão diametral (*splitting test*)

Para avaliar a adesividade na interface substrato com as resinas geopoliméricas e com a resina epóxi comercial foram realizados ensaios de tração por compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos, seguindo as prescrições da NBR 7222 (ABNT, 2011).

Os corpos-de-prova cilíndricos mistos com dimensões de  $\phi$  50 mm x 100 mm foram moldados em duas etapas: primeiramente os moldes, com auxílio de anteparos metálicos em seu eixo de simetria, foram preenchidos com substrato de cimento Portland. Após 24h, os corpos-de-prova eram desmoldados e colocados em tanques de cura por um período de 28 dias. Quando retirados do processo de cura, eram expostos à temperatura ambiente por 24h para secagem e tratamento da superfície de aderência, como descrito no item 3.2.8.8. Na segunda etapa de moldagem, as metades dos corpos-de-prova de substrato foram colocados de volta nos moldes cilíndricos e, então, a outra metade foi preenchida com os diferentes tipos de resina. A Figura 3.36 mostra a confecção dos corpos-de-prova mistos para o ensaio de tração por compressão diametral.

O coeficiente de aderência ( $a$ ) é a relação entre as resistências à tração médias obtidas no ensaio e é calculado por meio do uso da Equação 3.14.

$$a = \frac{f_{tim}}{f_{ctm}} \quad (3.14)$$

sendo,

$a$  o coeficiente de aderência na interface dos materiais;

$f_{tim}$  a resistência à tração na interface;

$f_{ctm}$  a menor resistência à tração média entre os dois materiais que compõem os corpos-de-prova cilíndricos mistos.

Outra configuração de moldagem dos corpos-de-prova com menor gasto de material foi realizada para verificar a resistência ao cisalhamento por compressão diametral do substrato colado com as diferentes resinas. Nesta configuração as metades dos corpos-de-prova cilíndricos de substrato foram coladas com as resinas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.36: Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos mistos: (a) moldes com anteparos metálicos; (b) moldes preenchidos com substrato; (c) corpos-de-prova desmoldados; (d) corpos-de-prova cilíndricos mistos.

Cada combinação entre o substrato e os cinco tipos de resinas (quatro resinas geopoliméricas e uma resina epóxi comercial) foi ensaiada em dois ângulos diferentes. Como mostra a Figura 3.37, os ângulos adotados para o plano da interface em relação ao plano vertical foram 30 e 45°.

Para cada combinação (substrato/resina/inclinação da interface) foram moldados três corpos-de-prova, que foram ensaiados em uma prensa universal Shimadzu modelo UH, de capacidade máxima de 500 kN e taxa de carregamento de 2 kN/s.

Para o cálculo dos valores de resistência à tração por compressão diametral foi empregada a Equação 2.6 (capítulo 2).



Figura 3.37: Posicionamento dos corpos-de-prova cilíndricos na prensa mecânica com planos de interface inclinados: (a) interface substrato/resina geopolimérica; (b) interface substrato/resina epóxi.

#### 3.2.8.10. Resistência ao cisalhamento por compressão (*slant shear test*)

A resistência ao cisalhamento nas interfaces substrato/resina e substrato/resina/chapa de aço foi verificada por meio do *slant shear test* e a metodologia de ensaio utilizada está descrita na BS EN 12615 (1999). Para realização dos ensaios foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos de substrato de cimento Portland com dimensões de 50 mm x 50 mm x 150 mm (largura, altura e comprimento) e com interface a 30° em relação ao plano vertical que divide a amostra em duas partes iguais (Figura 3.38a). Após serem desmoldados, os corpos-de-prova de substrato foram submersos em tanques com água para a realização da cura durante 28 dias.

Passado o período de cura, os corpos-de-prova prismáticos foram retirados dos tanques de água e deixados ao ar livre para a secagem durante 24h. Em seguida, as duas metades dos corpos-de-prova foram coladas por meio da aplicação das resinas nas superfícies inclinadas. O tratamento destas superfícies antes da colagem bem como a espessura das resinas seguiram os mesmos procedimentos descritos no item 3.2.8.8.

O ensaio foi realizado em uma prensa mecânica com capacidade máxima de 500 kN e taxa de carregamento de 5 kN/s (Figura 3.38b), a fim de se obter as tensões principais atuantes na interface inclinada.

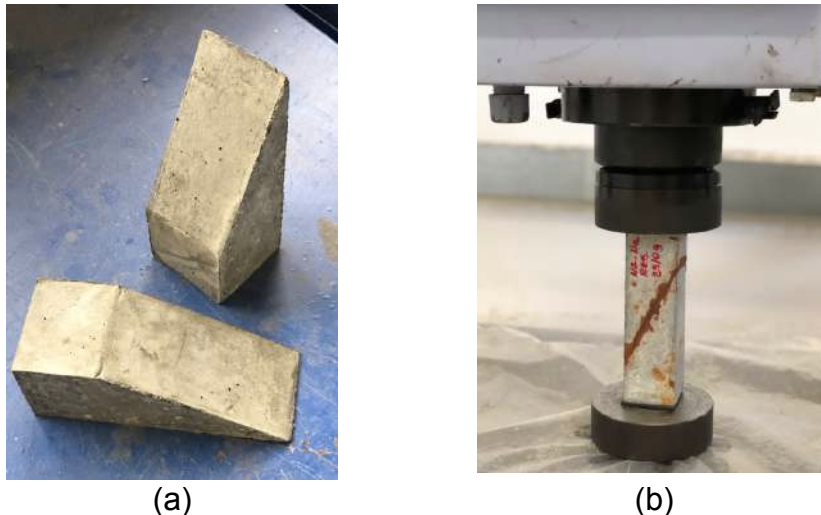


Figura 3.38: (a) Corpos-de-prova prismáticos desmoldados; (b) execução do ensaio de cisalhamento por compressão (*slant shear test*).

As tensões normais e tangenciais no plano considerado ( $30^\circ$  em relação ao eixo vertical) foram calculadas com o uso das Equações 2.7 e 2.8, de acordo com a representação esquemática mostrada na Figura 2.7 do capítulo 2.

#### 3.2.8.11. Resistência de aderência à tração na flexão

Este ensaio teve como objetivo avaliar a interface substrato-resina. A determinação da resistência de aderência à tração na flexão a 3 pontos foi realizada de acordo com as especificações da NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram confeccionados três corpos-de-prova prismáticos de substrato com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura e comprimento), seguindo os procedimentos de mistura do item 3.2.2. Após 28 dias de cura submersa em água, os corpos-de-prova foram secos durante 24h e, em seguida, ensaiados em uma máquina de ensaio universal EMIC do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV/UENF) com capacidade de 30 kN e velocidade de carregamento de  $50 \pm 10$  N/s até ruptura dos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova prismáticos rompidos ficaram divididos em duas partes (Figura 3.39a). As duas partes foram coladas uma à outra (superfícies de fratura) com uma camada de 2 mm de resinas geopoliméricas e de resina epóxi (Figura 3.39b). As amostras coladas ficaram em cura à temperatura ambiente por 28 dias e, então, foram novamente ensaiadas à tração por flexão na mesma prensa (Figura 3.39c).

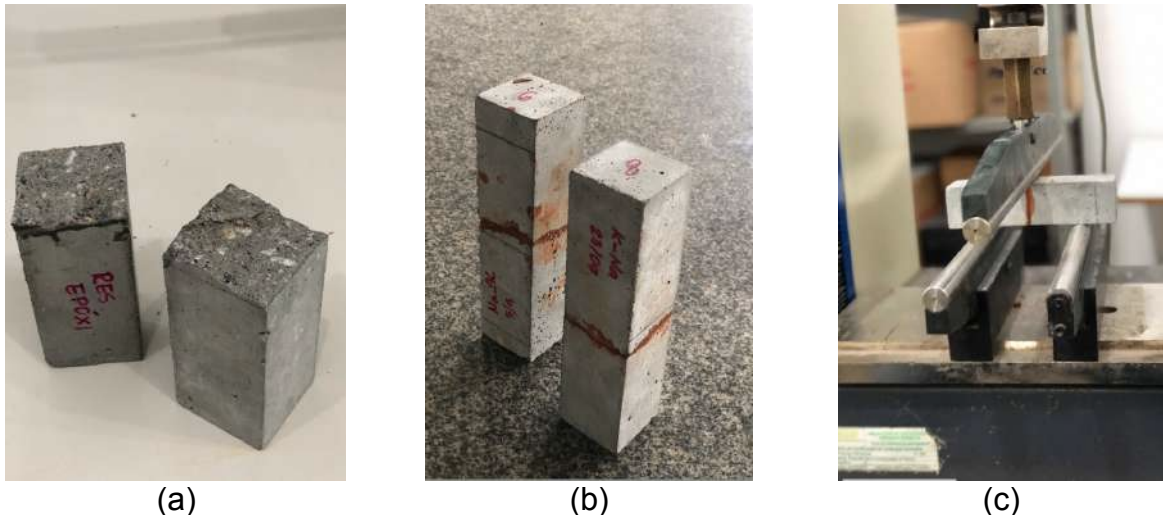


Figura 3.39: (a) Corpo-de-prova quebrado em duas partes após o ensaio de tração na flexão a 3 pontos; (b) corpos-de-prova colados com resina geopolimérica e a epóxi comercial; (c) ensaio de tração na flexão a três pontos.

### 3.2.8.12. Resistência de aderência por ensaio de tirante

Tirantes são elementos lineares de eixo reto em que as forças normais de tração são preponderantes, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014).

A NBR 7477 (ABNT, 1982) estabelece procedimentos para a determinação do coeficiente de conformação superficial por meio de ensaio de fissuração em tirantes de concreto armado com uma única barra ou fio. Segundo a NBR 7480 (ABNT, 2007), o coeficiente de conformação superficial deve ser maior ou igual a 1,0 para diâmetros nominais menores do que 10 mm.

No presente trabalho este ensaio teve como objetivo avaliar a aderência entre as resinas geopoliméricas e o aço. Para isso, cinco tirantes foram moldados e ensaiados para cada resina geopolimérica. Os diâmetros das barras foram de 4,2 mm para o aço CA-60 (barras nervuradas) e de 6,3 mm para o CA-25 (barras lisas). Para fins de comparação, esses diâmetros foram os mesmos escolhidos por França (2017).

Já para a determinação das dimensões dos tirantes (Tabela 3.14), foi necessário o cálculo de alguns parâmetros específicos (Equação 3.15).

$$a = \sqrt{\pi \cdot \theta \cdot \left(\frac{\theta}{4} + 7\right)} \quad (3.15)$$

sendo,



$a$  a medida do lado do tirante, em mm;

$\theta$  o diâmetro nominal da barra ou fio, em mm.

As demais dimensões necessárias para a confecção das fôrmas foram determinadas com o valor do parâmetro  $a$ , a saber:

- $l$  = comprimento do tirante  $\geq 15 \cdot a$ , em mm;
- $L$  = comprimento da barra =  $l + 120$ , em mm.

As fôrmas foram untadas com óleo mineral e fixadas às barras de aço nos orifícios feitos no centro de massa dos tirantes, para não se movimentarem durante o processo de adensamento. As barras foram colocadas com atenção e cuidado para não entrarem em contato com o óleo e prejudicar a aderência na interface resina/aço. As resinas foram fabricadas conforme descrito no item 3.2.5 e em seguida dispostas nas fôrmas. Após 24h os tirantes foram desmoldados e colocados em cura à temperatura ambiente durante 28 dias, até a realização dos ensaios mecânicos. As etapas de confecção e cura dos tirantes são mostradas na Figura 3.40.

Tabela 3.14: Dimensões dos tirantes, em mm.

Aço	$\phi$ (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento $l$ (mm)	Comprimento barra $L$ (mm)
CA-60	4,2	35	35	460	580
CA-25	6,3	40	40	570	690



(a)



(b)



(c)

Figura 3.40: (a) Fôrmas de madeira; (b) moldagem dos tirantes de resina geopolimérica; (c) cura dos corpos-de-prova (tirantes e cilindros).

Os tirantes foram ensaiados à tração direta em uma máquina de ensaio universal INSTRON, com capacidade de 100 kN e velocidade de deslocamento do travessão de 2 mm/min, localizada no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF (Figura 3.41a), de acordo com as recomendações da NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2015).

A norma especifica que a carga máxima a ser aplicada seja 80% da tensão de escoamento das barras de aço utilizadas. Utilizou-se o valor médio da tensão de escoamento das barras ensaiadas conforme item 3.1.9. Após aplicação do carregamento máximo e finalização do ensaio, as fissuras observadas nas quatro faces dos tirantes foram marcadas com uma caneta (Figura 3.41b) e, então, foram registradas as distâncias entre elas. Estas distâncias servem para se obter o coeficiente de conformação superficial e a resistência de aderência entre as resinas geopoliméricas e as barras de aço. Vale ressaltar que só foram consideradas as fissuras que surgiram nas quatro faces dos tirantes.

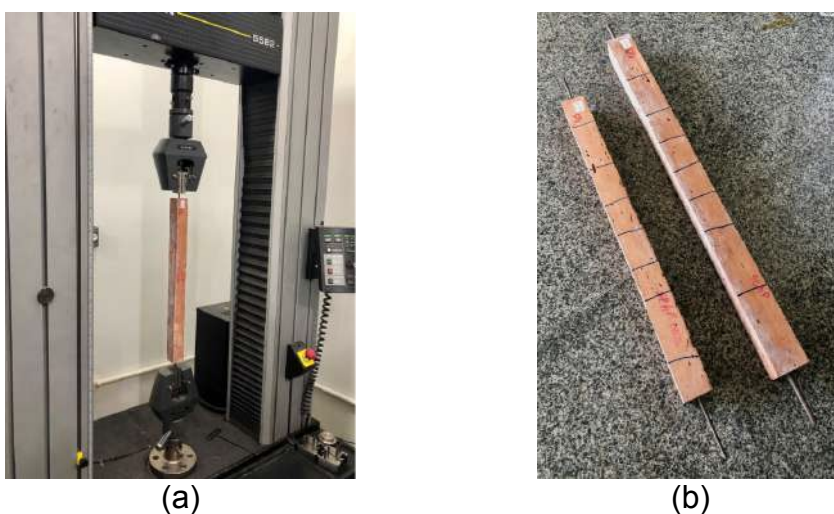


Figura 3.41: (a) Ensaio de tração direta nos tirantes; (b) marcação das fissuras nas quatro faces dos tirantes.

### **3.2.9. Técnicas analíticas**

A seguir são descritas as técnicas analíticas realizadas nas amostras de resinas geopoliméricas e epóxi comercial.

#### **3.2.9.1. Difração de raios X**

A caracterização das fases cristalinas das resinas geopoliméricas foi feita por

meio de um difratômetro Miniflex 600 da Rigaku. Amostras das resinas foram extraídas dos corpos-de-prova e, então, maceradas até serem reduzidas a pó bem fino. Em seguida, o material foi passado na peneira #200 e disposto no porta-amostras do equipamento. Os procedimentos para a análise das amostras estão descritos no item 3.1.1.5.

### 3.2.9.2. Análises térmicas

As análises termogravimétrica (TGA) e térmica diferencial (DTA) foram realizadas para verificar transformações de fase e estabilidade térmica das resinas geopoliméricas e epóxi comercial. A técnica possibilita monitorar a variação de massa das amostras em função da variação de temperatura em um ambiente com atmosfera controlada. Os ensaios térmicos foram realizados como descrito no item 3.1.1.6.

### 3.2.9.3. Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para analisar a morfologia e a microestrutura das amostras de resinas geopoliméricas e epóxi comercial. As amostras das resinas, com dimensões de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>, foram secas em estufa a 50°C por 48h (Figura 3.42). Os procedimentos de fixação e tratamento das amostras nos acessórios do microscópio foram descritos no item 3.1.1.8.



Figura 3.42: Amostras de resinas geopoliméricas e epóxi comercial extraídas da zona de fratura dos corpos-de-prova submetidos a ensaios mecânicos.

### 3.3. Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA), que permite a comparação simultânea de vários grupos de dados, chamados de tratamentos, utilizando variáveis contínuas. Esta análise verifica se há diferença significativa entre os tratamentos, porém não especifica quais diferem entre si. Logo, utilizou-se o teste de médias de Tukey para identificar as diferenças entre as médias das amostras dos ensaios de caracterização, de resistência mecânica e dos ensaios de aderência das resinas geopoliméricas.

Os resultados da análise de variância e do teste de Tukey com nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ) foram gerados no programa Past versão 3.25 (*Paleontological Statistics*), desenvolvido por Ryan *et al.* (1995).

## 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são mostrados os principais resultados do programa experimental. As tabelas e os gráficos apresentados foram elaborados por meio da leitura dos valores indicados nos marcadores digitais das prensas, nos extensômetros e nos *LVDT*s. Foram considerados os corpos-de-prova mais representativos de cada série e aqueles que apresentaram falhas nas leituras foram descartados.

A análise estatística (ANOVA e Teste de Tukey) dos resultados apresentados neste capítulo, gerados pelo programa *Past (Paleontological Statistics)*, são mostrados nas Tabelas A1 a A35 do Anexo A.

### 4.1. Dosagem das resinas geopoliméricas

O estudo de dosagem foi realizado com o objetivo de se obter uma resina geopolimérica com elevada resistência mecânica, com valores próximos àqueles alcançados por resinas epóxi encontradas no mercado (60 a 80 MPa) frequentemente utilizadas em serviços de reparos de estruturas de concreto armado.

Para cada resina geopolimérica, a primeira dosagem foi elaborada com as mesmas proporções, em massa, dos materiais e, conseqüentemente, com razões molares diferentes.

A Tabela 4.1 mostra as razões molares e a resistência à compressão aos 14 dias. Cada silicato e hidróxido utilizado possui composição química diferente, gerando razões molares diferentes, mesmo quando a quantidade de material empregada na dosagem foi igual. Baseado nos trabalhos de Oliveira (2018) e Rocha (2017), os testes para as dosagens das resinas geopoliméricas foram realizados aos 14 dias, pois nesta idade as resistências à compressão já atingem 90 a 95% dos valores aos 28 dias.

A primeira dosagem das resinas geopoliméricas (Tabela 4.1) não alcançou os níveis de resistência à compressão desejados (entre 70 e 80 MPa). Então, a segunda dosagem foi realizada ajustando-se a quantidade de material adotada na primeira dosagem, principalmente a quantidade de água, com intuito de obter maiores resistências à compressão (Tabela 4.2).

Tabela 4.1: Razões molares e resistências à compressão das resinas geopoliméricas com mesma proporção, em massa, dos materiais.

Resina	Razão molar				H <sub>2</sub> O/ sólidos	Resistência à compressão aos 14 dias (MPa)
	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{H_2O}{M_2O}$	$\frac{M_2O}{SiO_2}$	$\frac{M_2O}{Al_2O_3}$		
s.S – h.S	1,95	2,48	0,31	0,61	0,41	52,65 ± 3,21
s.S – h.P	1,95	2,26	0,34	0,65	0,40	57,46 ± 2,87
s.P – h.S	1,87	2,67	0,31	0,58	0,43	60,26 ± 0,71
s.P – h.P	1,87	2,43	0,33	0,62	0,42	56,76 ± 3,05

Os materiais geopoliméricos produzidos com metacaulim apresentam relação entre a policondensação e a resistência à compressão axial. Quando se utiliza elevada relação H<sub>2</sub>O/sólidos, há muito mais líquido do que sólido na mistura e o contato entre e o precursor e a solução ativadora é limitado pelo grande volume de líquido, provocando taxa de dissolução lenta. Em contrapartida, a proporção de sólidos aumenta com baixa relação H<sub>2</sub>O/sólidos, ocasionando maior interação entre a solução ativadora e o precursor. Dessa forma, a resistência à compressão aumenta à medida que a relação H<sub>2</sub>O/sólidos diminui. O silicato de potássio possui quantidade de água superior a do silicato de sódio alcalino. Portanto, há mais líquido do que sólido presente na mistura de resinas produzidas com silicato de potássio. Esse fato limita a dissolução dos íons de sílica e alumina. Já as resinas com silicato de sódio alcalino não possuem maior volume de líquido e apresentam proporção superior de sílica que, conseqüentemente, contribui para a geopolimerização, sem afetar a dissolução dos íons de Si e Al (PANIAS *et al.*, 2007).

Tabela 4.2: Razões molares e resistências à compressão das resinas geopoliméricas com mesma proporção, em massa, dos materiais.

Resina	Razão molar				H <sub>2</sub> O/ sólidos	Resistência à compressão aos 14 dias (MPa)
	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{H_2O}{M_2O}$	$\frac{M_2O}{SiO_2}$	$\frac{M_2O}{Al_2O_3}$		
s.S – h.S	1,97	2,37	0,31	0,62	0,39	85,32 ± 0,33
s.S – h.P	1,97	2,16	0,34	0,66	0,38	77,42 ± 0,83
s.P – h.S	1,89	2,56	0,31	0,59	0,42	77,93 ± 5,43
s.P – h.P	1,89	2,33	0,33	0,63	0,40	78,73 ± 1,70

Duxson *et al.* (2005) afirmam que a resistência à compressão dos geopolímeros está correlacionada com a quantidade de formação de gel de aluminossilicato, ou seja, maior formação de gel irá proporcionar maior resistência mecânica. Xu e Van Deventer (2000) relatam que à medida que a quantidade de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  aumenta, mais Si é fornecido à mistura para geopolimerização, melhorando assim os ganhos de resistência mecânica. Os resultados das resinas com silicato de sódio alcalino mostrados na Tabela 4.2 são superiores aos mostrados na Tabela 4.1, o que pode ser explicado pela melhor geopolimerização, devido à maior quantidade de Si disponível na solução. Contudo, vale ressaltar que o aumento excessivo de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  inibe a geopolimerização devido à precipitação de gel de aluminossilicato (LEE e VAN DEVENTER, 2002; DUXSON *et al.*, 2007; VILLA *et al.*, 2010; LIEW *et al.*, 2011;). As duas dosagens realizadas neste estudo não apresentaram esta precipitação.

## 4.2. Estado fresco

### 4.2.1. Densidade de massa

A massa específica ou densidade das resinas geopoliméricas depende principalmente da massa específica, do agregado miúdo e do teor de ar incorporado na mistura. A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos para a densidade de massa das resinas geopoliméricas no estado fresco.

Tabela 4.3: Densidade de massa das resinas geopoliméricas.

Resina	A ( $\text{kg/m}^3$ )
s.S – h.S	1897,2
s.S – h.P	1992,5
s.P – h.S	1944,9
s.P – h.P	1980,0

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas podem ser classificadas em função da sua densidade de massa no estado fresco (Tabela 4.4). Segundo a classificação apresentada, todas as resinas geopoliméricas apresentaram elevada densidade de massa no estado fresco e se enquadram à

classe D5. A elevada densidade se deve ao adequado empacotamento dos grãos, proporcionado pelo agregado miúdo. Este adequado empacotamento dos grãos conduz a um menor índice de vazios e, conseqüentemente, influencia positivamente na resistência mecânica da resina geopolimérica.

Tabela 4.4: Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.

Método de ensaio	Classe	A (kg/m <sup>3</sup> )
NBR 13278 (ABNT, 2005)	D1	≤ 1400
	D2	1200 a 1600
	D3	1400 a 1800
	D4	1600 a 2000
	D5	1800 a 2200
	D6	> 2000

As quatro resinas geopoliméricas também podem ser definidas como de densidade normal, segundo a classificação proposta por Carasek (2007) mostrada na Tabela 4.5. Ele concluiu que argamassas mais densas podem apresentar menor produtividade devido ao maior esforço exigido durante o manuseio e a aplicação.

Oliveira (2018) estudou uma argamassa geopolimérica à base de metacaulim e solução ativadora com composição de 30% NaOH + 70% KOH e obteve densidade de massa no estado fresco de 1999,6 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 4.5: Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco (adaptado de Carasek, 2007).

Resina	Densidade aparente no estado fresco A (kg/m <sup>3</sup> )
Leve	≤ 1400
Normal	1400 ≤ A ≤ 2300
Pesada	> 2300

#### 4.2.2. Retenção de água

A retenção de água é uma propriedade importante definida como a capacidade da argamassa, ainda no estado fresco, de manter sua consistência e



trabalhabilidade quando sujeito a solicitações que provocam a perda de água, como absorção pelo substrato, sucção ou evaporação. Entretanto, um dos mecanismos responsáveis pela aderência entre a argamassa ou resina ao substrato se dá pela impregnação do substrato pelo material de reparo, que ao se hidratar cria uma ponte de aderência entre os mesmos (CARASEK, 1996).

A baixa retenção de água pode favorecer a perda de água para substratos muito absorventes e ocasionar prejuízo à continuidade da hidratação e, conseqüentemente, do ganho de resistência da argamassa (OLIVEIRA, 2018). Além disso, uma resina que apresente rápida dessecação, ou seja, baixa retenção de água, atinge níveis maiores de consistência. Este fato reduz a trabalhabilidade e dificulta a aplicação do produto ao substrato nos diversos serviços de reparo.

No caso dos geopolímeros, a água não participa efetivamente da reação de geopolimerização. Então, é possível concluir que, de maneira análoga, a perda excessiva de água do material poderia dificultar o desenvolvimento das reações, já que a água é o meio que promove o contato entre os reagentes.

De modo geral, quando os substratos são muito pouco absorventes, uma retenção de água intermediária é recomendada para que a aderência não seja prejudicada. Já para substratos muito absorventes, normalmente utilizados, uma elevada retenção de água é recomendada, para manter o desempenho superior do sistema construtivo substrato-resina ou argamassa.

A Tabela 4.6 mostra os valores de retenção de água das resinas geopoliméricas.

Tabela 4.6: Retenção de água das resinas geopoliméricas.

Resina	$R_a$ (%)
s.S – h.S	99,6
s.S – h.P	99,6
s.P – h.S	99,5
s.P – h.P	99,5

De acordo com a ASTM C-270 (2007), a retenção de água de argamassas não deve ser inferior a 75%. A Tabela 4.7 mostra a classificação das argamassas em relação à retenção de água, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005). Todas

as resinas geopoliméricas apresentaram valores acima de 99%, sendo, portanto, classificadas como U6.

Tabela 4.7: Classificação das argamassas quanto à retenção de água.

Método de ensaio	Classe	$R_a$ (%)
NBR 13277 ABNT (2005)	U1	$\leq 78$
	U2	72 a 85
	U3	80 a 90
	U4	86 a 94
	U5	91 a 97
	U6	95 a 100

#### 4.2.3. Consistência flow-table

No estado fresco, uma argamassa tem a trabalhabilidade como sua principal propriedade e pode ser estimada por meio da consistência. A obtenção de um material com trabalhabilidade adequada à utilização proporciona maior facilidade no seu manuseio, aplicação e regularização. Quando a trabalhabilidade não é adequada, a argamassa pode se apresentar muito seca, áspera ou excessivamente fluida, e esses fatores comprometem sua aplicação. Além disso, pode apresentar segregação, exsudação excessiva ou baixa aderência ao substrato, sendo este último parâmetro de grande relevância no presente estudo, que trata da aderência interfacial entre substratos de concreto convencional e resinas geopoliméricas.

O índice de consistência das resinas geopoliméricas é mostrado na Figura 4.1. As resinas geopoliméricas apresentaram boa trabalhabilidade. Porém, as resinas produzidas com hidróxido de potássio foram mais fluidas do que as produzidas com hidróxido de sódio. É possível observar que para o mesmo tipo de silicato, o índice de consistência é superior quando se utiliza KOH na composição. Segundo LEONG *et al.* (2016), isso se deve a maior solubilidade do potássio em relação ao sódio. Os silicatos utilizados nas misturas reduzem a trabalhabilidade devido à sua natureza viscosa, principalmente o  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (silicato de sódio alcalino) que possui em sua composição quantidade inferior de  $\text{H}_2\text{O}$  em relação ao  $\text{K}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (silicato de potássio). Em contrapartida, os hidróxidos (NaOH e KOH)

apresentam natureza fluida e aumentam a trabalhabilidade, conforme resultados apresentados no trabalho de Rangel (2017).

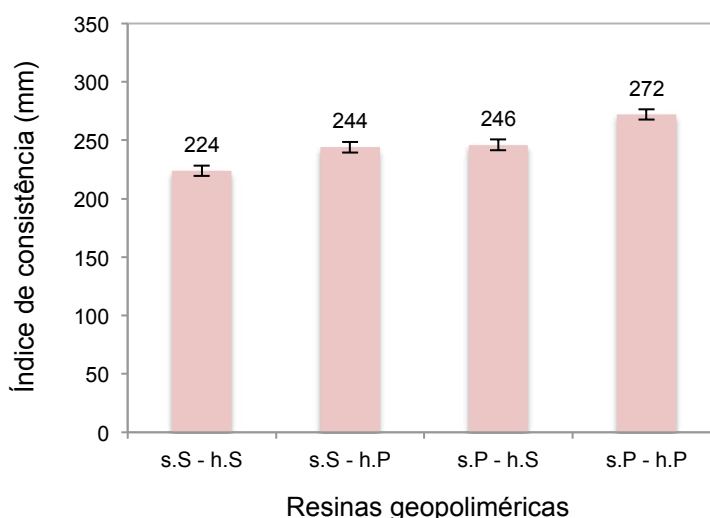


Figura 4.1: Índice de consistência das resinas geopoliméricas.

Ghosh *et al.* (2012) estudaram a trabalhabilidade das argamassas geopoliméricas pelo índice de consistência e as classificaram de acordo com a Tabela 4.8. Logo, as resinas geopoliméricas s.S – h.S, s.S – h.P e s.P – h.S apresentaram índice de consistência entre 224 e 246 mm sendo, portanto, classificadas como de consistência alta. Já a resina geopolimérica s.P – h.P é classificada como de consistência muito elevada, já que apresentou índice igual a 272 mm.

Tabela 4.8: Classificação quanto à consistência de argamassas geopoliméricas, de acordo com Ghosh *et al.* (2012).

Classificação	Índice de consistência (mm)
Muito alta	Acima de 250
Alta	180 – 250
Moderada	150 – 180
Rígida	120 – 150
Muito rígida	Abaixo de 120

Foi observado por Oliveira (2018) que as argamassas à base de metacaulim ativadas com 100% NaOH apresentaram menores índices de consistência do que

aquelas com 100% KOH. Na Figura 4.2, conforme a concentração de NaOH diminuía na solução ativadora, maiores eram os índices de consistência obtidos, independentemente da relação ativador/precursor das séries.

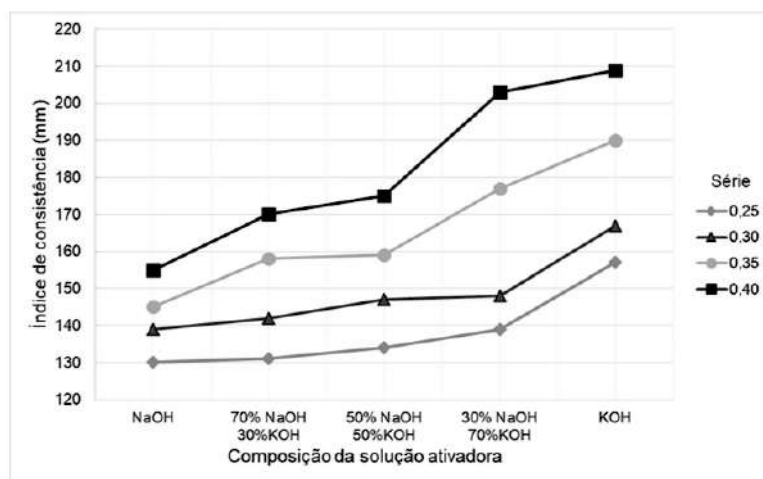


Figura 4.2: Índice de consistência das argamassas geopoliméricas (OLIVEIRA, 2018).

#### 4.2.4. Consistência *squeeze-flow*

De acordo com Silva *et al.* (2005), o ensaio *squeeze-flow* é um ensaio complementar ao índice de consistência (*flow-table*) e fornece caracterização mais completa quanto à reologia do material, possibilitando mensurar a trabalhabilidade de maneira mais confiável.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as curvas carga *versus* deslocamento obtidas no ensaio *squeeze-flow* para as duas velocidades de execução propostas pela NBR 15839 (ABNT, 2010). As curvas confirmam os resultados obtidos pelo método *flow-table* e mostram que as resinas ativadas com silicato de sódio alcalino e hidróxido de sódio apresentaram menor trabalhabilidade do que aquelas ativadas com silicato de potássio e hidróxido de potássio. As outras resinas geopoliméricas com ativadores misturados (silicatos e hidróxidos de sódio e potássio) apresentaram valores intermediários de consistência. Chang (2003), Karakoca *et al.* (2014) e Khan *et al.* (2015) relataram em seus trabalhos sobre sistemas geopoliméricos que as misturas sem silicato de sódio alcalino na composição são menos viscosas, pois permitem melhor mobilidade das partículas.

As oscilações observadas nas curvas sugerem a ocorrência de altos níveis de cisalhamento interno no material (CARDOSO *et al.*, 2005). Para todas as resinas

geopoliméricas deste estudo, o encerramento do ensaio ocorreu pelo deslocamento máximo de 9 mm.

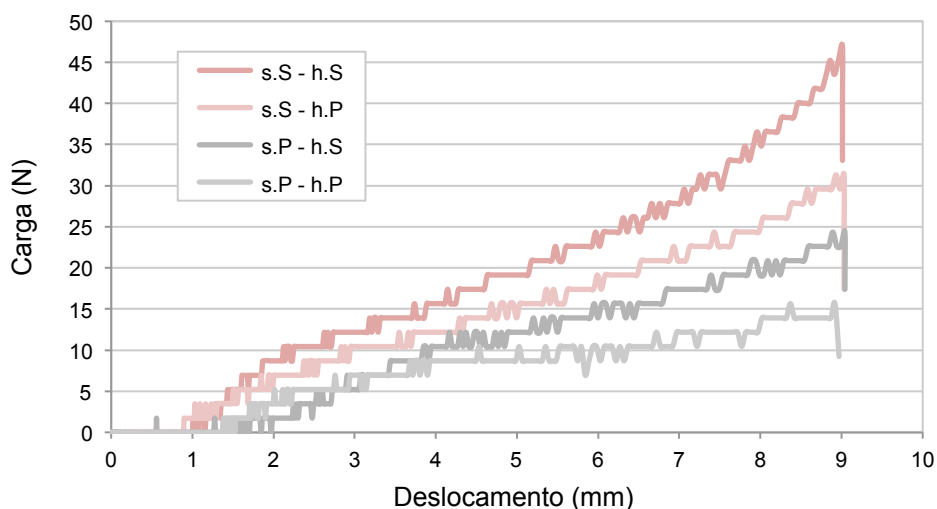


Figura 4.3: Curvas carga versus deslocamento das resinas geopoliméricas pelo método *squeeze-flow*, para velocidade de 0,1 mm/s.

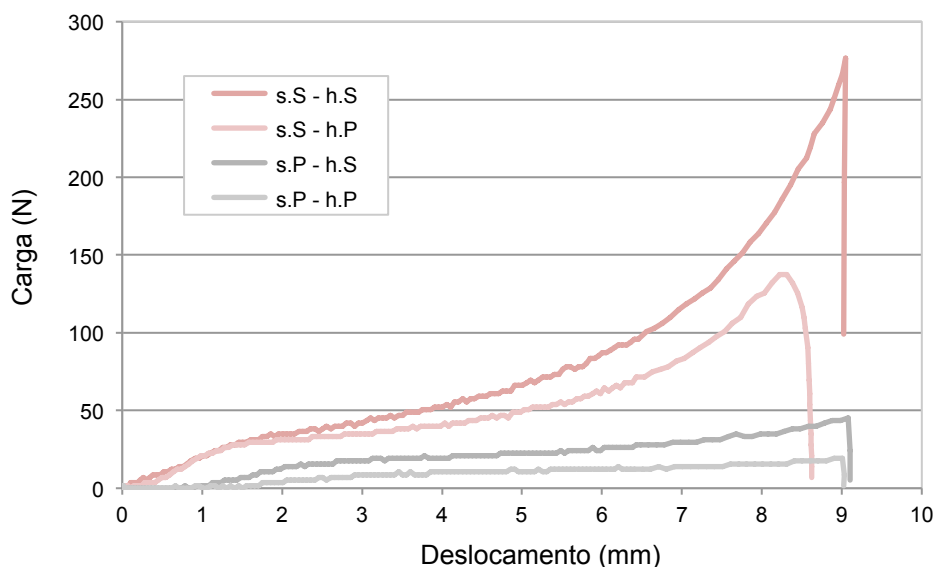


Figura 4.4: Curvas carga versus deslocamento das resinas geopoliméricas pelo método *squeeze-flow*, para velocidade de 0,3 mm/s.

Por meio das curvas características apresentadas é possível entender a trabalhabilidade das resinas. Cargas de compressão maiores para mesmo deslocamento indicam resinas mais viscosas, e maior viscosidade reflete em menor trabalhabilidade (ANTUNES *et al.*, 2005; CARDOSO, 2009). Portanto, curvas com inclinações menores indicam maior deslocamento e, conseqüentemente, menor

viscosidade da resina, o que proporciona maior facilidade de aplicação e regularização ao substrato.

A Figura 4.5 mostra a carga máxima alcançada para cada resina geopolimérica referente ao deslocamento máximo de 9 mm, prescrito pela NBR 15839 (ABNT, 2010). As resinas ativadas com sódio apresentaram maiores viscosidades e, conseqüentemente, menor trabalhabilidade.

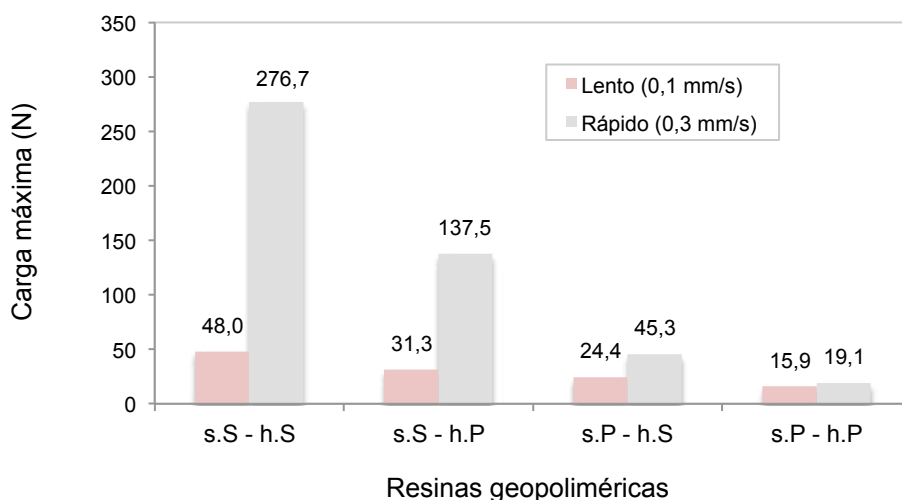


Figura 4.5: Carga máxima das resinas geopoliméricas pelo método *squeeze flow*.

#### 4.2.5. Tempos de início e fim de pega

A Figura 4.6 mostra os tempos de início e fim de pega das resinas geopoliméricas.

Os tempos de início de pega variaram de 40 a 87 minutos e os tempos de fim de pega variaram de 66 a 113 minutos. As resinas ativadas com hidróxido de potássio apresentaram maiores tempos de início e fim de pega.

Estudos de Silva (2000) mostraram que os tempos de início e fim de pega dos cimentos geopoliméricos foram iguais a 40 e 105 min, respectivamente. Já Saloma *et al.* (2016) encontraram valores de 88 e 135 min para os tempos de início e fim de pega, respectivamente, em argamassas geopoliméricas ativadas com NaOH e molaridade igual a 16M. Esses valores são bem menores do que aqueles apresentados pelos cimentos Portland (geralmente 75 min e 4h para início e fim de pega, respectivamente).

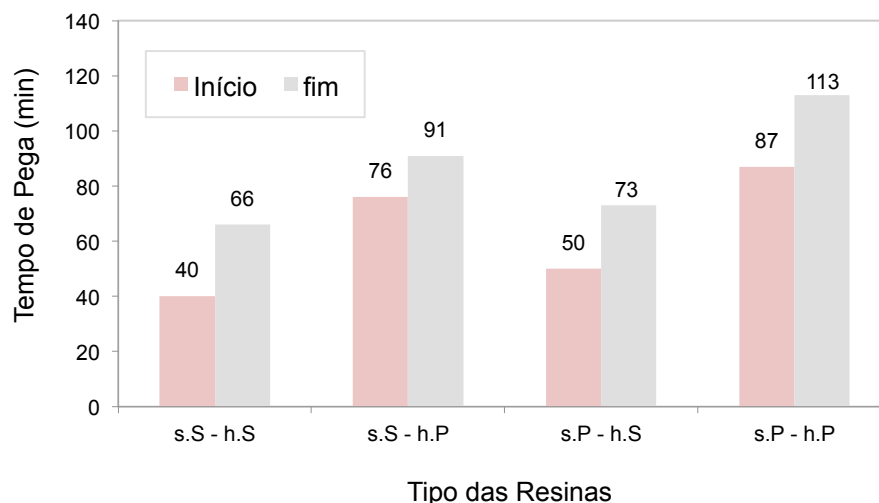


Figura 4.6: Tempos de início e fim de pega das resinas geopoliméricas.

Com referência às proporções de mistura apresentadas na Tabela 4.2, pode-se observar que, para diferentes soluções, a razão Si/Al e a razão H<sub>2</sub>O/Sólidos permanecem quase as mesmas. No entanto, a composição s.S – h.S apresentou tempo de pega menor que a composição s.P – h.P. De acordo com Van Deventer *et al.* (2010), o conteúdo de Na é o principal fator que influencia o tempo de pega. Isso pode ser atribuído ao fato de que os cátions Na funcionam como catalisadores de reação.

O tempo de início de pega representa o instante em que, após a mistura dos constituintes, o material atinge aumento considerável de sua consistência e, conseqüentemente, perde trabalhabilidade e não deve ser mais manuseado. Com isso, é possível observar que as resinas geopoliméricas produzidas com hidróxido de potássio apresentaram maiores tempos de início de pega e têm vantagem relativa em relação às demais (resinas produzidas com hidróxido de sódio), pois, na prática, permitem mais tempo para serem manipuladas e aplicadas ao substrato. Já o tempo de fim de pega é representado pela solidificação total do material com ganhos consideráveis de resistência nas primeiras horas, importante nos serviços de reparos estruturais.

### 4.3. Estado endurecido

Os resultados das propriedades mecânicas do substrato de cimento Portland e das resinas geopoliméricas são apresentados a seguir. As propriedades avaliadas foram a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral,

módulo de elasticidade longitudinal, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento, além dos ensaios de resistência ao cisalhamento e aderência.

### **4.3.1. Substrato**

#### *4.3.1.1. Resistência à compressão e à tração por compressão diametral*

Segundo as recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2015), o concreto convencional utilizado neste trabalho, como substrato, foi fabricado com condição de preparo A, classes C10 até C80 e resistências à compressão e à tração indireta obtidas pela média de três corpos-de-prova com desvio-padrão de no máximo 4,0 MPa.

A Figura 4.7 mostra o ganho de resistência mecânica do substrato ao longo do tempo. Como esperado, pelo tipo de cimento utilizado (CPV ARI), os corpos-de-prova alcançaram resistências à compressão elevadas nas primeiras idades. No primeiro e no terceiro dias alcançaram resistências à compressão de 53 e 75%, respectivamente, daquelas registradas aos 28 dias. A resistência à tração por compressão diametral alcançou 5,99 MPa aos 28 dias, que representa aproximadamente 9% do valor da resistência à compressão aos 28 dias.

A Tabela 4.9 mostra os valores médios das resistências à compressão e à tração por compressão diametral e seus respectivos desvios-padrão nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 90 dias.

A resistência mecânica do substrato é importante para o desempenho da resistência de aderência em relação ao material adesivo. A diminuição da resistência de aderência pode ocorrer justamente pela diminuição da absorção d'água, devido à diminuição da porosidade aparente. Substratos com resistência mais baixa apresentam elevado número de poros, local onde a resina penetra, promovendo ancoragem mecânica após a hidratação dos compostos. Em contrapartida, para maiores resistências do concreto de substrato ocorre a diminuição dos poros e, conseqüentemente, diminuição desse poder de ancoragem da resina.



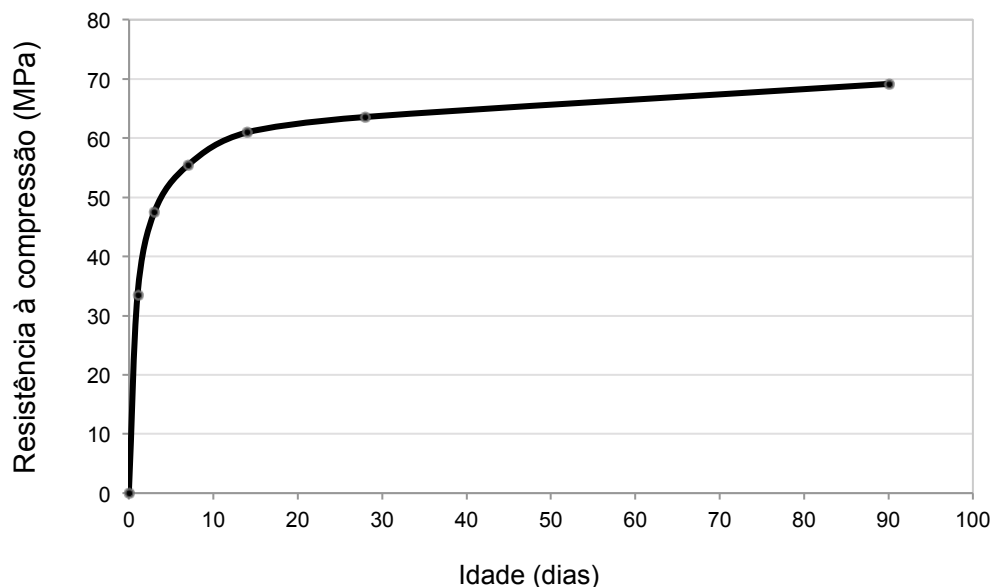


Figura 4.7: Curva da resistência à compressão do substrato em função da idade.

Tabela 4.9: Resistências médias à compressão e à tração por compressão diametral do substrato.

Resistência à compressão (MPa)	Idade (dias)	<sup>1</sup> $f_{cm}$ (MPa)	<sup>2</sup> $\sigma$ (MPa)	<sup>3</sup> C.V. (%)
	1	33,55	0,72	2,16
	3	47,52	0,23	0,48
	7	55,46	1,24	2,23
	14	60,98	0,35	0,58
	28	63,58	0,96	1,52
	90	69,16	0,90	1,30
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Idade (dias)	<sup>4</sup> $f_{ctm}$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	C.V. (%)
	28	5,99	0,36	6,03

<sup>1</sup> $f_{cm}$  = resistência média à compressão axial.

<sup>2</sup> $\sigma$  = desvio-padrão.

<sup>3</sup>C.V. = coeficiente de variação.

<sup>4</sup> $f_{ctm}$  = resistência média à tração por compressão diametral.

#### 4.3.1.2. Módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson

A Figura 4.8 mostra as curvas tensão *versus* deformação longitudinal e tensão *versus* deformação transversal obtidas pela leitura dos extensômetros (*strain gages*) acoplados aos corpos-de-prova cilíndricos. As cargas e as deformações

obtidas permitiram determinar o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento do substrato de concreto.

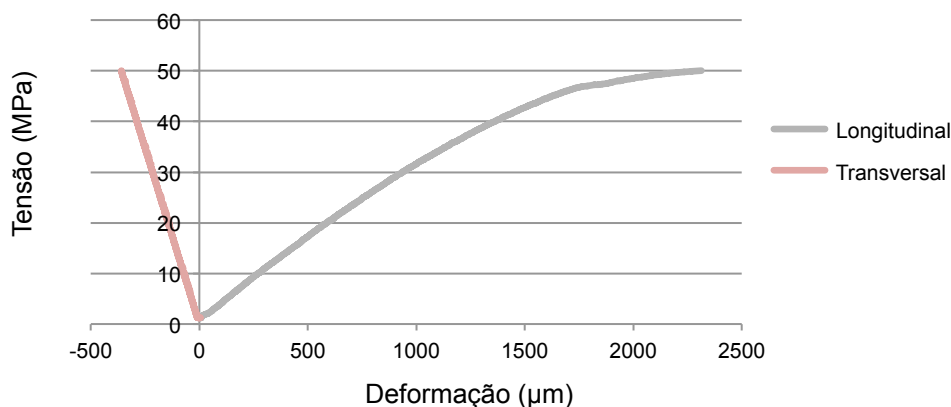


Figura 4.8: Curva tensão *versus* deformação do substrato.

O módulo de elasticidade encontrado para o concreto de cimento Portland foi de 31,9 GPa. França (2017) e Smiderle (2016) obtiveram valores de 32,3 GPa e 25,2 GPa, respectivamente, para esta mesma dosagem. Segundo Mehta e Monteiro (2008), esses valores são esperados para concretos convencionais e variam entre 14 e 40 GPa.

Para o coeficiente de Poisson foi encontrado o valor de 0,25. Esse valor é condizente ao proposto por Mehta e Monteiro (2008) para concretos, que fica em torno de 0,20. Já o valor do módulo de cisalhamento foi de 12,8 GPa.

As características elásticas de um material são utilizadas para medir sua rigidez. O substrato de concreto adotado apresentou módulos de deformação com rigidez condizente com o material e superior ao material de reparo (resina geopolimérica). A avaliação dos módulos de deformação das resinas geopoliméricas deste estudo é apresentada no item 4.3.2.5. Mazza (2010) destaca que a menor rigidez do material de reparo favorece a viga reconstituída.

#### 4.3.1.3. Rugosidade dos substratos

A rugosidade superficial do substrato foi avaliada e é um parâmetro importante que influencia diretamente no coeficiente de atrito e que, juntamente com a coesão, é responsável pelos mecanismos de aderência entre o substrato e a resina. Para esse trabalho, substratos com diferentes rugosidades não foram objeto

de estudo. Ainda assim, sua avaliação foi necessária para garantir que os valores obtidos fossem comparáveis entre si.

De acordo com a maioria das normas e, principalmente, para o Eurocode EN 1992-1-1 (2004), a avaliação da rugosidade superficial de substratos é meramente qualitativa, baseada principalmente na análise visual. Essa abordagem tem a desvantagem de ser subjetiva, pois depende da experiência do inspetor. Nesse estudo, a rugosidade superficial dos substratos cúbicos, cilíndricos e prismáticos de concreto convencional foi medida por um rugosímetro com laser adaptado, a fim de se ter uma avaliação quantitativa. O objetivo principal das medições era confirmar se os diferentes substratos apresentavam rugosidades superficiais próximas após receberem tratamento superficial (lixamento e limpeza). Com isso, foi possível realizar a comparação dos resultados obtidos pelos corpos-de-prova nos ensaios de cisalhamento.

Baseado na média de três medidas para cada superfície, foram determinados os perfis de rugosidade dos substratos (Figura 4.9 a 4.11) e os parâmetros de rugosidade correspondentes são mostrados na Tabela 4.10.

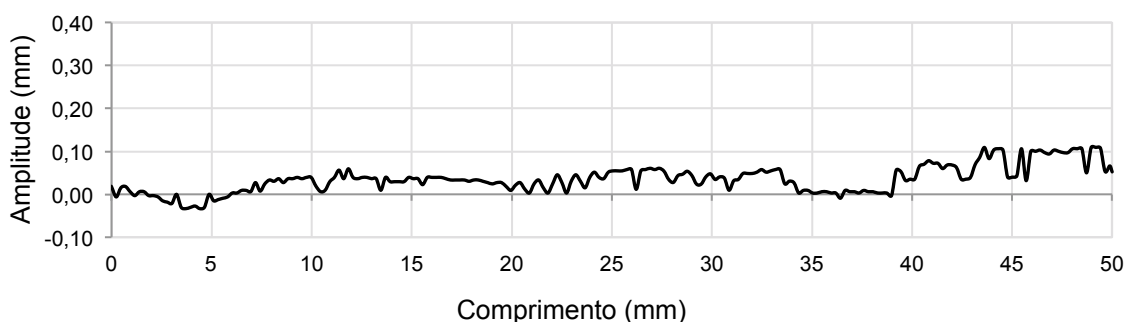


Figura 4.9: Perfil da rugosidade média da superfície dos blocos cúbicos de substrato.

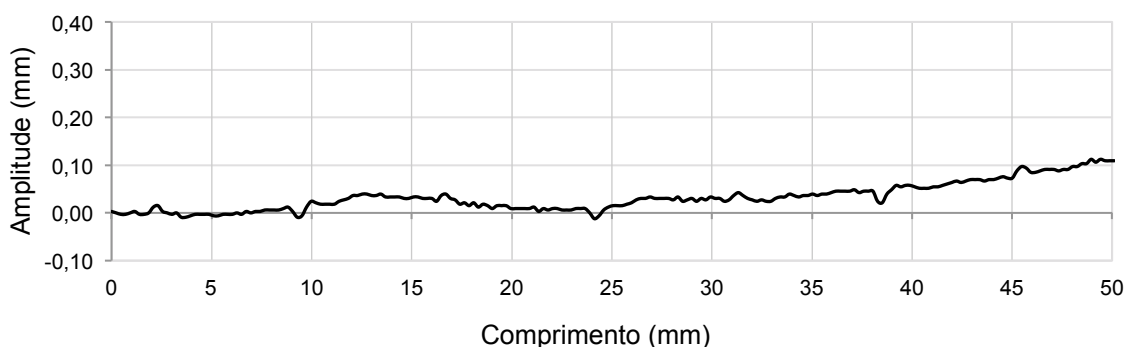


Figura 4.10: Perfil da rugosidade média da superfície dos corpos-de-prova semicilíndricos de substrato.

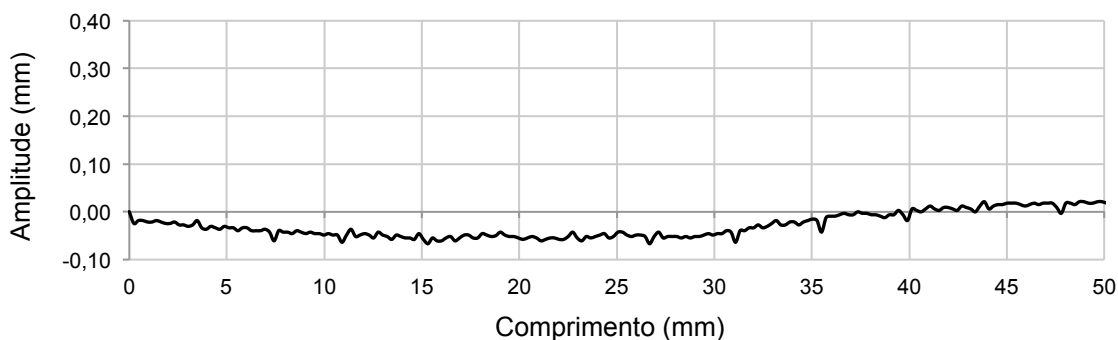


Figura 4.11: Perfil da rugosidade média da superfície dos corpos-de-prova prismáticos de substrato.

A Tabela 4.10 mostra que todas as superfícies dos substratos dos blocos cúbicos para os ensaios de cisalhamento duplo, os blocos prismáticos para os ensaios de cisalhamento por compressão axial (*slant shear test*) e os corpos-de-prova semicilíndricos para os ensaios de tração por compressão diametral (*splitting test*) obtiveram valor médio de rugosidade bem similares e homogêneos.

Bélaire *et al.* (2003) avaliou a rugosidade de superfícies de concreto e concluiu que é possível distingui-las em: macrorrugosidade com amplitude média entre 50 e 500  $\mu\text{m}$  e microrrugosidade com amplitude média menor do que 50  $\mu\text{m}$ . Todas as superfícies dos substratos do presente estudo apresentaram valores de amplitude média abaixo de 50  $\mu\text{m}$ , podendo ser classificadas, então, como superfícies microrrugosas. Este resultado era esperado, visto que as superfícies foram lixadas e não apicoadas ou tratadas por qualquer processo que pudesse promover ou aumentar a rugosidade das mesmas.

Tabela 4.10: Parâmetros de rugosidade dos substratos.

Substrato	<sup>1</sup> R <sub>m</sub> (mm)	<sup>2</sup> R <sub>p</sub> (mm)	<sup>3</sup> R <sub>pm</sub> (mm)	<sup>4</sup> R <sub>v</sub> (mm)	<sup>5</sup> R <sub>vm</sub> (mm)
Cúbico	0,035	0,109	0,041	0,033	0,016
Cilíndrico	0,033	0,112	0,038	0,012	0,005
Prismático	0,029	0,021	0,013	0,067	0,040

<sup>1</sup>R<sub>m</sub> = rugosidade média.

<sup>2</sup>R<sub>p</sub> = altura máxima do pico.

<sup>3</sup>R<sub>pm</sub> = altura média do pico.

<sup>4</sup>R<sub>v</sub> = profundidade máxima do vale.

<sup>5</sup>R<sub>vm</sub> = profundidade média do vale.

### 4.3.2. Resinas geopoliméricas

#### 4.3.2.1. Densidade de massa aparente

A Tabela 4.11 mostra os resultados da densidade de massa aparente no estado endurecido aos 28 dias para as resinas geopoliméricas, de acordo com a norma NBR 13280 (ABNT, 2005). Esta norma estabelece que o material em estudo pode ser enquadrado em seis classes existentes, como mostra a Tabela 4.12.

A diferença entre a densidade de massa no estado fresco e a densidade de massa no estado endurecido ( $\rho_{ap}$ ) é devido, principalmente, à saída de parte da água durante a secagem do material. De acordo com Costa (2016), para argamassas de cimento Portland curadas à temperatura ambiente há redução em torno de 3 a 11% na densidade de massa no estado endurecido em relação ao valor no estado fresco. As resinas geopoliméricas avaliadas nesse estudo, esta redução variou de aproximadamente 7,1 a 11%, resultado dentro da faixa de valores apresentado pelas argamassas de cimento Portland. É importante ressaltar que diferenças elevadas entre a densidade no estado endurecido e no estado fresco das resinas geopoliméricas indicariam maiores perdas de água no processo de secagem durante a cura e, conseqüentemente, levariam a maior retração por secagem, abertura de fissuras e maior quantidade de poros. Estes fatores podem interferir diretamente nos mecanismos relacionados aos ganhos de resistência das resinas e no processo de aderência ao substrato.

Tabela 4.11: Densidade de massa aparente das resinas geopoliméricas.

Resina	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
s.S – h.S	1683,5
s.S – h.P	1860,6
s.P – h.S	1775,1
s.P – h.P	1808,1

As resinas geopoliméricas ativadas com KOH (enquadradas na classificação M6), independentemente do silicato utilizado, apresentaram valores maiores de densidade de massa aparente em relação às resinas ativadas com NaOH (enquadradas na classificação M4).

Tabela 4.12: Classificação das argamassas quanto à densidade no estado endurecido aos 28 dias.

Método de ensaio	Classe	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
NBR 13280 ABNT (2005)	M1	≤ 1200
	M2	1000 a 1400
	M3	1200 a 1600
	M4	1400 a 1800
	M5	1600 a 2000
	M6	> 1800

A Tabela 4.13 mostra diferentes estudos de densidade de massa aparente para geopolímeros com diversas composições, precursores, soluções ativadoras alcalinas e tipos de cura. Vale ressaltar que essa diversidade de composição para obtenção dos materiais geopoliméricos resulta em valores distintos para suas propriedades, principalmente, para densidade de massa.

Tabela 4.13: Trabalhos relacionados com densidade de massa aparente para materiais geopoliméricos.

Pesquisador	Densidade de massa aparente, $\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Gokhan <i>et al.</i> (2014)	1552,9 - 1622,7
Saloma <i>et al.</i> (2016)	1750 - 1880
Azevedo <i>et al.</i> (2017)	1510 - 1630
Ding <i>et al.</i> (2017)	2400
Rangel (2017)	1799,1 – 2022,4
Oliveira (2018)	1891,4

#### 4.3.2.2. Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A Tabela 4.14 mostra os valores obtidos para absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade das resinas geopoliméricas. O coeficiente de capilaridade das resinas geopoliméricas produzidas com silicato de potássio apresentaram valores de 140 a 200% superiores aos obtidos pelas resinas produzidas com silicato de sódio alcalino.

Tabela 4.14: Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade das resinas geopoliméricas.

Resina	<sup>1</sup> A <sub>10</sub> (g/cm <sup>2</sup> )	<sup>2</sup> A <sub>90</sub> (g/cm <sup>2</sup> )	<sup>3</sup> C (g/dm <sup>2</sup> ·min <sup>1/2</sup> )
s.S – h.S	0,021	0,073	0,8
s.S – h.P	0,027	0,090	1,0
s.P – h.S	0,042	0,187	2,3
s.P – h.P	0,063	0,210	2,4

<sup>1</sup>A<sub>10</sub> = absorção por capilaridade por 10 minutos.

<sup>2</sup>A<sub>90</sub> = absorção por capilaridade por 90 minutos.

<sup>3</sup>C = coeficiente de capilaridade.

De acordo com a classificação da Tabela 4.15, as resinas geopoliméricas compostas por silicato de sódio alcalino se enquadram na classe C1 e as ativadas com silicato de potássio se enquadram na classe C2. Casos em que os coeficientes de capilaridade estão situados nas classes mais baixas indicam material com maior porosidade fechada, o que favorece a impermeabilidade. A impermeabilidade é uma característica desejável para a durabilidade das resinas quando utilizadas na reabilitação de estruturas. Em contrapartida, resinas com coeficientes de capilaridade em classes mais altas indicam maior quantidade de poros capilares que, além de possibilitarem o transporte de agentes agressivo através de sua massa, afetando a durabilidade, também conduzem, comprovadamente, a um material com menor resistência mecânica.

Tabela 4.15: Classificação das argamassas quanto ao coeficiente de capilaridade, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Método de ensaio	Classe	C (g/dm <sup>2</sup> ·min <sup>1/2</sup> )
NBR 15259 ABNT (2005)	C1	≤ 1,5
	C2	1,0 a 2,5
	C3	2,0 a 4,0
	C4	3,0 a 7,0
	C5	5,0 a 12,0
	C6	> 10

Rangel (2017) obteve como resultado valores de 0,37 e 3,87 g/dm<sup>2</sup>·min<sup>1/2</sup> para o coeficiente de capilaridade de argamassas geopoliméricas ativadas por NaOH e KOH, respectivamente. Os valores são condizentes aos obtidos neste

estudo em que os materiais ativados com sódio apresentam coeficientes de capilaridade menores.

#### 4.3.2.3. Absorção de água por imersão e porosidade aparente

A absorção de água por imersão e a porosidade aparente das resinas geopoliméricas são mostradas na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Absorção de água por imersão e porosidade aparente das resinas geopoliméricas.

Resina	<sup>1</sup> A (%)	<sup>2</sup> P (%)
s.S – h.S	21,41	32,53
s.S – h.P	16,32	27,93
s.P – h.S	20,06	32,59
s.P – h.P	19,61	32,45

<sup>1</sup>A = absorção de água por imersão.

<sup>2</sup>P = porosidade aparente.

Assim como a permeabilidade (porosidade aberta) está diretamente ligada à durabilidade do material, a porosidade aparente está relacionada à resistência mecânica. Com isso, resinas geopoliméricas que apresentem elevada porosidade podem alcançar resistência mecânica relativamente baixa e, conseqüentemente, potencial decréscimo na durabilidade. De acordo com a Tabela 4.16, as amostras apresentaram valores próximos entre si para estes índices físicos. Entretanto, as resinas geopoliméricas com hidróxido de potássio apresentaram valores de absorção de água e porosidade aparente um pouco inferiores às resinas ativadas com hidróxido de sódio. Considerando as resinas ativadas com mesmo silicato, porém com hidróxidos diferentes, essa relação se mantém e é possível observar que as resinas ativadas com silicato de sódio alcalino combinadas com os hidróxidos de sódio e potássio apresentaram diferença entre si mais expressiva, igual a 31% (absorção de água) e 16% (porosidade aparente), respectivamente, do que as resinas ativadas com silicato de potássio, cujas diferenças foram menores do que 2% entre si para os índices físicos deste tópico.



#### 4.3.2.4. Resistências à compressão e à tração por compressão diametral

Os resultados da resistência à compressão em função do tempo para as quatro resinas são mostradas na Figura 4.12 e na Tabela 4.17. Todas as resinas apresentaram aproximadamente a mesma resistência mecânica aos 28 dias, cerca de 80 MPa. Os valores são compatíveis com as curvas de resistência propostas na literatura (LASKAR e TALUKDAR, 2017; METHA e SIDDIQUE, 2017; ROCHA *et al.*, 2018; AZEVEDO *et al.*, 2019).

Como já esperado para os geopolímeros, os maiores ganhos de resistência à compressão foram observados nos primeiros dias. Os ganhos de resistência à compressão foram cerca de 60% após 1 dia, e variaram de 85 a 93% após 3 dias em relação à resistência à compressão obtida aos 28 dias. Isso se deve a maior quantidade de precursor disponível para as reações nos primeiros dias. Aos 90 dias os corpos-de-prova mantiveram os ganhos de resistência, porém em proporção menor, exceto as amostras de s.S – h.P, que tiveram aumento de resistência de aproximadamente 17%. O ganhos de resistência mecânica registrados nas idades iniciais são importantes, principalmente quando se trata do uso do material em serviços de recuperação de estruturas de concreto armado.

A resistência à compressão das resinas geopoliméricas ativadas com hidróxido de sódio apresentaram valores ligeiramente superiores. Esse fato era esperado, pois a dissolução de sílica e alumina em solução de NaOH altamente concentrada resulta em melhor geopolimerização (ALVAREZ-AYUSO *et al.*, 2008; CHINDAPRASIRT *et al.*, 2009; ZUHUA, *et al.*, 2009).

Ambily *et al.* (2013) desenvolveram um concreto geopolimérico de ultra-alto desempenho à base de escória granulada de alto-forno e sílica ativa, curado em temperatura ambiente. As resistências encontradas para o primeiro dia foram aproximadamente de 50% e de 78% após 7 dias, em relação à resistência aos 28 dias.

Segundo Cabral *et al.* (1999), recomenda-se que haja similaridade na resistência mecânica entre o material de reparo e o concreto do substrato. Em estudos anteriores Morgan (1996) relatou que um dos requisitos para as argamassas de reparo seria possuir resistência à compressão superior ao concreto do substrato. Dessa forma, todas as resinas geopoliméricas aqui estudadas atenderiam a esta recomendação.

Na ocorrência de elevado estado de tensão, a estrutura microporosa do geopolímero entra em colapso de forma lenta e progressiva, fazendo com que o mecanismo de ruptura se desenvolva em determinado intervalo de tempo, e não de forma brusca e rápida (PINTO, 2004). Este fenômeno foi verificado para todas as resinas deste estudo.

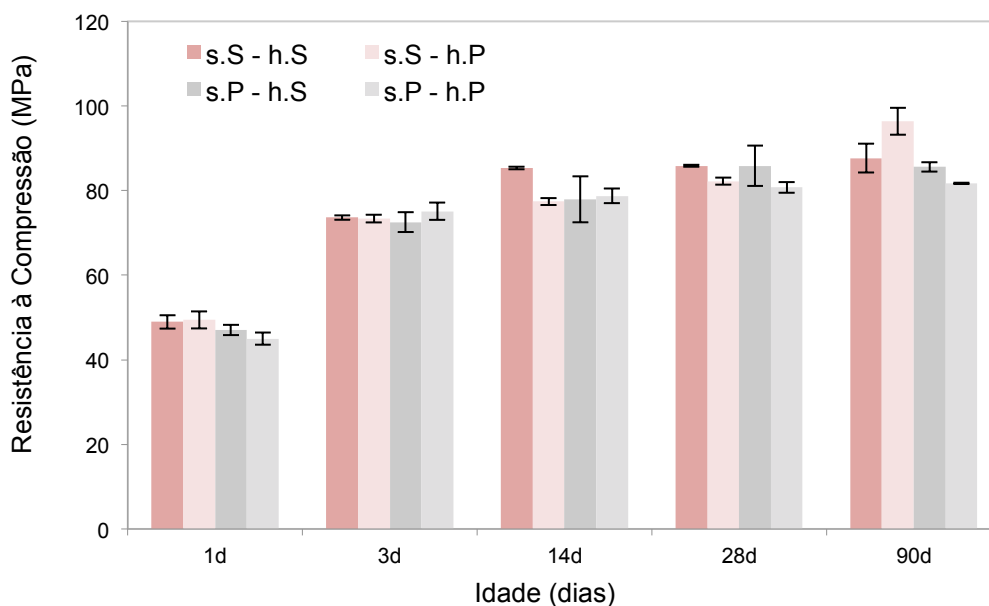


Figura 4.12: Resistência à compressão das resinas geopoliméricas em função da idade.

A resistência à tração por compressão diametral das resinas geopoliméricas aos 28 dias é mostrada na Tabela 4.18. Os valores variaram de 6,8 a 7,1% em relação à resistência à compressão aos 28 dias. Esses resultados foram comparados com valores teóricos propostos pelas equações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e pelos estudos experimentais de Rocha *et al.* (2018) sobre argamassas geopoliméricas à base de metacaulim ativadas com silicatos e hidróxidos combinados, cujos valores variaram entre 4,9 e 6,1%.

A Figura 4.13 mostra o tipo de ruptura das resinas geopoliméricas em corpos-de-prova cilíndricos. Verifica-se na Figura 4.13a que o modo de ruptura do corpo-de-prova da resina geopolimérica manteve a mesma tendência do concreto, que, segundo a ABNT NBR 5739 (2007), é do Tipo A - cônica.

Tabela 4.17: Resistências médias à compressão das resinas geopoliméricas.

Resistência à compressão				
Resina	Idade (dias)	$f_{cm}$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	C.V. (%)
s.S – h.S	1	48,95	1,58	3,24
	3	73,63	0,53	0,72
	14	85,32	0,33	0,39
	28	85,86	0,26	0,30
	90	87,66	3,40	3,87
s.S – h.P	1	49,39	1,98	4,01
	3	73,36	0,90	1,22
	14	77,42	0,83	1,08
	28	82,23	0,86	1,04
	90	96,36	3,19	3,31
s.P – h.S	1	47,01	1,18	2,51
	3	72,53	2,33	3,22
	14	77,93	5,43	6,97
	28	85,81	4,78	5,57
	90	85,61	1,12	1,31
s.P – h.P	1	44,96	1,43	3,19
	3	75,11	2,09	2,78
	14	78,73	1,70	2,16
	28	80,76	1,28	1,59
	90	81,66	0,17	0,21

Tabela 4.18: Resistências médias à tração por compressão diametral das resinas geopoliméricas.

Resina geopolimérica	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		
	Presente estudo	Rocha <i>et al.</i> (2018)	NBR 6118 (ABNT, 2014)
s.S – h.S	5,80 ± 0,08	5,20 ± 0,70	4,97
s.S – h.P	5,75 ± 0,05	4,10 ± 0,30	4,89
s.P – h.S	6,03 ± 0,05	4,90 ± 0,60	4,97
s.P – h.P	5,77 ± 0,21	4,00 ± 0,30	4,41

A ruptura das resinas geopoliméricas no ensaio de tração por compressão diametral também ocorreu de maneira similar ao concreto convencional e, de acordo a ABNT NBR 7222 (1994), é por fendilhamento devido à tração indireta (Figura 4.13.b).

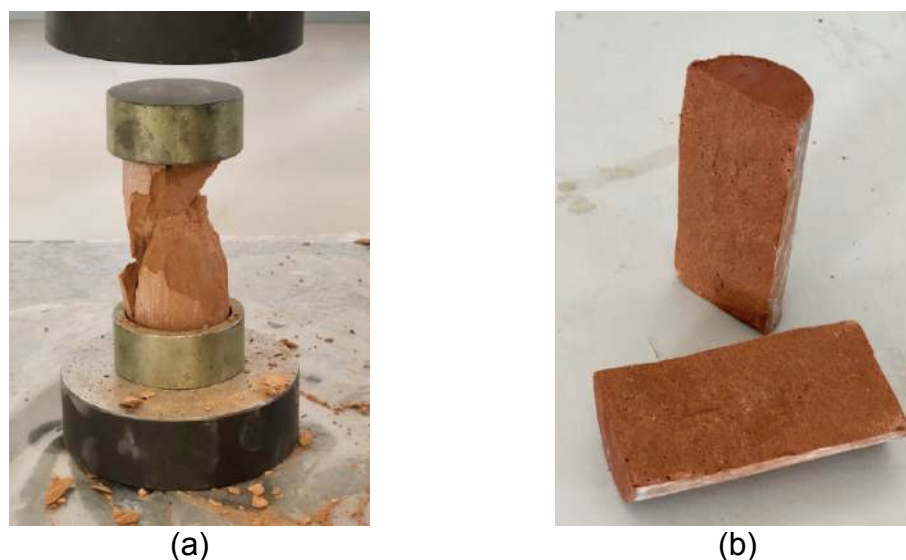


Figura 4.13: Tipo de ruptura das resinas geopoliméricas: (a) ensaio de resistência à compressão axial; (b) ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

#### 4.3.2.5. Módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson

O módulo de elasticidade longitudinal dos geopolímeros depende de várias propriedades relacionadas à composição química, microestrutura, tempo e temperatura de cura, dentre outros (DUXON *et al.*, 2007; KAMSEU *et al.*, 2013; YUAN *et al.*, 2016b).

A Tabela 4.19 mostra o módulo de elasticidade aos 28 dias, calculado de acordo com as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2008), conforme metodologias A (tensão fixa) e B (deformação específica fixa), o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson das resinas geopoliméricas. As curvas tensão *versus* deformação são mostradas nas Figuras 4.14 a 4.17.

Tabela 4.19: Módulo de elasticidade longitudinal, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson das resinas geopoliméricas, aos 28 dias.

Resina geopolimérica	Módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa)	Módulo de cisalhamento (GPa)	Coeficiente de Poisson
s.S – h.S	17,84	7,39	0,21
	17,86	7,40	
s.S – h.P	15,25	6,51	0,17
	15,30	6,53	
s.P – h.S	13,79	5,85	0,18
	13,86	5,88	
s.P – h.P	11,54	4,92	0,17
	11,68	4,98	

Duxson *et al.* (2007) observaram que o módulo de elasticidade dos geopolímeros aumenta quanto maior a relação Si/Al. Para a relação Si/Al = 1,90, os valores obtidos para o módulo de elasticidade foram bem próximos, independentemente da composição da solução ativadora alcalina. As resinas geopoliméricas deste estudo apresentaram valores da relação Si/Al entre 1,89 e 1,97, como visto na seção 4.1. Duxson *et al.* (2007) também sugerem que amostras fabricadas com hidróxido de potássio, geralmente, apresentam módulos de elasticidade menores do que as amostras com hidróxido de sódio para relação Si/Al entre 1,15 e 1,90, para um mesmo tipo de silicato utilizado na mistura. Diante dessa afirmação, os resultados mostram que a resina s.S – h.S apresentou valores de 17 e 14% maiores em relação à resina s.S – h.P para os módulos de elasticidade e cisalhamento, respectivamente. Já a resina s.P – h.S apresentou valores maiores, da ordem de 20 e 19%, em relação à resina s.P – h.P para os módulos de elasticidade e de cisalhamento, respectivamente. As resinas geopoliméricas produzidas com soluções alcalinas mistas (silicatos e hidróxidos de sódio e potássio) exibiram valores intermediários.

Os valores encontrados para os módulos de elasticidade das resinas geopoliméricas foram próximos aos obtidos em outros estudos (MAZZA, 2010 e FRANÇA, 2017), que encontraram valores entre 10,5 e 17,1 GPa. Porém, os mesmos apresentaram valores relativamente mais baixos quando comparados àqueles obtidos para concretos de cimento Portland.

Morgan (1996), Dal Molin *et al.* (2000), Moreno e Selmo (2001) apresentam conclusões controversas em relação ao módulo de elasticidade e de cisalhamento de materiais utilizados em reparos, pois acreditam que o importante é que esses materiais sejam mais rígidos do que o substrato. Em contrapartida, outros autores acreditam que os materiais de reparo com elevada rigidez devem ser evitados, pois podem gerar concentrações de tensões inesperadas na região reparada (VELASCO, 2008). Assim, resinas geopoliméricas com menor rigidez em relação ao substrato são vantajosas no caso de reabilitação de estruturas, dado que esse material pode assumir maiores estados de deformação sem provocar maior fissuração em relação a substratos com maior rigidez. Logo, a definição das propriedades elásticas é parâmetro determinante na escolha do material de reparo, pois favorece ao bom desempenho do mecanismo reparo/substrato.

Os coeficientes de Poisson das resinas geopoliméricas deste estudo são próximos aos relatados por Hardjito *et al.* (2005) e Diaz-Loya *et al.* (2010). A Tabela 4.19 mostra que as resinas geopoliméricas ativadas com hidróxido de sódio apresentaram valores um pouco superiores em relação às ativadas com hidróxido de potássio. Da mesma forma, Rocha *et al.* (2017) obteve valores para coeficiente de Poisson entre 0,20 e 0,24 para argamassas ativadas com hidróxido de sódio, e valores entre 0,13 e 0,17 para argamassas ativadas com hidróxido de potássio.

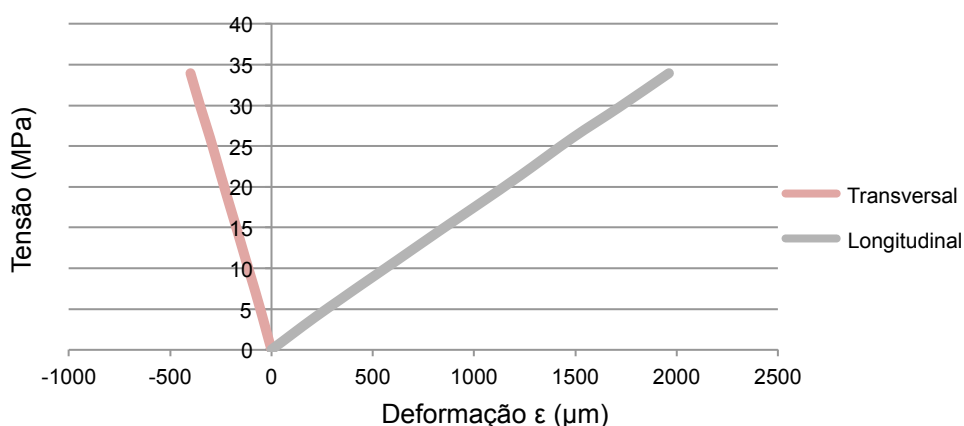


Figura 4.14: Curva tensão *versus* deformação da resina s.S – h.S até 40% da resistência máxima à compressão.

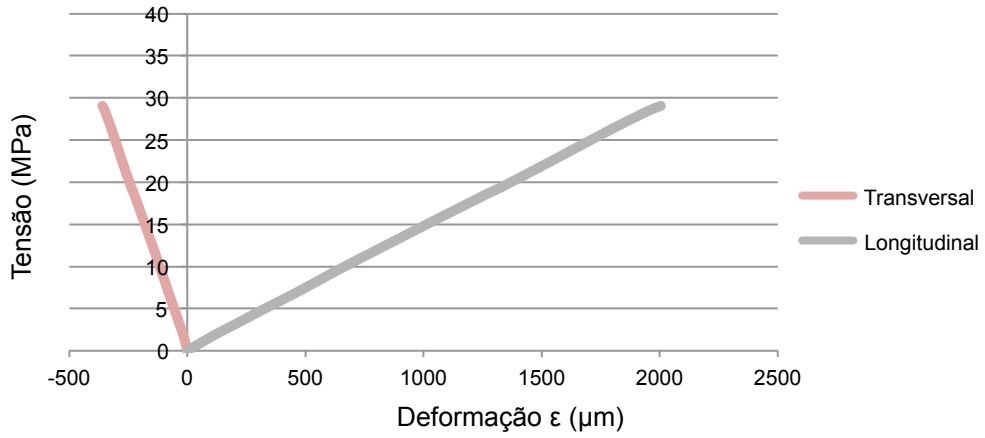


Figura 4.15: Curva tensão *versus* deformação da resina s.S – h.P até 40% da resistência máxima à compressão.

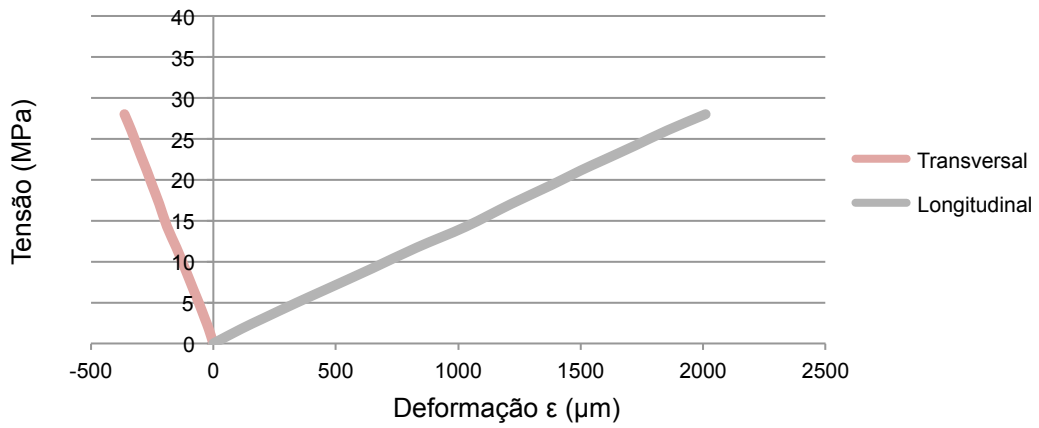


Figura 4.16: Curva tensão *versus* deformação da resina s.P – h.S até 40% da resistência máxima à compressão.

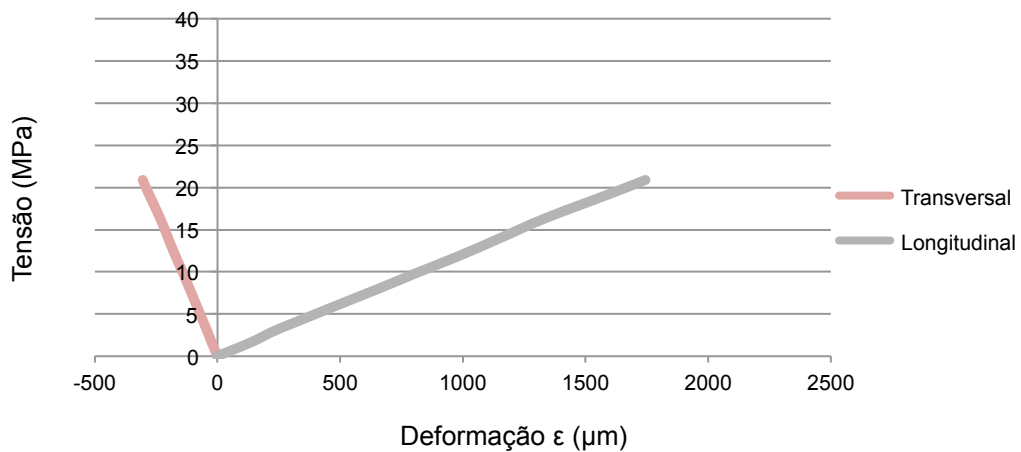


Figura 4.17: Curva tensão *versus* deformação da resina s.P – h.P até 40% da resistência máxima à compressão.

#### 4.3.2.6. Resistência à tração na flexão

As resistências média à tração na flexão e à compressão aos 28 dias são mostradas na Tabela 4.20. Os valores para a resistência à tração na flexão variaram de 7,49 a 9,11 MPa. De acordo com Silva (2001), um material de reparo deve alcançar um valor mínimo de 2 MPa para a resistência à flexão; portanto, segundo a classificação proposta por aquele autor, todas as resinas geopoliméricas atenderam a este requisito.

As resistências normalizadas das resinas geopoliméricas ativadas com silicato de sódio alcalino combinadas com hidróxido de sódio e aquelas combinadas com hidróxido de potássio apresentaram valores muito próximos de 0,10 e 0,11, respectivamente. Já as resinas ativadas com silicato de potássio, independentemente do hidróxido utilizado, apresentaram o mesmo valor de 0,12.

Rangel (2017) realizou estudos em argamassas à base de metacaulim ativado com hidróxidos de potássio e de sódio que alcançaram os valores de 1,03 e 4,64 MPa, respectivamente, para resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Murta (2008) obteve relação de 11,2% entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão para argamassas ativadas com cal virgem. Para argamassas de cimento Portland o valor de 10% é relativamente comum.

Tabela 4.20: Resistências média à tração na flexão e à compressão aos 28 dias das resinas geopoliméricas.

Resina geopolimérica	$^1R_f$ (MPa)	$^2R_c$ (MPa)	$^3R_f/R_c$
s.S – h.S	7,49 ± 0,65	78,02 ± 1,78	0,10
s.S – h.P	8,09 ± 1,05	76,12 ± 2,06	0,11
s.P – h.S	9,11 ± 0,77	74,60 ± 3,65	0,12
s.P – h.P	8,81 ± 0,50	71,20 ± 3,84	0,12

$^1R_f$  = resistência média à tração na flexão aos 28 dias.

$^2R_c$  = resistência média à compressão aos 28 dias.

$^3R_f/R_c$  = resistência normalizada.

A Figura 4.18 mostra o ensaio dos corpos-de-prova das resinas quando submetidos à tração na flexão a três pontos. A ruptura ocorreu em um plano oblíquo na região central do corpo-de-prova, sendo do tipo frágil, não-catastrófica, em que a carga máxima alcançada coincidiu com o início de formação da fissura e da fratura do material.





Figura 4.18: Ruptura do corpo-de-prova prismático de resina geopolimérica no ensaio de tração na flexão em 3 pontos.

#### 4.3.2.7. Resistência ao cisalhamento pelo método Iosipescu

As Figuras 4.19 a 4.23 mostram os pontos obtidos para os valores de tensão de cisalhamento em função da deformação representadas pelas curvas (linhas de tendência) para as resinas geopoliméricas e epóxi comercial. A linha de tendência linear adotada foi a que mais se aproximou da dispersão dos pontos. As curvas apresentaram comportamento e tendência semelhantes aos relatados na literatura (ASTM D5379, 1998; TEW, 2001; MORIN *et al.*, 2011; BRU *et al.*, 2017; STOJCEVSKI *et al.*, 2018). Na fase inicial dos ensaios, as cargas baixas geraram deformações insignificantes (inferiores a 200  $\mu\text{m}$ ). Em seguida, quando os carregamentos atingiram aproximadamente 25% da capacidade máxima, a magnitude das tensões e das deformações aumentaram significativamente até o aparecimento das primeiras fissuras na região do entalhe. Por fim, os corpos-de-prova atingiram a capacidade portante máxima e romperam de maneira abrupta com o aumento e a propagação das fissuras.

As resinas geopoliméricas apresentaram valores da ordem de 1000 a 2000  $\mu\text{m}$  de deformação para a tensão máxima de cisalhamento. Já a resina epóxi alcançou maior deformação, de aproximadamente 9000  $\mu\text{m}$ . Cabe ressaltar que alguns corpos-de-prova durante o ensaio pelo método Iosipescu apresentaram comportamento atípico e foram descartados das análises.

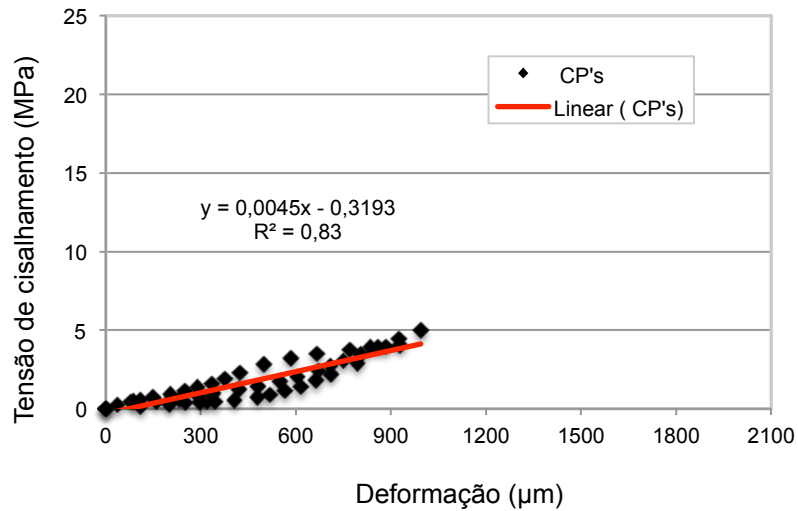


Figura 4.19: Curva tensão de cisalhamento *versus* deformação da resina geopolimérica s.S – h.S.

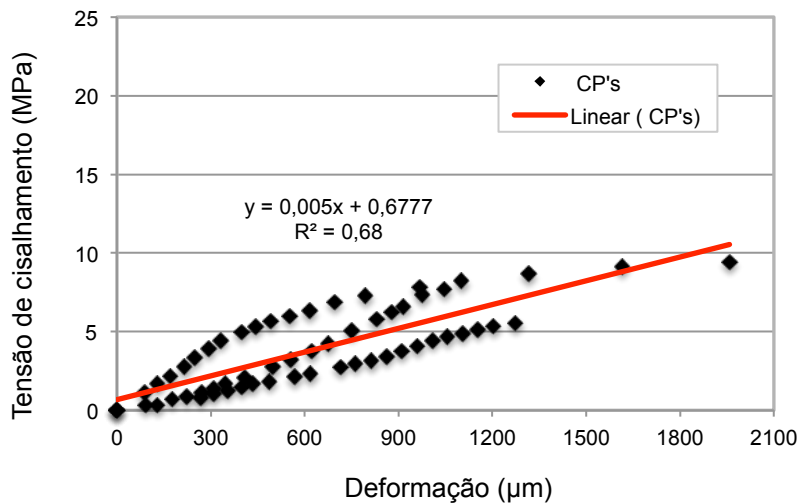


Figura 4.20: Curva tensão de cisalhamento *versus* deformação da resina geopolimérica s.S – h.P.

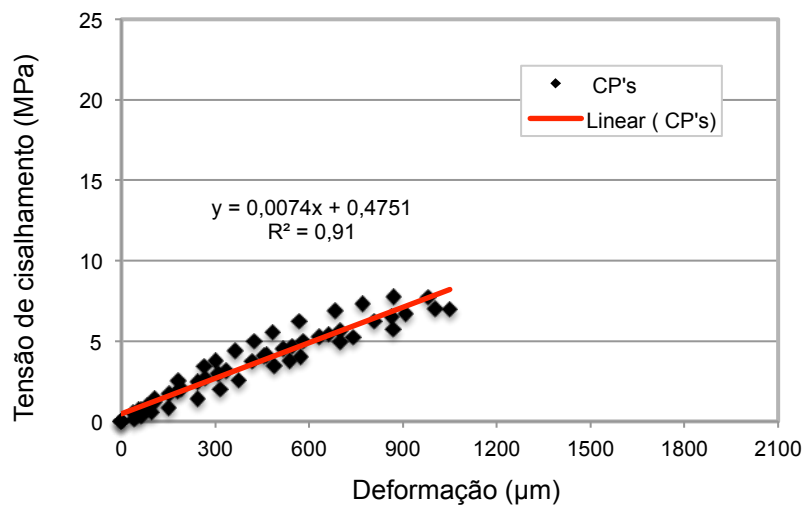


Figura 4.21: Curva tensão de cisalhamento *versus* deformação da resina geopolimérica s.P – h.S.

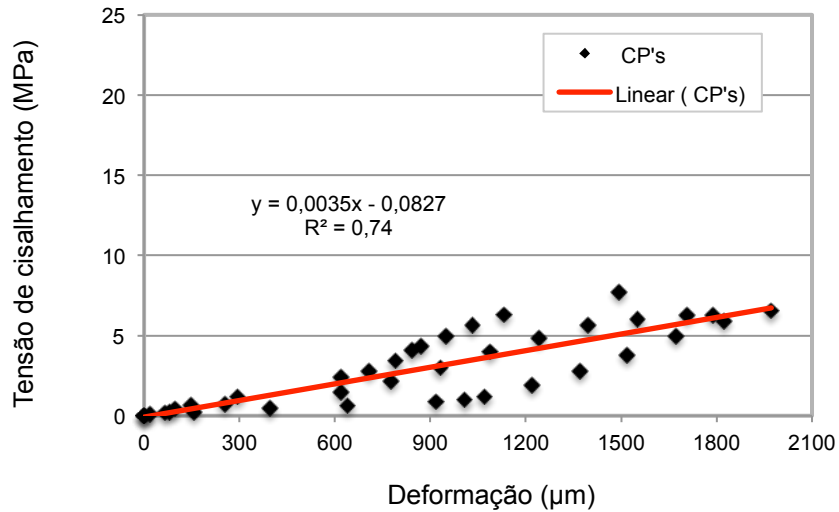


Figura 4.22: Curva tensão de cisalhamento *versus* deformação da resina geopolimérica s.P – h.P.

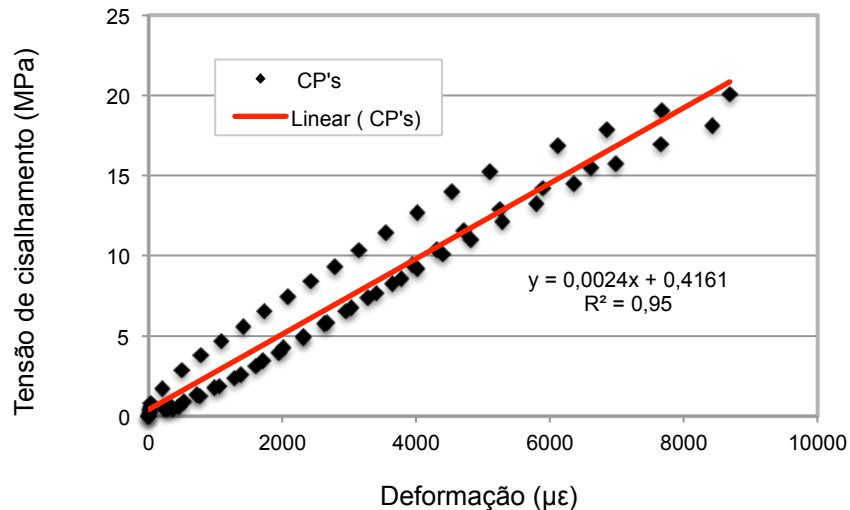


Figura 4.23: Curva tensão de cisalhamento *versus* deformação da resina epóxi comercial.

A tensão de cisalhamento e o módulo de cisalhamento elástico foram calculados seguindo as prescrições da ASTM D5379 (1998) e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.21. Os resultados obtidos no programa experimental para o módulo de cisalhamento foram comparados àqueles obtidos pela definição clássica de  $G$ , de acordo com a Equação 3.15 descrita no item 3.2.8.6 e proposta pela NBR 8522 (ABNT, 2017).

As resinas geopoliméricas apresentaram valores de tensão de cisalhamento ( $\tau_{12}$ ) entre 4,31 e 7,55 MPa e de 3,40 e 8,20 GPa para o módulo de cisalhamento ( $G_{12}$ ). As resinas geopoliméricas produzidas com silicatos e hidróxidos mistos (s.S – h.P e s.P – h.S) apresentaram valores para o módulo de cisalhamento de 36 a 141%

superiores em relação as resinas geopoliméricas s.S – h.S e s.P – h.P e de 91 a 156% maiores em comparação com a resina epóxi comercial. As resinas geopoliméricas s.S – h.P e s.P – h.S alcançaram valores superiores para estes parâmetros ( $\tau_{12}$  e  $G_{12}$ ) por possuírem microestrutura mais densa e homogênea, conforme mostra a análise microestrutural descrita no item 3.4. Na Tabela 4.21 observa-se que os valores do módulo de cisalhamento obtidos são superiores aos calculados teoricamente, pois estes últimos levam em consideração somente parâmetros mecânicos. Os valores de tensão de cisalhamento e do módulo de cisalhamento da resina epóxi comercial foram 17,88 MPa e 3,20 GPa, respectivamente. A resina epóxi comercial alcançou níveis superiores de deformação e, conseqüentemente, valores relativamente inferiores de módulo de cisalhamento em relação aos das resinas geopoliméricas.

Estudos realizados com diferentes tipos de resina epóxi encontraram valores de 1,4 a 5,0 GPa para o módulo de cisalhamento (GONÇALVES *et al.*, 2009; TEW *et al.*, 2001). Porém, estudos sobre as propriedades de cisalhamento utilizando-se o método losipescu são mais comuns em compósitos de matriz polimérica (MORTON *et al.*, 1992; ODEGRAD *et al.*, 2000). Gonçalves *et al.* (2009) utilizaram resinas epóxi reforçadas por fibras de vidro e de carbono e obtiveram, respectivamente, valores de módulo de cisalhamento iguais a 7,7 e 35 GPa. Já o comportamento ao cisalhamento de compósitos de matriz cimentícia reforçados com 2% de fibras de acetato de polivinila (PVA) foi investigado por Baghi *et al.* (2016), que obtiveram valor de aproximadamente 4 MPa para resistência máxima ao cisalhamento com deformação de 500  $\mu\text{m}$ .

Tabela 4.21: Tensão de cisalhamento e módulo de cisalhamento das resinas geopoliméricas e da resina epóxi comercial aos 28 dias.

Resina	$\tau_{12}$ (MPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G$ (GPa) NBR 8522 (ABNT, 2017)
s.S – h.S	4,31 $\pm$ 0,47	4,50	7,39
s.S – h.P	7,55 $\pm$ 1,58	6,13	6,51
s.P – h.S	6,97 $\pm$ 0,79	8,20	5,85
s.P – h.P	6,84 $\pm$ 0,62	3,40	4,92
Epóxi comercial	17,88 $\pm$ 1,89	3,20	1,30

A análise dos dados de carregamento em relação às deformações revelou que os corpos-de-prova romperam por cisalhamento, indicado pela queda abrupta no carregamento. A ASTM D 5379 (1998) especifica padrões de ruptura aceitáveis para o método losipescu. A Figura 4.24 mostra este padrão de ruptura, tanto das resinas geopoliméricas quanto da epóxi comercial. Este tipo de ruptura ocorreu na região do entalhe antes que ocorresse o esmagamento local na linha de carregamento, comportamento comum de materiais isotrópicos e, também, de compósitos com boa aderência fibra-matriz.

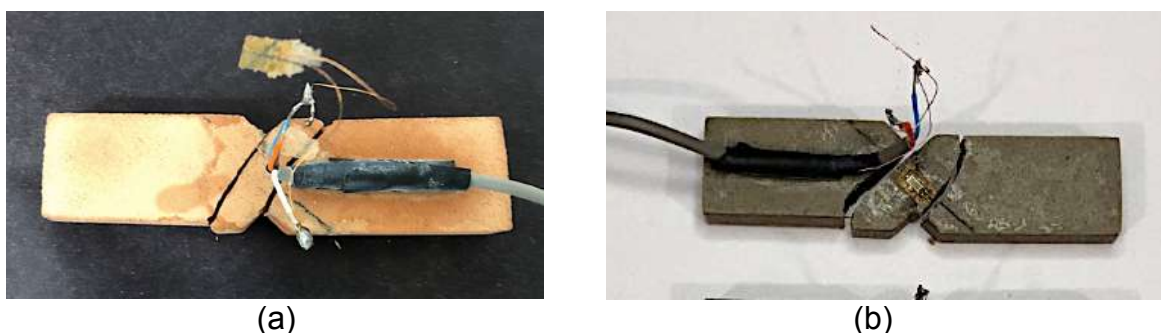


Figura 4.24: Modo de ruptura dos corpos-de-prova pelo método losipescu: (a) resinas geopoliméricas; (b) resina epóxi comercial.

#### 4.3.2.8. Resistência ao cisalhamento duplo

Os resultados dos ensaios de cisalhamento duplo são mostrados na Figura 4.25 e nas Tabelas 4.22. e 4.23. Os valores são apresentados em termos de resistência média com seu respectivo desvio-padrão. A resistência ao cisalhamento nas interfaces substrato-resina e substrato-resina-chapa de aço indicada nas Tabelas 4.22 e 4.23 é expressa pelo valor máximo da carga aplicada na superfície do cubo central e que, por sua vez, é distribuída em duas partes iguais nas duas superfícies de cisalhamento entre os cubos laterais. Este valor foi calculado pelo valor da carga máxima dividido pela área total de cisalhamento nominal de  $5000 \text{ mm}^2$ . Portanto, o deslocamento considerado é o máximo vertical do cubo central em relação aos dois cubos nas extremidades, determinado a partir da curva carga *versus* deslocamento na carga máxima.

Os substratos de concreto colados apenas com as resinas e os substratos colados com todas as resinas e as chapas de aço apresentaram resultados próximos entre si e variabilidade relativamente baixa, exceto para a resina s.S – h.P, que apresentou valor inferior, mesmo tendo apresentado boa resistência mecânica

nos ensaios de caracterização, com valores próximos aos encontrados para as outras resinas geopoliméricas.

Larralde *et al.* (2001) realizaram ensaios de cisalhamento duplo para avaliar a adesão de polímeros reforçados com fibras colados aos substratos de concreto com resina epóxi e resina poliéster. Os ensaios realizados com a resina epóxi apresentaram valor médio de 1,15 MPa para resistência ao cisalhamento e de 0,71 MPa para as amostras coladas com resina poliéster.

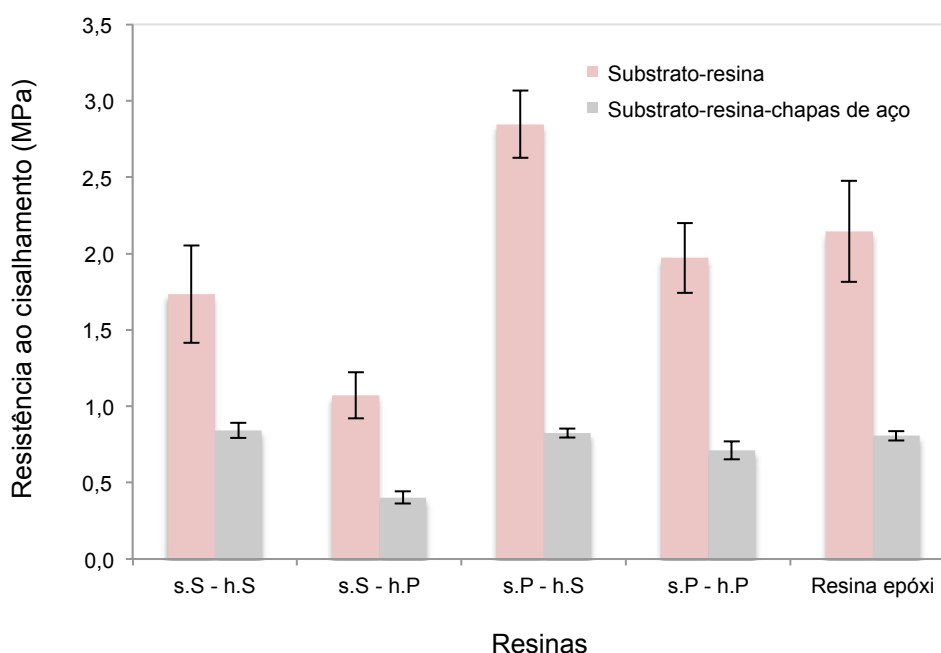


Figura 4.25: Resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina e substrato-resina-chapa de aço.

As Tabelas 4.22 e 4.23 também apresentam os valores da resistência ao cisalhamento em função da resistência à compressão das resinas ( $\tau_b/f_{cm}$ ) para fins de comparação. Os corpos-de-prova sem chapas de aço e colados com as resinas geopoliméricas produzidas com silicato de potássio apresentaram valores superiores de, aproximadamente, 75 a 170% em relação às resinas produzidas com silicato de sódio alcalino (com hidróxido de sódio e potássio, respectivamente). É possível destacar que a resina s.P – h.S registrou valor 13% superior ao alcançado pela resina epóxi. Entretanto, as resinas s.P – h.P, s.S – h.S e s.S – h.P não apresentaram valores superiores à da resina epóxi comercial, porém atingiram desempenho de, aproximadamente, 90, 65 e 42%, respectivamente, em relação ao valor registrado pela resina epóxi comercial.

Para esse caso, os corpos-de-prova e as chapas de aço colados com as resinas s.P – h.P e s.S – h.S apresentaram os mesmos valores que os colados com a resina epóxi, que foi de 0,011. A resina s.P – h.S apresentou um valor um pouco abaixo de 0,10, que representa cerca de 90% do valor obtido pela resina epóxi. Os corpos-de-prova com chapas de aço coladas com todas as resinas apresentaram valores menores de resistência ao cisalhamento que os corpos-de-prova colados somente com as resinas. Este fato provavelmente se deve a maior quantidade de interfaces (substrato-resina-aço) gerada na colagem dos blocos, além das superfícies mais lisas das chapas de aço em relação ao substrato.

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram as curvas de resistência ao cisalhamento normalizada ( $\tau_b/f_{cm}$ ) em função do deslocamento. As curvas obtidas pelos blocos colados com todas as resinas e sem as chapas de aço apresentaram trecho inicial com tensões relativamente baixas. A partir do deslocamento de aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  todas as curvas aumentaram os níveis de tensão de forma considerável até alcançarem a ruptura brusca, que ocorreu entre os deslocamentos máximos de 1157 a 1457  $\mu\text{m}$ . Já os blocos colados com todas as resinas e chapas de aço apresentaram aumento nos deslocamentos desde os níveis mais baixos de carga. A ruptura dos corpos-de-prova ocorreu para deslocamento máximo entre 1014 e 1190  $\mu\text{m}$ , exceto a resina s.S – h.P, que atingiu valor de resistência ao cisalhamento inferior a 0,40 MPa e 692  $\mu\text{m}$  de deslocamento máximo.

Tabela 4.22: Valores médios da resistência ao cisalhamento e deslocamento máximo na interface substrato e resinas.

Resina	Resistência ao cisalhamento $\tau_b$ (MPa)	$\tau_b/f_{cm}$	Deslocamento máximo ( $\mu\text{m}$ )
s.S – h.S	1,73 $\pm$ 0,32	0,020	1262 $\pm$ 186
s.S – h.P	1,07 $\pm$ 0,15	0,013	1157 $\pm$ 196
s.P – h.S	2,85 $\pm$ 0,22	0,035	1435 $\pm$ 21
s.P – h.P	1,97 $\pm$ 0,23	0,027	1428 $\pm$ 244
Epóxi comercial	2,14 $\pm$ 0,33	0,031	1457 $\pm$ 230

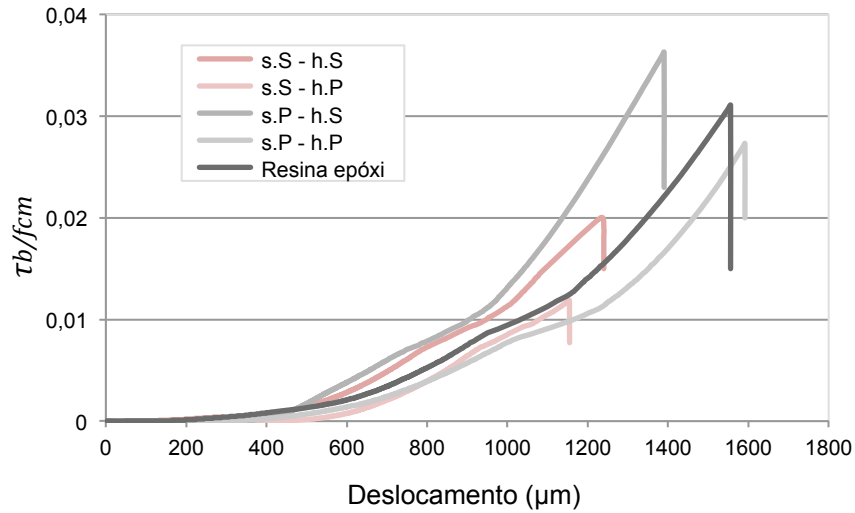


Figura 4.26: Valores médios da resistência ao cisalhamento normalizada do substrato-resina em função do deslocamento.

Tabela 4.23: Valores médios da resistência ao cisalhamento e deslocamento máximo na interface substrato, resina e chapa de aço.

Resina	Resistência ao cisalhamento (MPa)	$\tau_b / f_{cm}$	Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )
s.S – h.S	0,84 ± 0,05	0,011	1169 ± 251
s.S – h.P	0,40 ± 0,04	0,006	692 ± 127
s.P – h.S	0,82 ± 0,03	0,010	1190 ± 188
s.P – h.P	0,71 ± 0,06	0,011	1096 ± 147
Epóxi comercial	0,81 ± 0,03	0,011	1014 ± 238

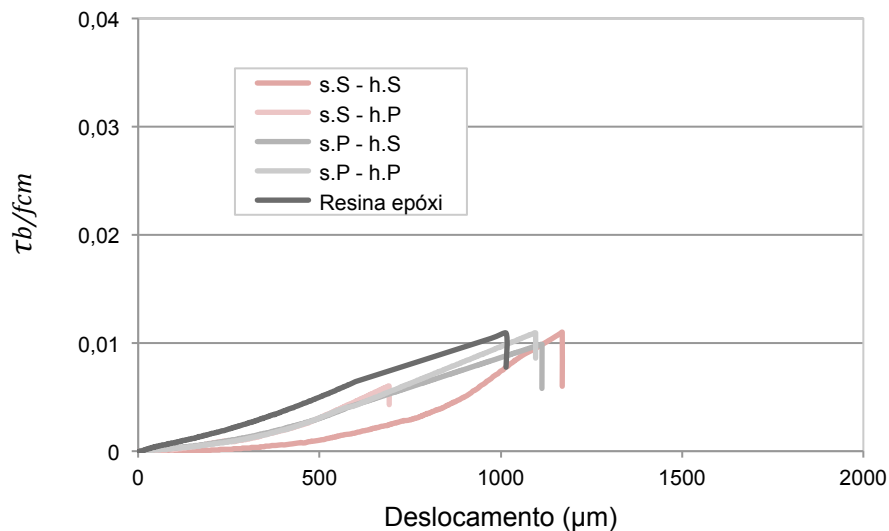


Figura 4.27: Valores médios da resistência ao cisalhamento normalizada do substrato-resina-chapa de aço em função do deslocamento.



As Figuras 4.28 e 4.29 mostram os modos de ruptura dos corpos-de-prova colados com todas as resinas e pelos corpos-de-prova com chapas de aço colados com todas as resinas. Foram observados dois tipos de ruptura para os ensaios realizados nesse estudo. Um deles indica a ruptura na interface substrato-resina, predominantemente na resina e com pouco ou nenhum dano ao substrato. Outra forma consiste na ruptura do substrato, que indica uma condição na qual a resistência de aderência na interface foi maior do que a resistência ao cisalhamento do próprio substrato. A maioria dos corpos-de-prova colados com as resinas geopoliméricas apresentou ruptura na interface com dano parcial ao substrato, exceto para resina epóxi comercial, em que a ruptura se deu integralmente no substrato (Figura 4.28e).

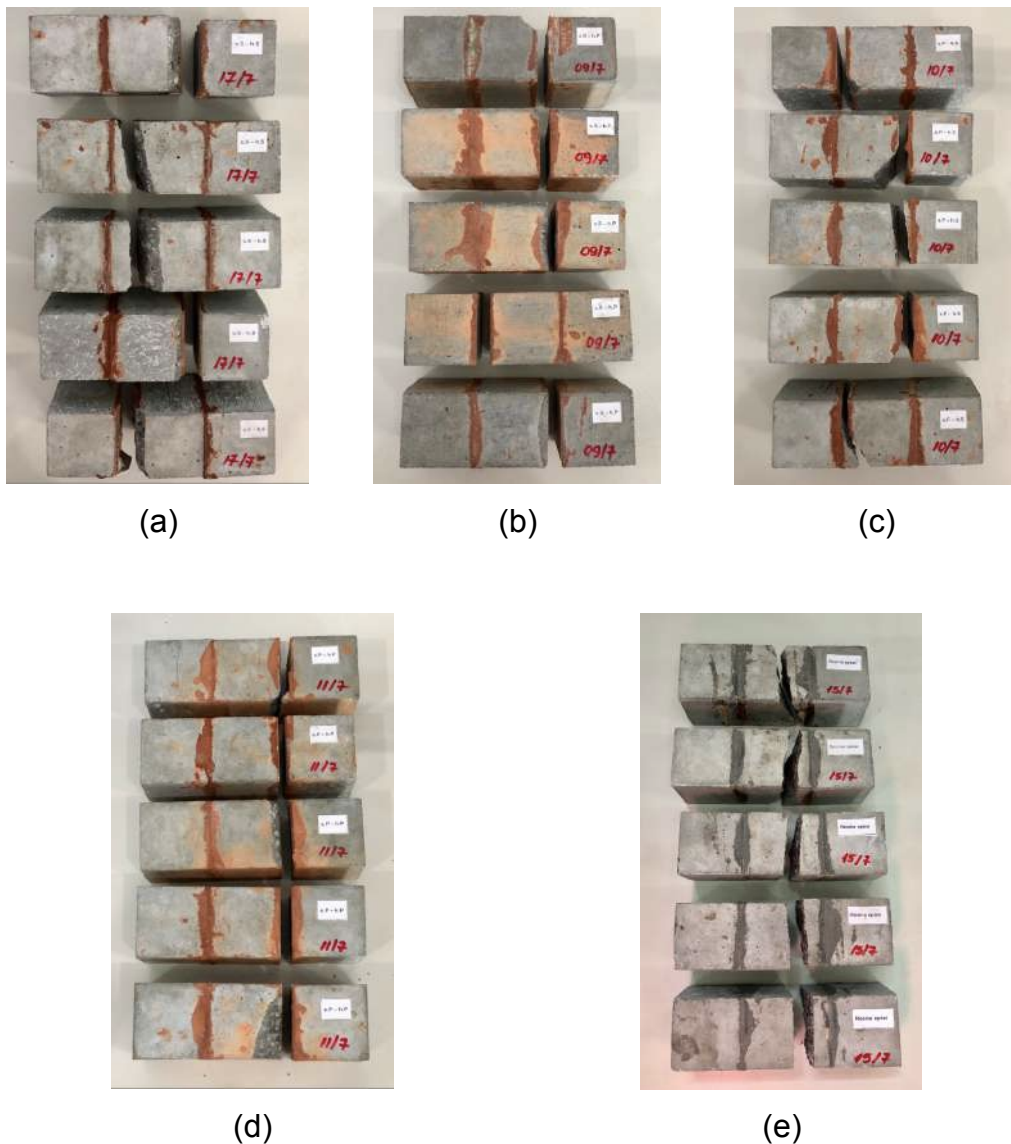


Figura 4.28: Modo de ruptura dos blocos cúbicos colados com resinas: (a) s.S – h.S; (b) s.S – h.P; (c) s.P – h.S; (d) s.P – h.P; (e) epóxi comercial.

Já nos ensaios dos corpos-de-prova com chapas de aço colados com todas as resinas, a ruptura ocorreu na interface para todas as amostras (Figura 4.29). Os ensaios realizados por Larrade *et al.* (2001) apresentaram ruptura no substrato para a resina epóxi e uma combinação de ruptura na interface e parte do concreto, nas amostras coladas com resina poliéster.

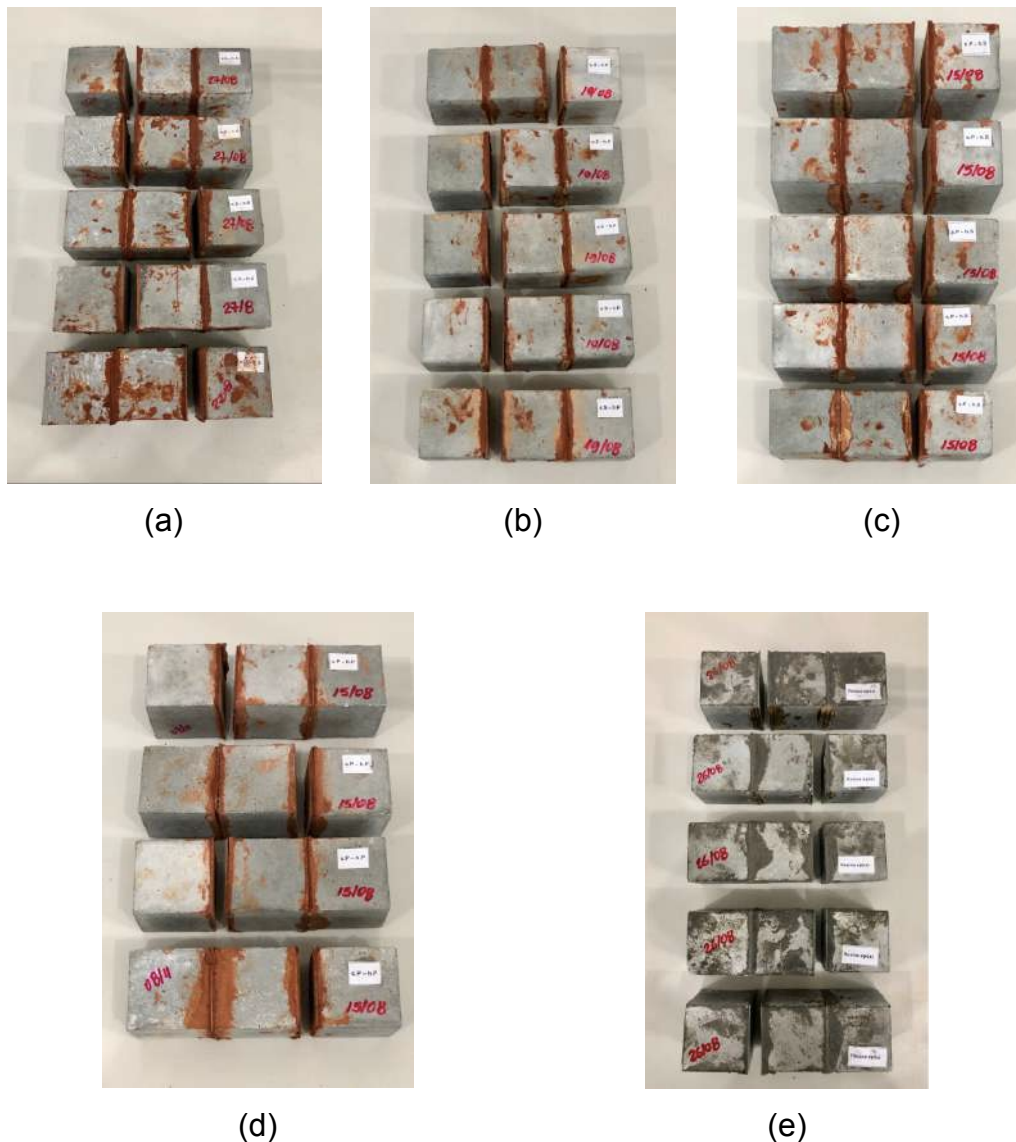


Figura 4.29: Modo de ruptura dos blocos cúbicos e chapas de aço coladas com resinas: (a) s.S – h.S; (b) s.S – h.P; (c) s.P – h.S; (d) s.P – h.P; (e) epóxi comercial.

O ensaio de cisalhamento apresentado nesse item, embora não represente exatamente as condições de campo, oferece alternativa fácil de execução em laboratório. O ensaio fornece uma estimativa da aderência pela resistência ao cisalhamento entre substrato-resina e substrato-resina-aço. Dessa forma, pode-se obter informações sobre o desempenho potencial de materiais alternativos que,

futuramente, podem ser adotados em projetos de recuperação estrutural. Cabe ressaltar que a colagem ineficiente dos corpos-de-prova e a retração das resinas em relação ao substrato podem interferir nos resultados.

#### 4.3.2.9. Resistências ao cisalhamento e à tração por compressão diametral (*splitting test*)

O coeficiente de aderência ( $\alpha$ ), definido como a razão entre a resistência média à tração na interface ( $f_{tim}$ ) e a resistência média à tração do material mais fraco ( $f_{ctm}$ ), pode ser calculado por meio do uso da Equação 3.15, sendo seus valores mostrados na Tabela 4.24. Os valores médios do coeficiente de aderência do substrato-resina geopolimérica variaram entre 0,57 e 0,63. Estes valores foram bem próximos ao valor de 0,66 encontrado para o substrato-resina epóxi. A rugosidade na interface do substrato de todos os corpos-de-prova era baixa. Logo, a aderência na interface foi devida quase que exclusivamente pela adesão entre a resina e o substrato.

Costa *et al.* (2018) estudaram a aderência de interfaces entre concreto convencional e concreto leve e observaram que a maior resistência dos materiais de ligação conduzem a uma maior resistência à tração na interface dos corpos-de-prova. Concluíram também que substratos com superfícies mais lisas apresentam menor coeficiente de atrito e, conseqüentemente, menor aderência.

Tabela 4.24: Valores médios da resistência à tração na interface substrato/resina e coeficiente de aderência.

Corpo-de-prova	Resistência à tração interface $f_{tim}$ (MPa)	Resistência à tração $f_{ctm}$ (MPa)	Coeficiente de aderência ( $\alpha$ )
Substrato/s.S – h.S	3,07	5,41	0,57 ± 0,09
Substrato/s.S – h.P	2,92	4,86	0,60 ± 0,02
Substrato/s.P – h.S	3,20	5,10	0,63 ± 0,05
Substrato/s.P – h.P	3,06	5,50	0,56 ± 0,06
Substrato/Resina epóxi	3,93	5,99	0,66 ± 0,06

A Figura 4.30 mostra a comparação entre os resultados do coeficiente de aderência encontrados nesse trabalho com os obtidos por Costa *et al.* (2018). Costa *et al.* (2018) produziram corpos-de-prova cilíndricos mistos com interfaces

combinadas entre concreto convencional com peso específico normal e concreto leve. Os concretos apresentaram valores médios de resistência à compressão de 50 a 75 MPa e de 3 a 5 MPa de resistência à tração. As interfaces apresentavam diversas rugosidades. Porém, para fins de comparação, somente foram utilizados os corpos-de-prova com superfícies lisas daquele estudo.

É possível observar que os corpos-de-prova cilíndricos com interfaces compostas por resinas geopoliméricas e epóxi comercial apresentaram melhor desempenho do que aqueles com interfaces de concretos convencionais e leves. Isso demonstra que, além da rugosidade da superfície dos materiais na interface, a resistência mecânica é uma propriedade primordial para o desempenho de aderência.

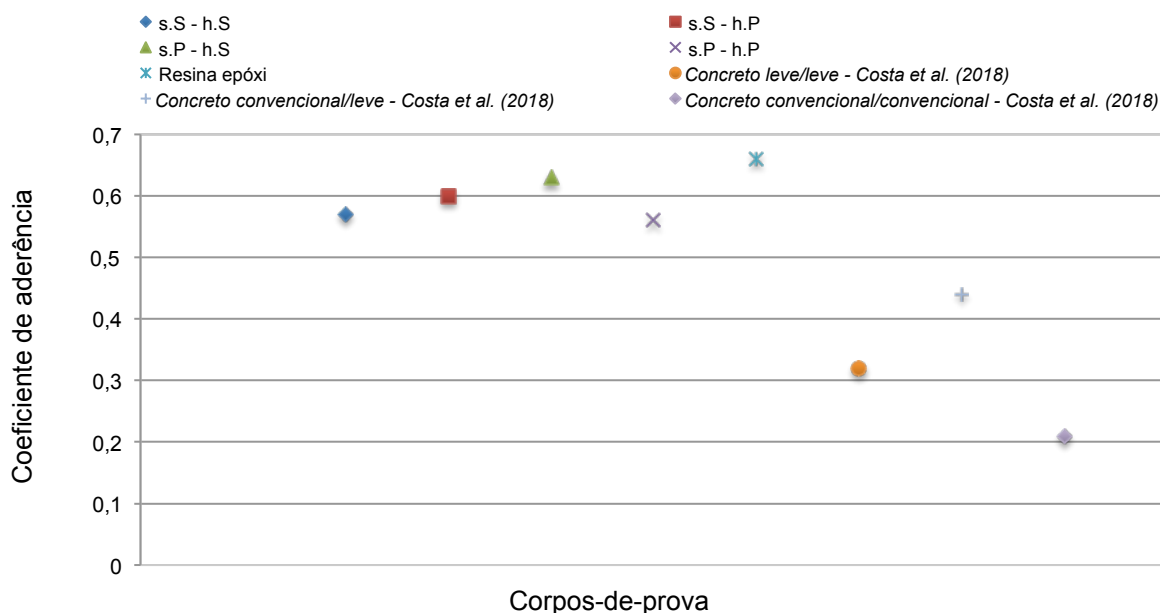


Figura 4.30: Comparação entre o coeficiente de aderência das resinas geopoliméricas e epóxi comercial com os valores obtidos por Costa *et al.* (2018) para concreto convencional e concreto leve.

A Figura 4.31 mostra os corpos-de-prova mistos (substrato-resina) sendo ensaiados e o modo de ruptura. A ruptura ocorre por perda de adesão e se dá exatamente na junção dos dois materiais e na linha de ação do carregamento.

A Tabela 4.25 mostra os valores da resistência à tração na interface substrato-resina com inclinações de 30° e 45° em relação à carga aplicada. Independentemente da inclinação, os valores obtidos foram próximos para ambos os casos analisados. As resinas s.S – h.S e s.P – h.P apresentaram valores 14% maiores do que s.S – h.P e s.P – h.S para interface inclinada a 30°. Já para os ensaios realizados com a interface inclinada a 45°, as resinas produzidas com

silicato de potássio apresentaram valores de 14 a 29% maiores do que as resinas produzidas com silicato de sódio alcalino. A resina epóxi comercial apresentou valores de 13 a 29% maiores do que os apresentados pelas resinas geopoliméricas, exceto para a resina s.P – h.P, que alcançou o mesmo valor para interface inclinada a 45°.

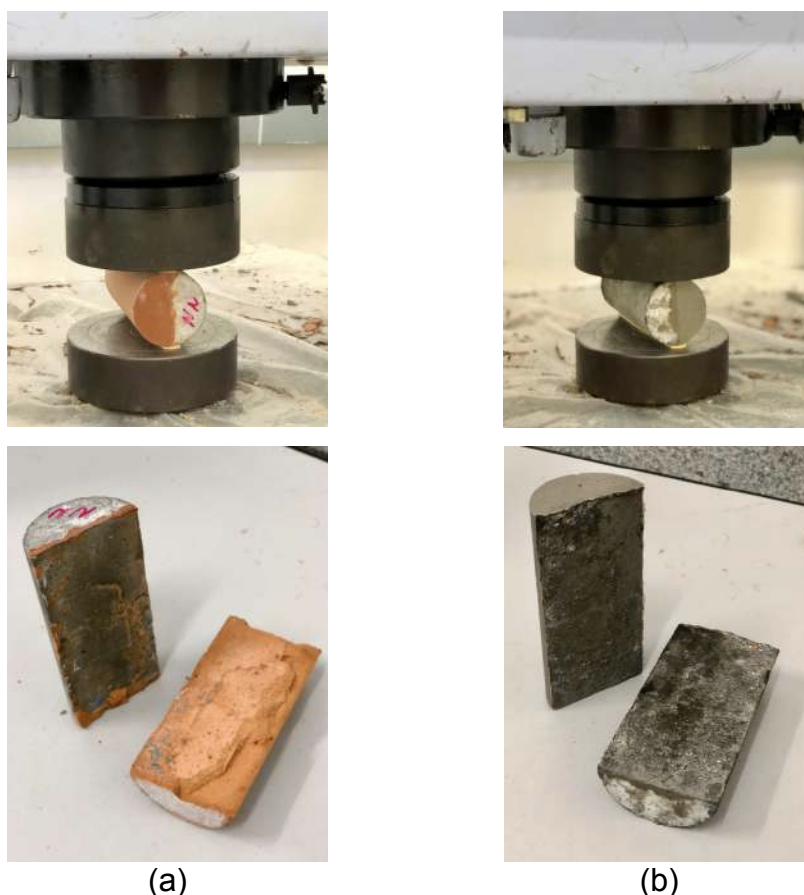


Figura 4.31: (a) Ruptura dos corpos-de-prova mistos substrato-resina geopolimérica; (b) ruptura dos corpos-de-prova mistos substrato-resina epóxi.

Tabela 4.25: Valores médios da resistência à tração nas interfaces substrato/resina inclinadas a 30° e 45°.

Corpo-de-prova	Resistência à tração na interface substrato/resina			
	30°		45°	
	$f_{tim}$ (MPa)	$f_{tim}/f_{cm}$	$f_{tim}$ (MPa)	$f_{tim}/f_{cm}$
s.S – h.S	6,26 ± 0,18	0,08	6,10 ± 0,62	0,07
s.S – h.P	5,87 ± 0,17	0,07	6,06 ± 0,69	0,07
s.P – h.S	5,15 ± 0,51	0,07	5,66 ± 0,39	0,08
s.P – h.P	5,22 ± 0,68	0,08	5,56 ± 0,44	0,09
Epóxi comercial	6,39 ± 0,39	0,09	6,19 ± 0,57	0,09

Para os ensaios de cisalhamento à tração por compressão diametral nos corpos-de-prova cilíndricos colados com resinas geopoliméricas e epóxi comercial foi observado uma ruptura coesiva ou monolítica (Figura 4.32), tanto as interfaces inclinadas a 30° quanto a 45° em relação à linha de aplicação da carga. A ruptura do tipo coesiva ocorre no substrato, e não na resina utilizada na colagem da interface, reafirmando o fato de que a resistência de aderência na interface substrato-resina foi maior do que a resistência ao cisalhamento do substrato.

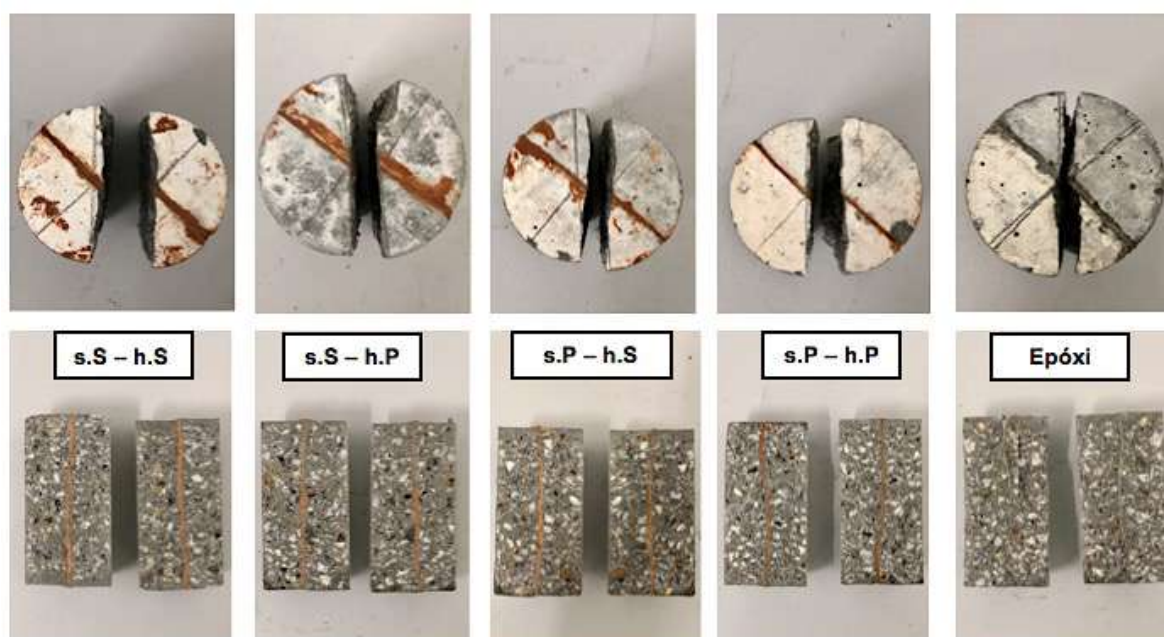


Figura 4.32: Modos de ruptura dos corpos-de-prova ensaiados a 30° e 45° em relação à linha de aplicação da carga.

#### 4.3.2.10. Resistência ao cisalhamento por compressão (*slant shear test*)

A resistência ao cisalhamento ( $\tau_b$ ) na interface substrato-resina e substrato-resina-aço dos corpos-de-prova prismáticos obtida pelo ensaio de cisalhamento por compressão (*slant shear test*) é mostrada na Figura 4.33. Os valores médios da resistência ao cisalhamento também são apresentados nas Tabelas 4.26 e 4.27 com os respectivos coeficientes de coesão ( $c$ ) e atrito ( $\mu$ ), calculados pela Equações 2.9 e 2.10.

Nesse ensaio as resinas geopoliméricas apresentaram valores que variaram de 6,86 a 19,49 MPa para a resistência ao cisalhamento do substrato-resina e valores entre 2,04 e 3,13 MPa para substrato-resina-aço. É possível observar que as resinas geopoliméricas produzidas com hidróxido de sódio apresentaram valores

maiores do que os obtidos pelas resinas produzidas com hidróxido de potássio com valores de 180 a 307% maiores para o substrato-resina e de 10 a 53% para o substrato-resina-aço. Em relação à resina epóxi, apenas as resinas geopoliméricas produzidas com hidróxido de sódio superaram os valores de resistência ao cisalhamento nos ensaios com substratos sem chapas de aço, sendo cerca de 125% superior.

Para os corpos-de-prova com chapas de aço, a resina epóxi comercial apresentou melhor desempenho em relação às resinas geopoliméricas para resistência ao cisalhamento. Neste aspecto, a aderência entre duas superfícies é basicamente decorrente de fatores mecânicos (rugosidade interfacial e atrito) e da adesão química, resultante da atração de forças moleculares entre as fases. Nas resinas epóxi esta adesão química se deve à alta polaridade dos grupos epóxi e às hidroxilas presentes na sua cadeia, que criam uma interface resistente com o aço e com as fibras de um modo geral (PACKHAM, 2003). De acordo com Petrie (2006), devido ao maior número de grupos hidroxila por unidade de massa, algumas propriedades mecânicas e físicas, como a flexibilidade, são maximizadas pelas resinas epóxi, proporcionando maior adesão ao aço.

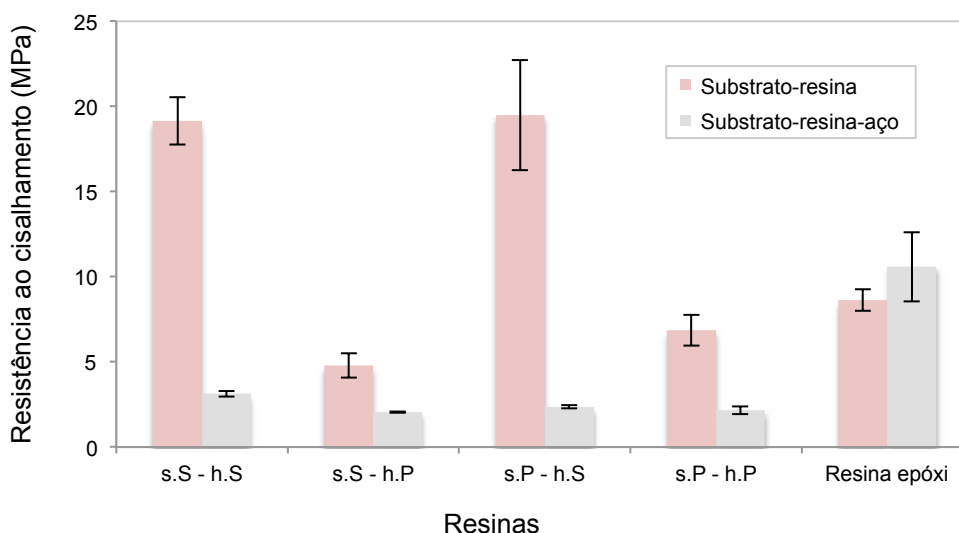


Figura 4.33: Resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina e substrato-resina-aço dos corpos-de-prova prismáticos.

Os valores do coeficiente de coesão e de atrito alcançados foram maiores para as interfaces substrato-resina do que os obtidos pelas interfaces com chapas de aço. Os valores para o coeficiente de coesão encontrados nas interfaces de substrato-resina foram da ordem de 100 a 250% maiores do que com substrato-

resina-aço. Os valores para o coeficiente de atrito também foram superiores e variaram de 6 a 30%, exceto o valor obtido pela resina epóxi que foi 23% superior nas interfaces com chapas de aço. A resina s.S – h.P apresentou praticamente o mesmo resultado de coeficiente de atrito para os dois tipos de corpos-de-prova, sendo a diferença de somente 2% entre eles.

Tabela 4.26: Valores médios da resistência ao cisalhamento, dos coeficientes de coesão e atrito na interface inclinada dos corpos-de-prova prismáticos colados com resinas.

Corpos-de-prova	<sup>1</sup> $\tau_b$ (MPa)	<sup>2</sup> $\sigma_b$ (MPa)	<sup>3</sup> $\tau_0$ (MPa)	<sup>4</sup> $c$	<sup>5</sup> $\mu$
s.S – h.S	19,14 ± 1,38	11,05	1,73	0,32	1,58
s.S – h.P	4,79 ± 0,71	2,77	1,07	0,22	1,35
s.P – h.S	19,49 ± 3,23	11,25	2,85	0,56	1,48
s.P – h.P	6,86 ± 0,91	3,96	1,97	0,36	1,23
Resina epóxi	8,63 ± 0,63	4,99	2,14	0,36	1,30

<sup>1</sup> $\tau_b$  = resistência média ao cisalhamento, obtido pelo *slant shear test*.

<sup>2</sup> $\sigma_b$  = resistência normal ao plano inclinado, obtido pelo *slant shear test*.

<sup>3</sup> $\tau_0$  = resistência ao cisalhamento puro, obtido no ensaio de cisalhamento duplo.

<sup>4</sup> $c$  = coeficiente de coesão.

<sup>5</sup> $\mu$  = coeficiente de atrito.

Tabela 4.27: Valores médios da resistência ao cisalhamento, dos coeficientes de coesão e atrito na interface inclinada dos corpos-de-prova prismáticos com chapas de aço colados com resinas.

Corpos-de-prova	$\tau_b$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\tau_0$ (MPa)	$c$	$\mu$
s.S – h.S	3,13 ± 0,17	1,81	0,84	0,16	1,27
s.S – h.P	2,04 ± 0,03	1,18	0,40	0,08	1,39
s.P – h.S	2,36 ± 0,11	1,36	0,82	0,16	1,13
s.P – h.P	2,15 ± 0,23	1,24	0,71	0,13	1,16
Resina epóxi	10,58 ± 2,48	6,11	0,81	0,14	1,60

As Figuras 4.34 e 4.35 mostram a comparação entre os valores médios experimentais obtidos para a resistência ao cisalhamento na interface com os valores teóricos correspondentes previstos pelas equações das normas CEB-FIB MC90 (2010), Eurocode 2 (2004), CAN/CSA A23.3 (2004), e NS 3473-04 (2004) (Anexo B). Os valores teóricos calculados são mostrados nas Tabelas B.4 e B.5 do



Anexo B. Todas as prescrições normativas referentes ao cálculo da resistência ao cisalhamento levam em consideração o coeficiente de coesão e de atrito na interface dos materiais. Vale ressaltar que a norma canadense CAN/CSA A23.3 (2004) inclui um fator que depende da densidade do concreto. No caso deste estudo, o fator utilizado foi igual a 1,0 (concreto convencional). É possível observar que os valores previstos pelas normas são muito conservadores. Os resultados experimentais são aproximadamente duas vezes maiores do que os previstos pelo Eurocode 2 (2004) e pela NS 3473-04 (2004); três e quatro vezes maiores do que o CEB-FIB MC90 (2010) e CAN/CSA A23.3, respectivamente.

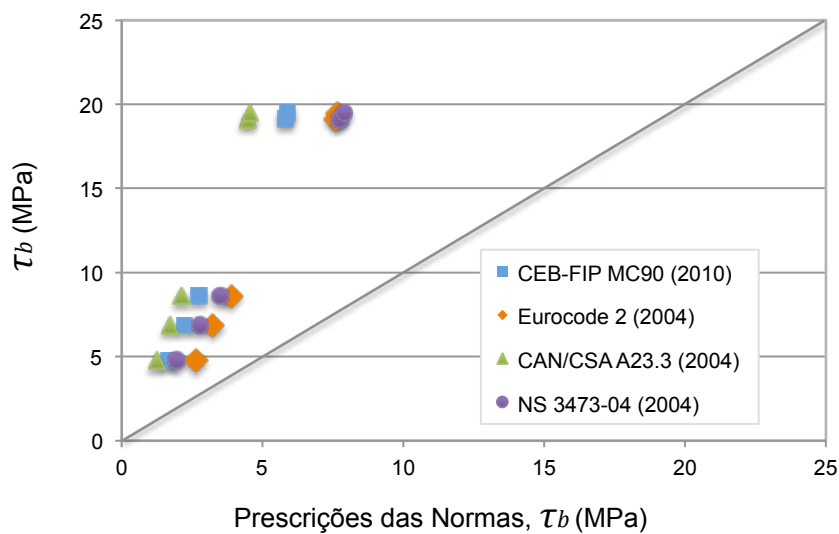


Figura 4.34: Comparação entre os valores experimentais e as prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resinas).

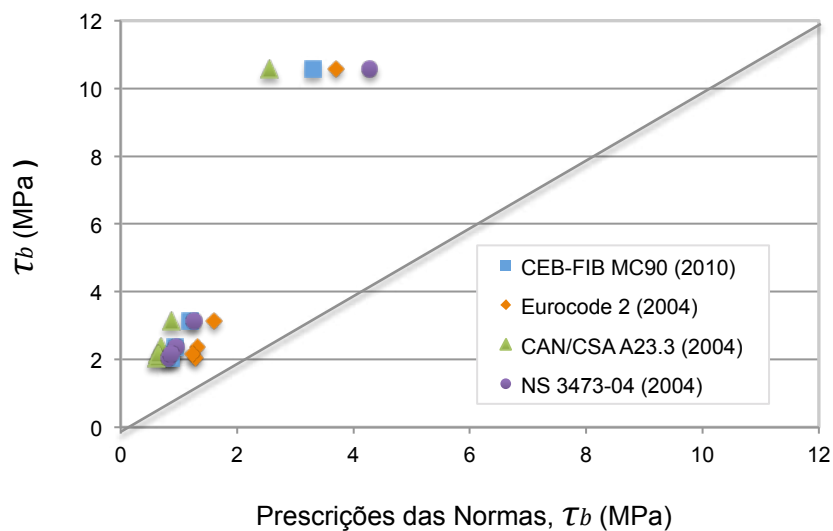


Figura 4.35: Comparação entre os valores experimentais e as prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resinas-aço).

A Figura 4.36 e a Tabela 4.28 apresentam os valores normalizados, em função da resistência à compressão das resinas, obtidos para a resistência ao cisalhamento dos corpos-de-prova de substrato-resina e de substrato-resina-aço. Para esse parâmetro, as resinas geopoliméricas fabricadas com hidróxido de sódio ainda apresentaram valores superiores, entre 110 a 350%, às resinas geopoliméricas produzidas com hidróxido de potássio. Entretanto, para os ensaios com substrato-resina-aço somente a resina s.S – h.S apresentou valor 33% maior do que as demais resinas geopoliméricas, que obtiveram valores iguais entre si para  $\tau_b/f_{cm}$ .

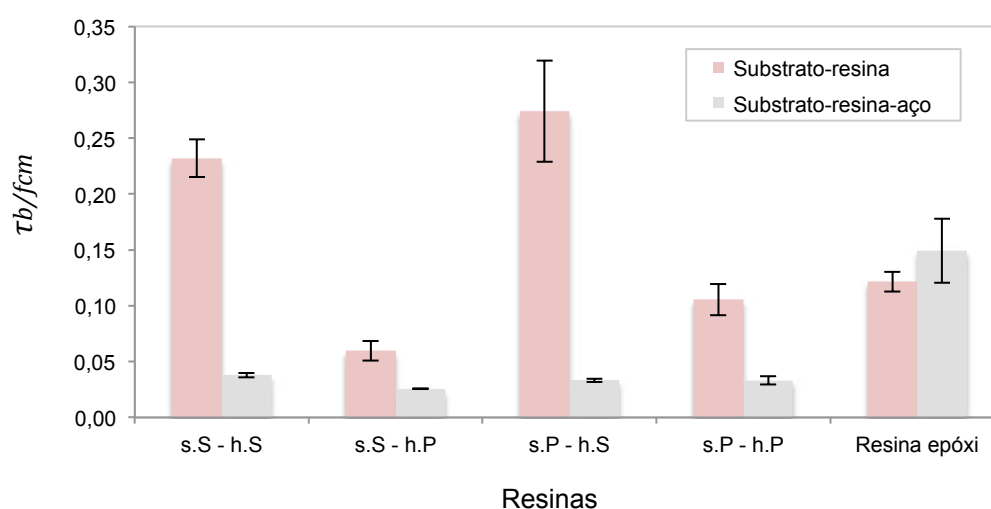


Figura 4.36: Resistência ao cisalhamento normalizada na interface substrato-resina e substrato-resina-aço dos corpos-de-prova prismáticos.

Tabela 4.28: Valores médios da resistência ao cisalhamento normalizada na interface substrato-resina e substrato-resina-aço dos corpos-de-prova prismáticos.

Corpo-de-prova	$\tau_b/f_{cm}$	
	Substrato-resina	Substrato-resina-aço
s.S – h.S	0,23 ± 0,02	0,04 ± 0,002
s.S – h.P	0,06 ± 0,01	0,03 ± 0,001
s.P – h.S	0,27 ± 0,05	0,03 ± 0,001
s.P – h.P	0,11 ± 0,01	0,03 ± 0,004
Resina epóxi	0,12 ± 0,01	0,15 ± 0,030

A Figura 4.37 mostra a comparação entre os resultados de resistência ao cisalhamento normalizada ( $\tau_b/f_{cm}$ ) encontrados nesse trabalho com os obtidos por Ding *et al.* (2017) e Costa *et al.* (2018). Ding *et al.* (2017) produziram três pastas

geopoliméricas à base de escória e cinza volante para aplicação em reparos de concreto, com diferentes razões molares ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 0,96$ ;  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,28$ ;  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1,91$ ), que foram chamadas de M-0,96, M-1,28 e M-1,91. Costa *et al.* (2018) estudaram a interface entre corpos-de-prova de concreto convencionais com peso específico normal (N) e concreto leve (L). Três interfaces foram analisadas: concreto normal-concreto normal (N-N), concreto normal-concreto leve (N-L) e concreto leve-concreto leve (L-L). Ambos os estudos realizaram ensaios de cisalhamento por compressão (*slant shear test*) em corpos-de-prova prismáticos com interface inclinada a  $60^\circ$ .

Na Figura 4.37 é possível observar desempenho superior de  $\tau_b/f_{cm}$  das resinas geopoliméricas s.P – h.S e s.S – h.S em relação às demais resinas geopoliméricas e epóxi comercial desse estudo, e também em relação às pastas geopoliméricas (DING *et al.*, 2017) e aos concretos (COSTA *et al.*, 2018). A resina s.P – h.S apresentou valores 59, 69 e 350% maiores do que as pastas geopoliméricas M-0,96, M-1,28 e M-1,91, respectivamente. Já em relação aos concretos, apresentou valor 80% maior do que N-L, 200% maior do que L-L e 400% em relação ao N-N. Já as resinas s.S – h.S apresentaram valores 35 a 283% maiores do que os obtidos para as pasta geopoliméricas (M-0,96, M-1,28 e M-1,91) e 53 a 153% maiores do que os concretos (N-N, N-L, L-L).

Mesmo que as condições de ensaio tenham sido equivalentes, as resinas s.S – h.P e s.P – h.P alcançaram valores próximos ou abaixo em relação aos obtidos nos estudos apresentados nesse item. Porém, vale ressaltar que a rugosidade da interface é um parâmetro importante e que a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da rugosidade superficial (SANTOS, 2009; SANTOS *et al.*, 2012). Ding *et al.* (2017) não especificaram a rugosidade aplicada nas interfaces dos corpos-de-prova prismáticos, indicando apenas que os ensaios foram realizados com rugosidade natural gerada no processo de moldagem, e que as superfícies não foram lixadas ou polidas, somente limpas. Os corpos-de-prova de Costa *et al.* (2018) apresentaram rugosidades médias entre 0,14 e 0,17 mm, bem maiores do que o valor de 0,029 do presente trabalho. Dessa forma, as resinas geopoliméricas apresentaram resultados satisfatórios, mesmo para superfícies com baixa rugosidade (situação considerada crítica).

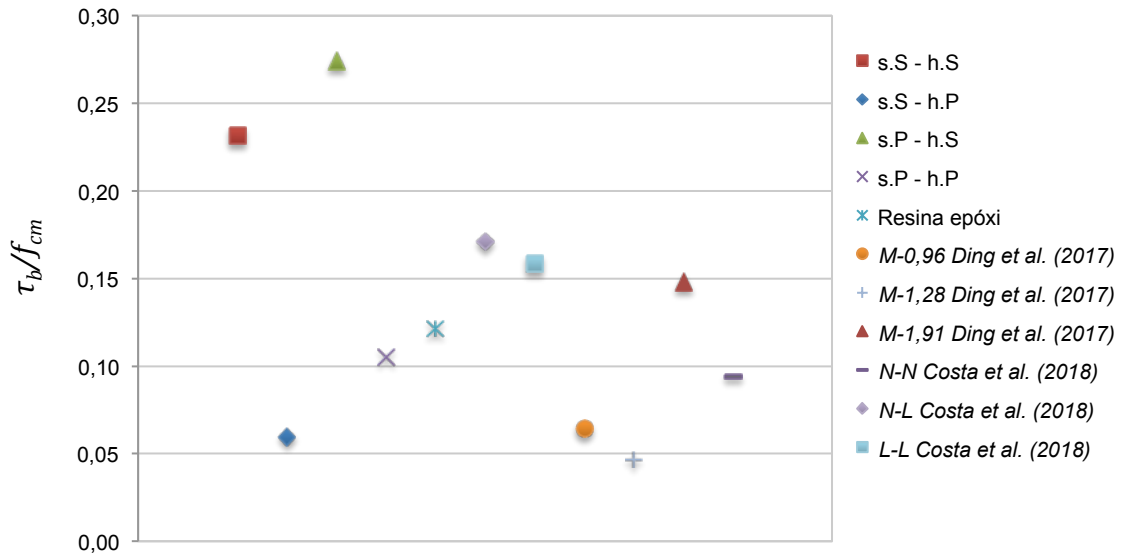


Figura 4.37: Comparação entre a resistência ao cisalhamento normalizada de substrato-resina com as obtidas por Ding *et al.* (2017) e Costa *et al.* (2018).

Para os ensaios de resistência ao cisalhamento por compressão (*slant shear test*) dois tipos de ruptura podem ocorrer: ruptura coesiva/monolítica e ruptura adesiva. O primeiro tipo ocorre principalmente nos corpos-de-prova com elevada rugosidade da superfície da interface e o segundo nos corpos-de-prova com baixa rugosidade da superfície da interface (COSTA *et al.*, 2018). No presente estudo, tanto os corpos-de-prova com interface substrato-resina quanto aqueles compostos de substrato-resina-aço apresentaram mesmo tipo de ruptura adesiva na interface, como mostra as Figuras 4.38 e 4.39.

#### 4.3.2.11. Resistência de aderência à tração na flexão

As resistências à tração na flexão dos corpos-de-prova prismáticos de concreto convencional sem reparo e os reparados com resinas geopoliméricas e epóxi comercial são mostradas na Figura 4.40. Segundo Antunes (2005), a resistência à tração da resina representa o valor máximo que a resistência de aderência pode alcançar. Neste caso, a resistência avaliada é a de aderência entre o substrato e o reparo, simulando um caso em que haja necessidade de se recuperar um elemento estrutural que esteja submetido à tração. O resultado da tensão de ruptura do ensaio equivale à tensão limite de resistência de aderência.

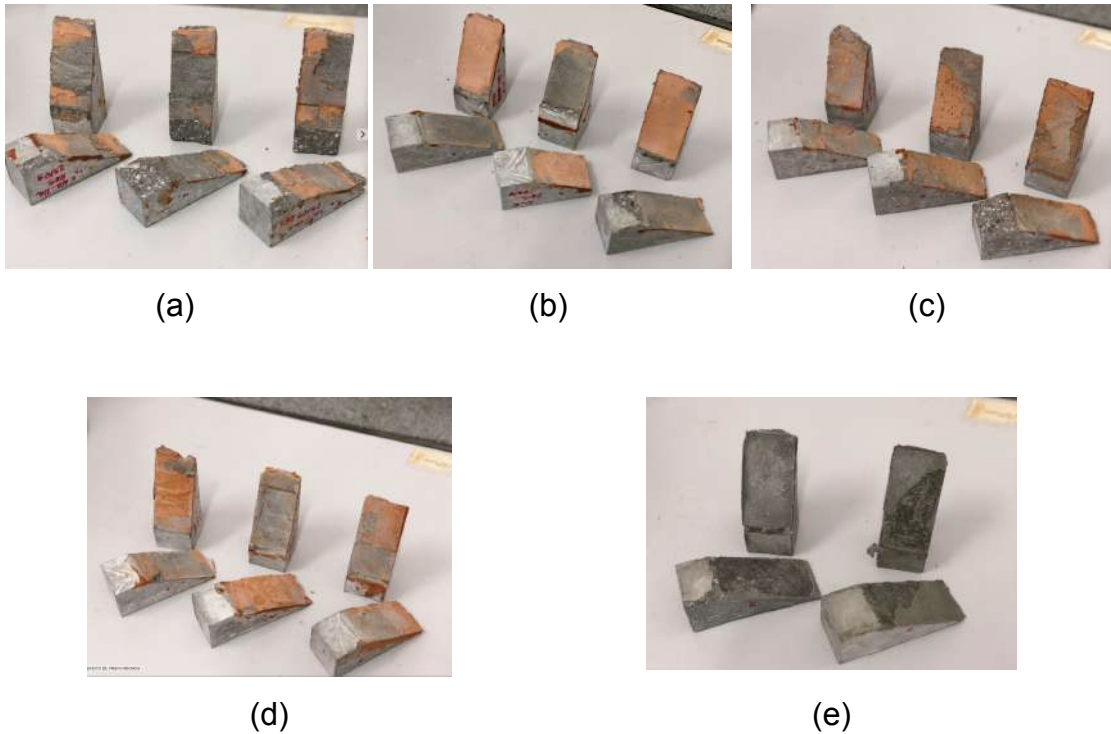


Figura 4.38: Modos de ruptura dos corpos-de-prova prismáticos com interface a 60° coladas com resinas: (a) s.S – h.S; (b) s.S – h.P; (c) s.P – h.S; (d) s.P – h.P; (e) epóxi comercial.

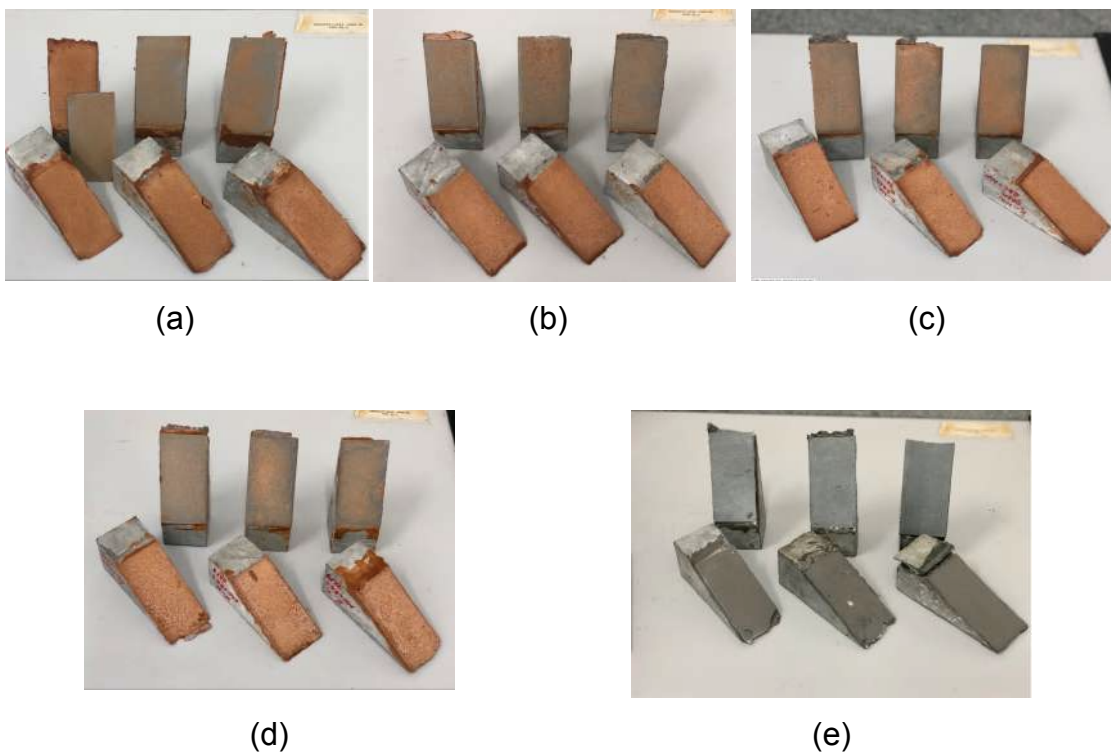


Figura 4.39: Modos de ruptura dos corpos-de-prova prismáticos e chapas de aço com interface a 60° coladas com resinas: (a) s.S – h.S; (b) s.S – h.P; (c) s.P – h.S; (d) s.P – h.P; (e) epóxi comercial.

Os corpos-de-prova sem reparo (monolíticos), ensaiados de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005), apresentaram valores médios entre 6 e 7 MPa de resistência à tração na flexão, aos 28 dias. Após a ruptura, os corpos-de-prova divididos em duas partes foram colados com as resinas geopoliméricas e a resina epóxi e ensaiados novamente após 28 dias da colagem. Os resultados obtidos de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova reparados foram maiores do que os alcançados pelos corpos-de-prova sem reparo (monolíticos) e variaram de, aproximadamente, 7 a 10 MPa.

Os corpos-de-prova reparados com resina epóxi apresentaram ganho de resistência de, aproximadamente, 60% e a resina geopolimérica s.P – h.S apresentou ganho em torno de 38% em relação aos corpos-de-prova sem reparo. As resinas geopoliméricas s.S – h.S, s.S – h.P e s.P – h.P também apresentaram ganhos significativos, da ordem de 16, 12 e 14%, respectivamente, em relação aos monolíticos. Ding *et al.* (2017) estudaram geopolímeros à base de escória de alto-forno e cinza volante como material de reparo em concreto, cujos resultados de resistência à tração na flexão foram de 30 a 60% superiores àquele sem reparo.

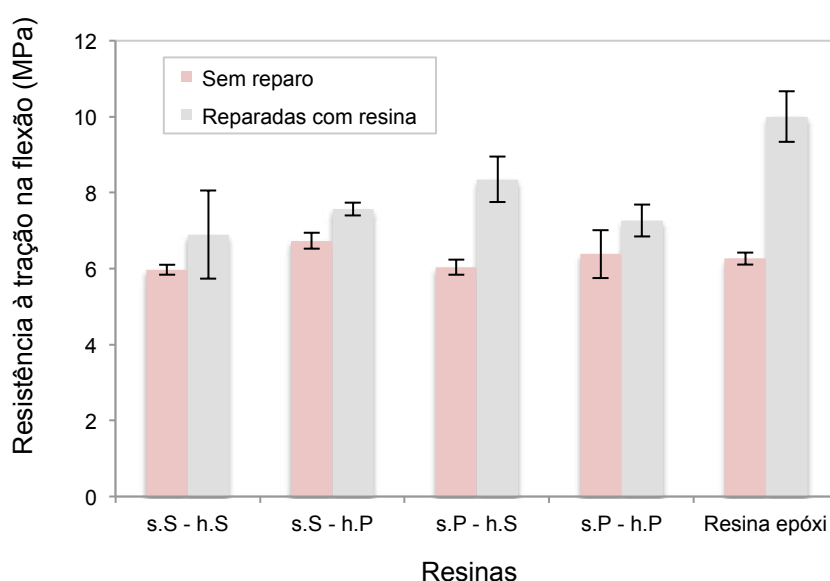


Figura 4.40: Resistência à tração na flexão de corpos-de-prova de substrato sem reparo e reparados com resinas geopoliméricas e epóxi comercial.

Devido à menor resistência de aderência em relação às resistências do substrato e das próprias resinas (geopoliméricas e epóxi comercial), a ruptura de todos os corpos-de-prova ocorreu na interface substrato-resina, conforme mostra a Figura 4.41.

Tabela 4.29: Valores médios da resistência à tração na flexão do substrato para corpos-de-prova sem reparo e reparados com resinas.

Resina	$R_f$ (MPa) substrato	$R_f$ (MPa) substrato colado com resinas	$R_f / f_c$
s.S – h.S	5,97 ± 0,13	6,90 ± 1,16	0,08
s.S – h.P	6,73 ± 0,21	7,57 ± 0,17	0,08
s.P – h.S	6,04 ± 0,20	8,35 ± 0,60	0,08
s.P – h.P	6,38 ± 0,63	7,27 ± 0,42	0,11
Epóxi comercial	6,27 ± 0,16	10,00 ± 0,67	0,14

#### 4.3.2.12. Resistência de aderência por ensaio de tirante

O ensaio de conformação superficial baseado na NBR 7477 (ABNT, 1982) foi realizado para avaliar a resistência de aderência entre as quatro resinas geopoliméricas e as barras de aço nervuradas CA-60 ( $\phi$  4,2 mm) e as barras de aço lisas CA-25 ( $\phi$  6,3 mm).

O coeficiente de conformação superficial foi calculado pelo parâmetro  $a$  (lado da seção do tirante) e pela obtenção da distância média entre as fissuras ( $\Delta l_{média}$ ), de acordo com o item 3.2.8.12.

A NBR 7480 (ABNT, 2007) estabelece que a conformação superficial em tirantes com barras de aço de diâmetros menores do que 10 mm deve ser igual ou maior do que 1,0. A Figura 4.42 mostra os valores de conformação superficial para as resinas geopoliméricas. Todos os valores encontrados foram maiores do que 1,0 e atendem à norma supracitada. Nota-se que o valor médio obtido para conformação superficial da resina s.S – h.S atende ao especificado pela norma, porém não atende quando o desvio-padrão é levado em consideração.

A Tabela 4.30 mostra os valores de conformação superficial das resinas geopoliméricas obtidas nesse estudo em comparação com os resultados obtidos no trabalho realizado por França (2017) para argamassas geopoliméricas (AGT) e concreto convencional de cimento Portland (C).

Para os tirantes com barras lisas, as resinas geopoliméricas apresentaram valores de 12 a 70% superiores aos obtidos pelo concreto convencional e variaram de 5 a 45% para o caso de ensaios com barras nervuradas.

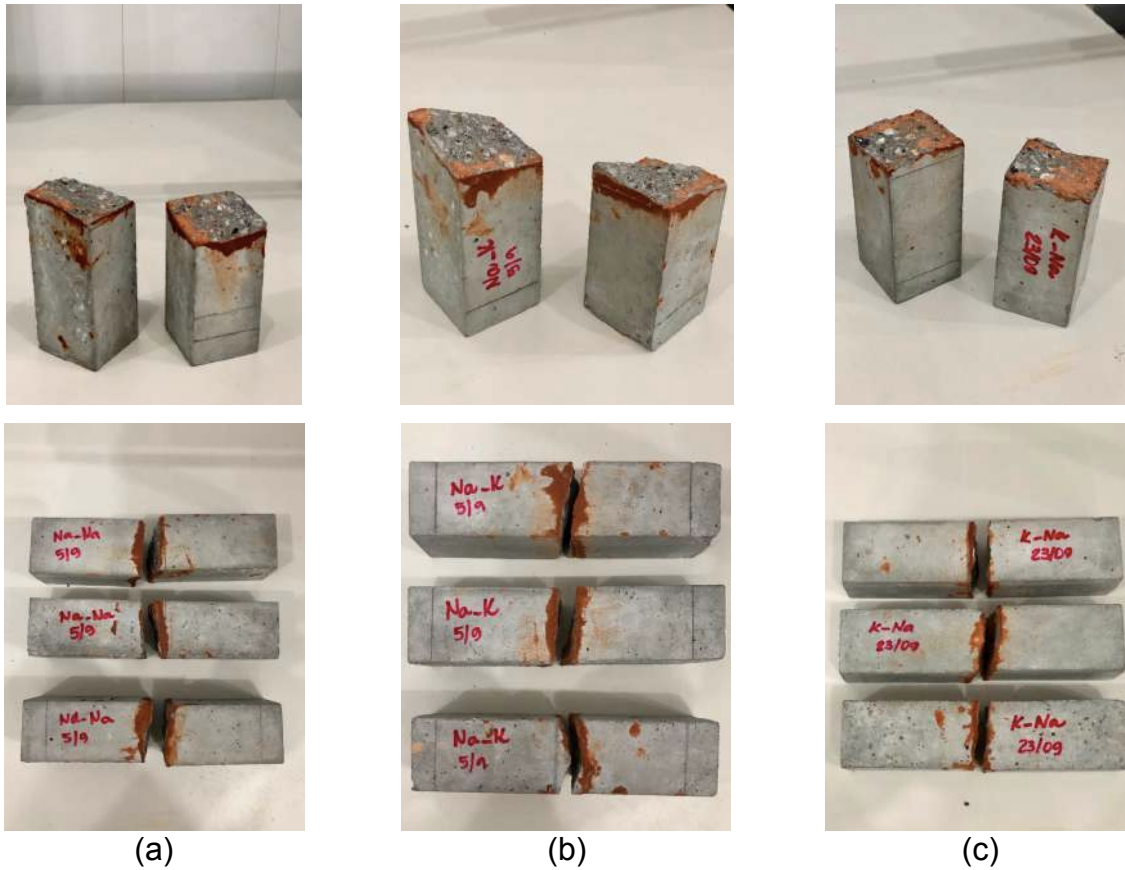


Figura 4.41: Modos de ruptura sob tração na flexão dos corpos-de-prova prismáticos de substrato colado com: (a) s.S - h.S, (b) s.S - h.P, (c) s.P - h.S, (d) s.P - h.P, (e) resina epóxi comercial.



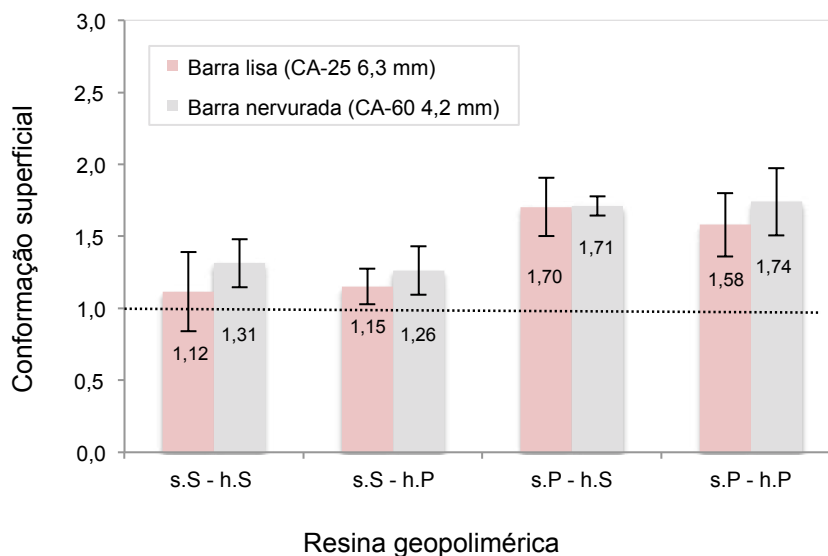


Figura 4.42: Valores médios do coeficiente de conformação superficial para os tirantes confeccionados com resinas geopoliméricas.

As resinas geopoliméricas produzidas com silicato de potássio apresentaram valores maiores de conformação superficial das barras em relação às resinas produzidas com silicato de sódio alcalino e, também, em relação à argamassa geopolimérica (AGT). Estes valores são da ordem de 8 a 52% em tirantes com barras lisas e de 2 a 38% em tirantes com barras nervuradas.

O bom desempenho das resinas geopoliméricas produzidas com silicato de potássio pode ser justificada por apresentarem matrizes bem homogêneas e com pouco poros, o que contribui para melhor aderência na interface aço-matriz geopolimérica. Essas características da matriz das resinas geopoliméricas, obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura, são apresentadas no item 4.4.3.

Tabela 4.30: Conformação superficial das resinas geopoliméricas, da argamassa geopolimérica e do concreto convencional do estudo de França (2017).

Tirante	Conformação superficial	
	Barra lisa CA-25 ( $\phi$ 6,3 mm)	Barra nervurada CA-60 ( $\phi$ 4,2 mm)
s.S – h.S	1,12	1,31
s.S – h.P	1,15	1,26
s.P – h.S	1,70	1,71
s.P – h.P	1,58	1,74
AGT (FRANÇA, 2017)	1,30	1,60
Concreto (FRANÇA, 2017)	1,00	1,20

As Tabelas 4.31 e 4.32 mostram os valores médios normalizados da resistência de aderência entre as barras de aço lisas e nervuradas e as resinas geopoliméricas, de acordo com as formulações propostas por Castro (2000), pela NBR 6118 (2014) e por Silva (2015). Logo, as discussões a seguir levam em consideração os valores normalizados em função da resistência à compressão dos diferentes materiais.

No caso das barras lisas é possível observar que os valores obtidos por meio das equações sugeridas por Castro (2000) e Silva (2015) foram mais próximos entre si do que os obtidos pela NBR 6118 (2014). Isso se deve ao fato de que estas formulações levam em consideração o parâmetro de conformação superficial das barras obtido nos ensaios de tirante. Em contrapartida, os valores calculados segundo a NBR 6118 (2014) utiliza parâmetros fixos ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ ) estabelecidos pela própria norma e o parâmetro variável  $f_{ctm}$ , ou seja, o cálculo é dependente somente da resistência mecânica do material. Já para as barras nervuradas, os valores encontrados para todas as situações foram próximos. Para este caso, o parâmetro fixo calculado ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ ) apresentou valor próximo ao valor médio de  $\eta$  obtido nos ensaios de tirante.

Ainda de acordo com as Tabelas 4.31 e 4.32 e observando todas as equações utilizadas, as resinas geopoliméricas produzidas com silicato de potássio apresentaram valores superiores de resistência de aderência em relação àquelas produzidas com silicato de sódio alcalino, tanto para barras lisas quanto para barras nervuradas. Estes resultados corroboram o melhor desempenho alcançado para o coeficiente de conformação superficial dos tirantes fabricados com resinas geopoliméricas com silicato de potássio.

Tabela 4.31: Valores médios normalizados da resistência de aderência para barras lisas CA-25  $\phi$  6,3 mm.

Resina geopolimérica	$\tau_m$ (MPa) Castro (2000)	$\tau_m/f_{cm}$ Castro (2000)	$f_{bd}$ (MPa) NBR 6118 (2014)	$f_{bd}/f_{cm}$ NBR 6118 (2014)	$f_{bd}$ (MPa) Silva (2015)	$f_{bd}/f_{cm}$ Silva (2015)
s.S – h.S	7,32	0,10	3,41	0,05	5,43	0,07
s.S – h.P	6,79	0,09	3,06	0,04	5,04	0,07
s.P – h.S	12,92	0,18	3,94	0,06	9,59	0,14
s.P – h.P	10,54	0,16	3,47	0,05	7,82	0,12

Tabela 4.32: Valores médios normalizados da resistência de aderência para barras nervuradas CA-60  $\phi$  4,2 mm.

Resina geopolimérica	$\tau_m$ (MPa) Castro (2000)	$\tau_m/f_{cm}$ Castro (2000)	$f_{bd}$ (MPa) NBR 6118 (2014)	$f_{bd}/f_{cm}$ NBR 6118 (2014)	$f_{bd}$ (MPa) Silva (2015)	$f_{bd}/f_{cm}$ Silva (2015)
s.S – h.S	11,31	0,15	7,67	0,10	6,40	0,09
s.S – h.P	9,76	0,13	6,89	0,09	5,52	0,08
s.P – h.S	17,01	0,24	8,86	0,13	9,61	0,14
s.P – h.P	15,24	0,23	7,80	0,14	8,61	0,13

As Figuras 4.43 e 4.44 mostram a comparação entre os valores normalizados da resistência de aderência obtidos nos ensaios de tirantes das resinas geopoliméricas desse estudo com os resultados das argamassas geopoliméricas (AGT-25, AGT-60) e do concreto convencional (C25, C60) do estudo realizado por França (2017).

Os resultados mais significativos foram aqueles calculados segundo as formulações de Silva (2015), em que os corpos-de-prova confeccionados com barras lisas e resinas s.P – h.S e s.P – h.P apresentaram valores superiores, da ordem de 40 e 20% em relação a argamassa geopolimérica (AGT-25) e de 100 e 71% maiores do que o concreto convencional (C25), respectivamente. Já para os tirantes com barras nervuradas, os valores de s.P – h.S e s.P – h.P em relação ao C60 foram de 75 e 63%, respectivamente.

Os resultados obtidos segundo as equações de Castro (2000) para as resinas geopoliméricas com silicato de potássio nos tirantes com barras lisas e nervuradas foram maiores e variaram de 78 a 100% e de 53 a 60% em relação ao concreto convencional C25 e C60, respectivamente. As resinas geopoliméricas com silicato de potássio apresentaram os mesmos resultados ou pequena diferença (menor do que 5%) em comparação às argamassas geopoliméricas (AGT-25 e AGT-60).

De acordo com a NBR 6118 (2014), os valores normalizados da resistência de aderência para tirantes com barras lisas e resinas geopoliméricas com silicato de potássio não superaram os obtidos pela AGT-25. Porém, em comparação ao concreto C25, a resina s.P – h.S alcançou valor 20% superior e a s.P – h.P apresentou valor semelhante. Os corpos-de-prova com barras nervuradas apresentaram melhor desempenho em relação à argamassa geopolimérica (AGT-

60), mostrando valores superiores de aproximadamente 18 e 27% para s.P – h.S e s.P – h.P, respectivamente.

Para todas as formulações utilizadas nesse item, as resinas geopoliméricas fabricadas com silicato de sódio alcalino apresentaram valores normalizados de resistência de aderência próximos ou ligeiramente inferiores aos obtidos pelas argamassas geopoliméricas (AGT- 25 e AGT- 60) avaliadas por França (2017). Em contrapartida, segundo Silva (2015), os tirantes com barras nervuradas e resina s.S – h.S apresentou valor 15% superior em relação aos tirantes de concreto convencional (C60).

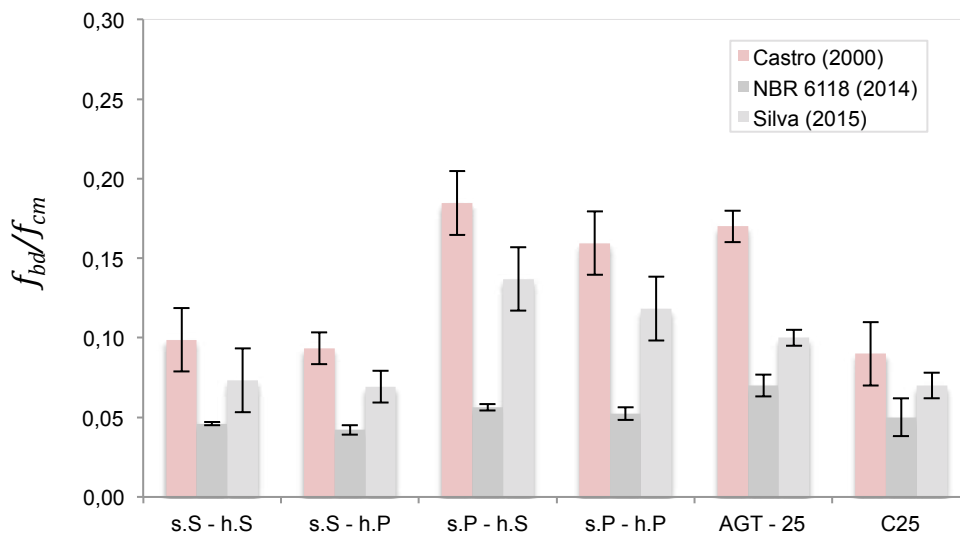


Figura 4.43: Comparação entre os valores normalizados da resistência de aderência das resinas geopoliméricas e barras lisas com os obtidos por França (2017).

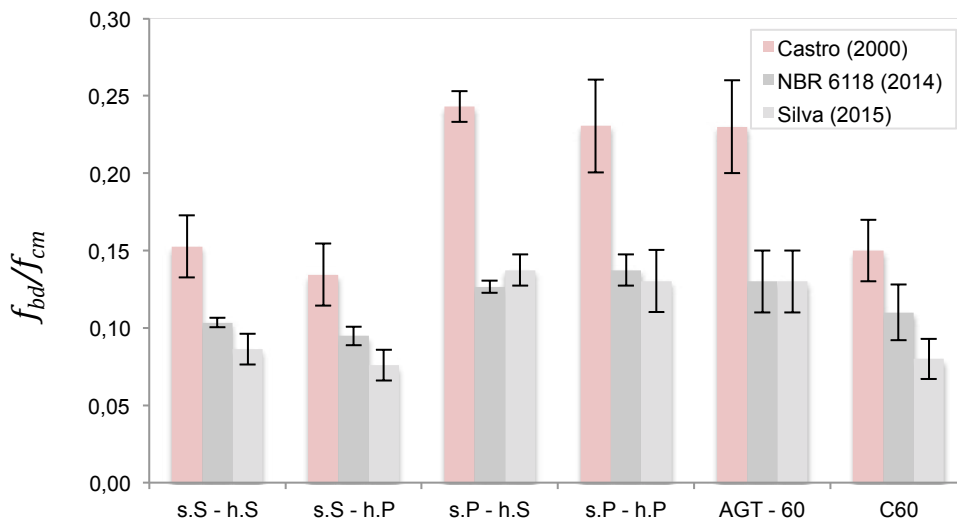


Figura 4.44: Comparação entre os valores normalizados da resistência de aderência das resinas geopoliméricas e barras nervuradas com os obtidos por França (2017).

## 4.4. Técnicas analíticas

### 4.4.1. Difração de raios X

A Figura 4.45 mostra os difratogramas das resinas geopoliméricas com picos cristalinos de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ou haloisita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] e muscovita [ $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ]. É possível observar a presença de picos referentes às fases de elevado ordenamento atômico, mesmo após o material precursor (metacaulim) entrar em contato com a solução ativadora alcalina. Esse fato reforça que as estruturas cristalinas não contribuem ou contribuem muito pouco para o processo de dissolução e liberação de Si e Al para a formação das cadeias poliméricas (DUXSON *et al.*, 2007; AZEVEDO *et al.*, 2018).

A banda larga no material amorfo (metacaulim) apresentado na angulação 18 e 38° 2 $\theta$  (item 3.1.1.5) sofreu deslocamento para 18 e 43° 2 $\theta$ . Segundo Duxon *et al.* (2006), He *et al.* (2013) e Ozer e Soyer-Uzun (2015), esse deslocamento da banda amorfa encontrado nos geopolímeros corresponde à formação do gel aluminossilicato hidratado (N,K)-A-S-H com ordenamento atômico aleatório, de curto alcance, rígido e de elevada resistência mecânica, formado após o contato do metacaulim com a solução ativadora alcalina. Esta é a principal fase do ligantes geopoliméricos, que é baseada em ligações tridimensionais com ordenação típica das zeólitas (LONGHI, 2015), onde N,K representa o sódio e o potássio, A o alumínio, S o silício e H o hidrogênio.

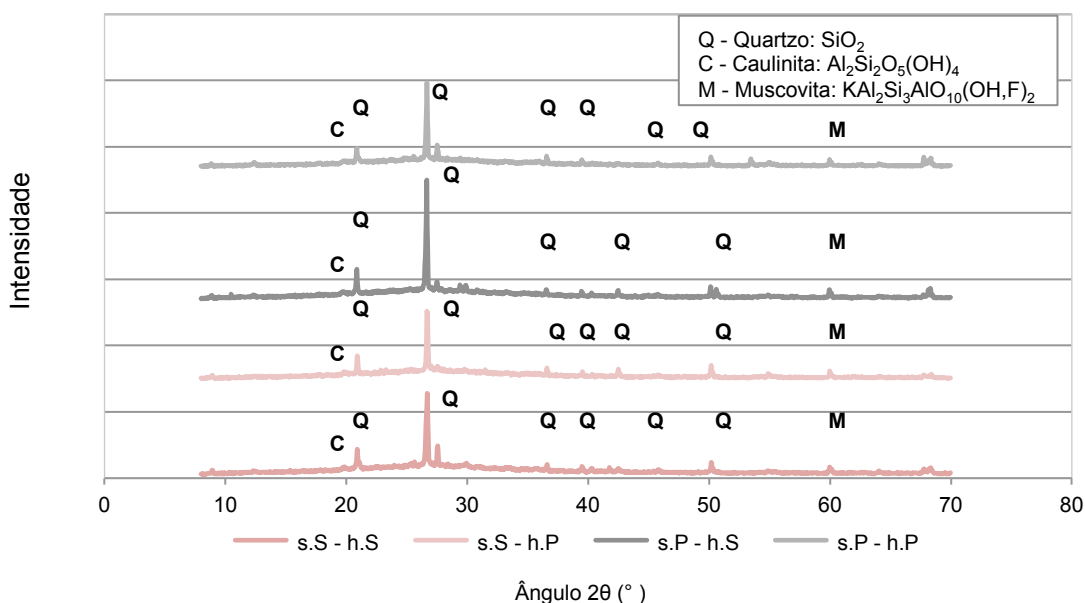


Figura 4.45: Difratograma das resinas geopoliméricas.

#### 4.4.2. Análise térmica

A análise termogravimétrica (*TG*) e sua diferencial (*DTG*) foram utilizadas para avaliar as alterações de fase, composição química e estabilidade térmica das resinas geopoliméricas (Figuras 4.46 a 4.50). A descrição do processo de execução do ensaio foi descrito no item 3.1.1.6.

Os termogramas das resinas geopoliméricas para a idade de 28 dias revelaram um pico endotérmico na faixa de temperatura de 40 a 200°C. A secagem e desidratação da água superficial (água livre) e da água quimicamente combinada ocorreram entre 45 e 105°C. Davidovits (2008) sugere que a evaporação da água livre causa somente reduzida retração e não geram tensões deletérias à estrutura. Termogramas de *DSC* (calorimetria por varredura diferencial) em geopolímeros à base de metacaulim foram realizados por Rahier *et al.* (2007). Os resultados indicaram um pico endotérmico na faixa de temperatura de 100 a 150°C relacionado à evaporação da água. Skaf (2008), em seu estudo em pastas geopoliméricas com cinza volante combinada com metacaulim, encontrou um pico endotérmico na faixa de temperatura de 80 a 100°C. A água associada à ligação Si-O-H foi liberada em altas temperaturas, de 300 a 450°C. O pequeno pico localizado entre 600 e 700°C é devido à reação do álcali com a sílica amorfa e é responsável por 1 a 2% da perda de massa (KHAN *et al.*, 2015).

A Tabela 4.33 mostra valores distintos em relação à perda de massa das resinas geopoliméricas, embora tenham apresentado curvas com comportamento semelhantes. A perda de massa durante a análise térmica dos geopolímeros é devida à desidratação e desidroxilação. Entre a temperatura ambiente e a temperatura de 300°C foi observada perda de massa relativamente alta, de aproximadamente 80% em relação à perda de massa total. Esta perda pode ser atribuída à evaporação da água livre e parte da água quimicamente combinada do geopolímero. De 300 a 1000°C houve perda de massa contínua, porém a taxa de perda de massa foi consideravelmente menor. Rocha (2017) encontrou resultados compatíveis em seu estudo com argamassas geopoliméricas. A taxa de perda de massa foi estabilizada a partir da temperatura de 800°C devido à evaporação da água quimicamente combinada e dos grupos das hidroxilas  $\text{OH}^-$  (ABDULKAREEM *et al.*, 2014).

As resinas S.P – h.S e S.P – h.P apresentaram perdas de massa um pouco menores em relação às s.S – h.S e s.S – h.P, que apresentaram a maior perda.

Esse comportamento pode ser atribuído à microestrutura mais densa das resinas geopoliméricas produzidas com silicato de potássio ou com a maior quantidade de água livre ou combinada disponível na microestrutura das resinas geopoliméricas com silicato de sódio alcalino.

Em relação à resina epóxi, a perda de massa teve início na temperatura de aproximadamente 130°C e de forma mais relevante a partir de 350°C. Nesse primeiro intervalo (100 a 200°C) a perda foi relativamente pequena (2,91%) e foi atribuída à eliminação de água residual e de outros compostos mais voláteis. Entretanto, a partir de 500°C a perda de massa foi relativamente elevada, de 26,44% em relação à perda de massa total. Nesse caso, a perda é bem mais significativa e indica a degradação da resina em si. A perda de massa ficou estabilizada em temperaturas acima de 700°C e foi de 31,64%. A perda de massa da resina epóxi foi de 93 a 184% maior do que a das resinas geopoliméricas. As maiores diferenças podem ser observadas com relação às resinas geopoliméricas com silicato de potássio, que obtiveram menores perdas de massa para essa faixa de temperatura.

Rocha *et al.* (2017) constataram, por meio da análise termogravimétrica de argamassas geopoliméricas, perda mínima de massa abaixo de 100°C, em que acontece um fenômeno endotérmico atribuído à perda de água adsorvida na estrutura. Entre as temperaturas de 125 até 295°C há perda de volume do material de aproximadamente 8%. Nesta faixa de temperatura acredita-se que ocorra uma reorganização estrutural molecular da cadeia polimérica do material. Em seguida, por volta de 295 a 480°C, a perda de material chega a 52% com a degradação de reagentes estequiométricos em excesso presentes na mistura. A decomposição final do material por pirólise ocorre no intervalo de 480 a 750°C.

Cabral *et al.* (2018) realizaram análises termogravimétricas em uma resina epóxi e os resultados mostraram a decomposição da massa do material em função da temperatura. O ensaio resultou numa massa residual de 2,54% em relação à massa inicial para a temperatura de até 580°C.

Portanto, com base nos resultados das análises térmicas, é possível observar que os geopolímeros são termicamente mais estáveis do que a resina epóxi e apresentaram perdas de massa menores, relacionadas a reações de desidratação e desidroxilação. Dessa forma, os resultados indicam que as resinas geopoliméricas podem ser utilizadas efetivamente em situações em que ocorram temperaturas elevadas (incêndios, por exemplo) em estruturas reparadas.

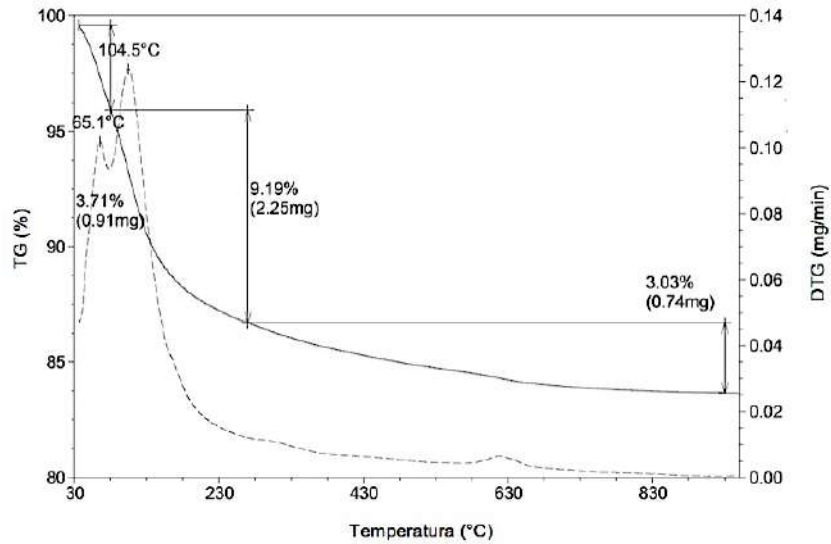


Figura 4.46: Curvas de *TG* e *DTG* da resina geopolimérica s.S – h.S.

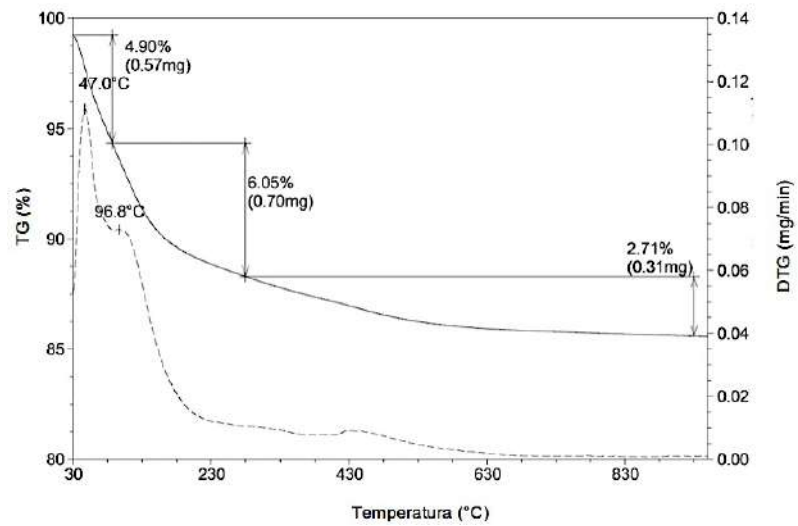


Figura 4.47: Curvas de *TG* e *DTG* da resina geopolimérica s.S – h.P.

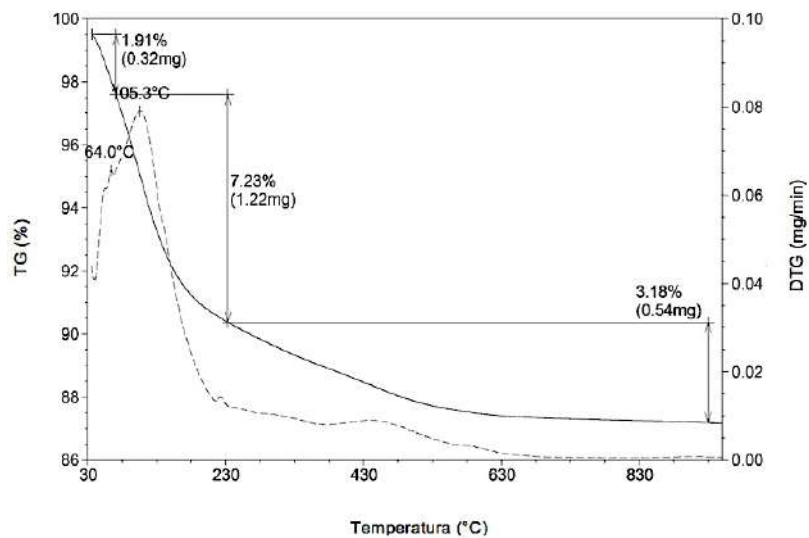


Figura 4.48: Curvas de *TG* e *DTG* da resina geopolimérica s.P – h.S.



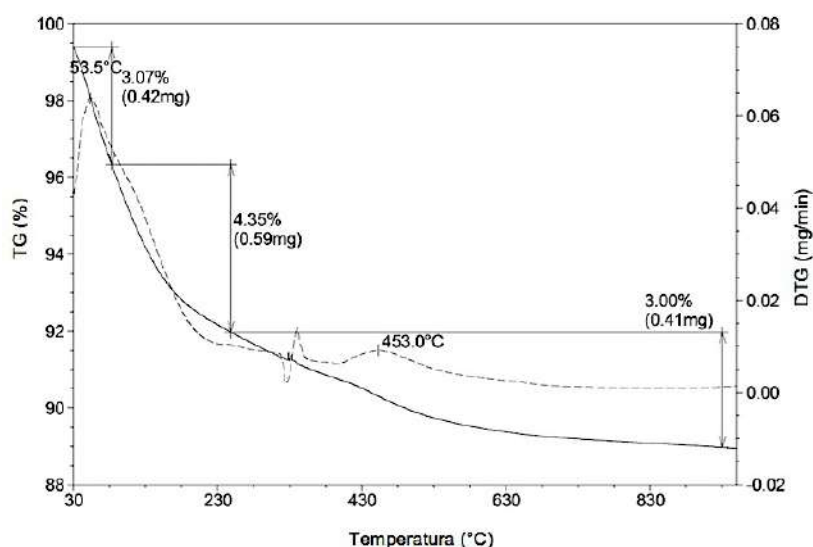


Figura 4.49: Curvas de TG e DTG da resina geopolimérica s.P – h.P.

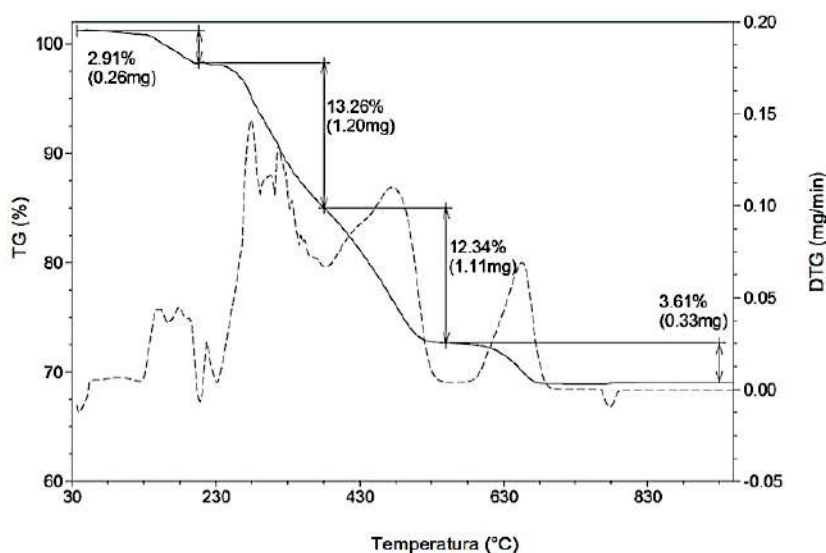


Figura 4.50: Curvas de TG e DTG da resina epóxi comercial.

Tabela 4.33: Perda de massa das resinas em função da temperatura (TG).

Resina	Redução de massa (%)				
	100°C	300°C	500°C	700°C	1000°C
s.S – h.S	5,86	13,75	15,26	16,03	16,41
s.S – h.P	6,81	11,93	13,66	14,48	14,66
s.P – h.S	4,57	10,41	12,08	12,61	12,79
s.P – h.P	4,62	8,63	10,10	10,87	11,15
Resina epóxi	0,00	5,64	26,44	31,64	31,64

#### **4.4.3. Microscopia eletrônica de varredura**

As micrografias das Figuras 4.51 a 4.53 mostram as quatro resinas geopoliméricas com ampliações de 40x e 700x, bem como a resina epóxi comercial com ampliações de 40x e 400x. A análise morfológica da superfície de fratura dos corpos-de-prova provenientes do ensaio losipescu levou em consideração a homogeneidade, porosidade e microfissuras da matriz e a zona de transição matriz-agregado miúdo (areia). As amostras de resinas geopoliméricas apresentaram matrizes homogêneas e fase gel densa, principalmente as resinas com hidróxido de potássio (s.S – h.P e s.P – h.P), que apresentaram superfícies de fratura lisas e com menos microfissuras. A estrutura massiva observada nas micrografias confirma a característica amorfa dos materiais geopoliméricos (DUXON *et al.*, 2007; ROCHA *et al.*, 2017;). Os vazios esféricos observados ocorrem devido ao aprisionamento de bolhas de ar durante o processo de adensamento na moldagem. As bolhas identificadas podem contribuir para aumento da porosidade total nas resinas. As microfissuras são atribuídas ao processo de fratura dos corpos-de-prova durante a execução dos ensaios mecânicos ou podem indicar um processo de geopolimerização retardada. De acordo com Yuan *et al.* (2016b), a geopolimerização retardada pode estar relacionada à ocorrência de ativação rápida nas primeiras idades. Isso ocorre porque o gel aluminossilicato formado pode envolver as partículas de metacaulim que ainda não reagiram e impedi-las parcialmente de serem envolvidas quimicamente pelo ativador alcalino. Esse fato pode ser observado nas resinas s.S – h.S e s.S – h.P (ativadas com silicato de sódio alcalino), que alcançaram valores elevados de resistência mecânica nas primeiras 24h (48,95 MPa e 49,39 MPa), respectivamente, conduzindo a poros com microfissuras características de secagem rápida (Figura 4.54). A zona de transição matriz-agregado miúdo indica um comportamento diferente entre as quatro resinas geopoliméricas após a fratura.

É possível observar que as resinas mistas s.S – h.P e s.P – h.S apresentaram menos fissuras na zona de transição (contornando o agregado miúdo) do que as resinas s.S – h.S e s.P – h.P, o que confirma a aderência superior dessas matrizes (s.S – h.P e s.P – h.S) ao agregado, mesmo após a fratura do corpo-de-prova.

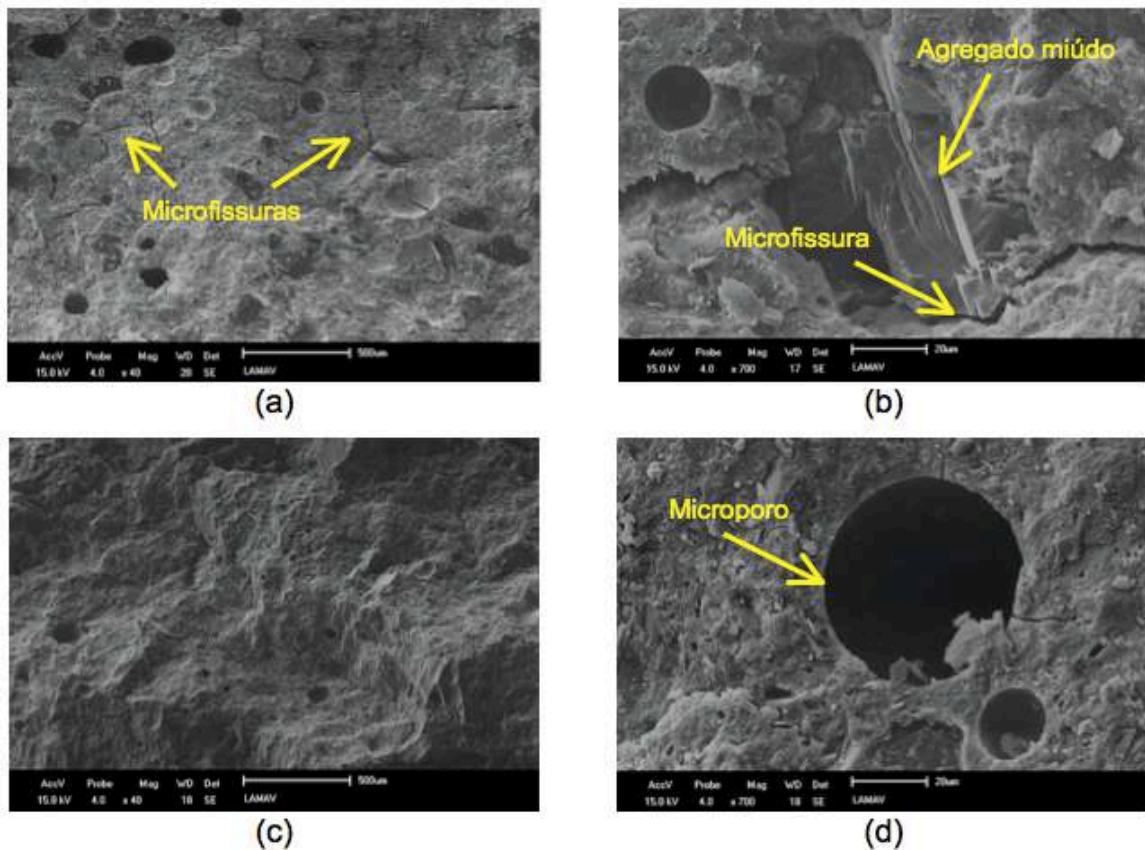


Figura 4.51: Micrografias das resinas geopoliméricas com silicato de sódio alcalino: (a) s.S – h.S (40x); (b) s.S – h.S (700x); (c) s.S – h.P (40x); (d) s.S – h.P (700x).

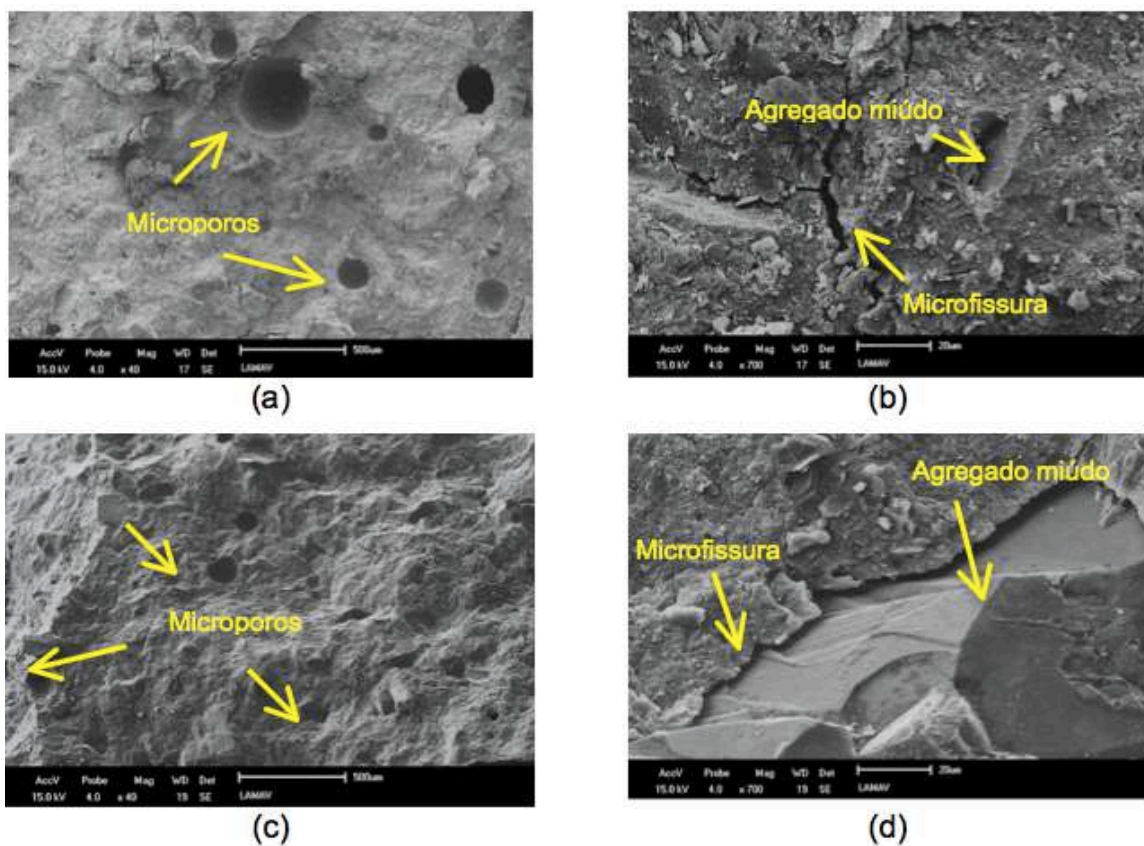


Figura 4.52: Micrografias das resinas geopoliméricas com silicato de potássio: (a) s.P – h.S (40x); (b) s.P – h.S (700x); (c) s.P – h.P (40x); (d) s.P – h.P (700x).

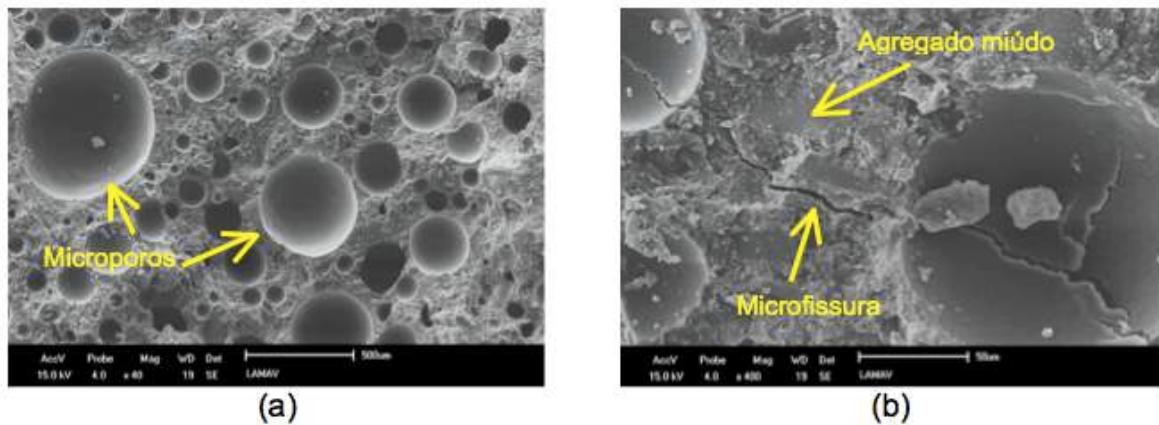


Figura 4.53: Micrografias da resina epóxi comercial: (a) aumento de 40x; (b) aumento de 400x.

A resina epóxi comercial se mostrou bastante resistente mecanicamente, apesar da presença de inúmeros poros na matriz. A zona de transição indica excelente aderência entre a matriz e o agregado. Entretanto, é possível constatar uma microfissuração generalizada na matriz da resina epóxi (Figura 4.53).



Figura 4.54: Micrografia da resina geopolimérica s.S – h.S (700x).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos resultados obtidos no programa experimental e as sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusões

Quatro resinas geopoliméricas foram produzidas à base de metacaulim e combinação de diferentes ativadores alcalinos. Estas resinas foram avaliadas quanto às suas propriedades físicas, mecânicas e, principalmente, quanto à sua eficiência (aderência e resistência ao cisalhamento) na recuperação de estruturas de concreto armado. Os resultados mais relevantes obtidos no programa experimental permitiram concluir que:

- a presença de KOH na solução ativadora alcalina melhorou a trabalhabilidade das resinas. As soluções com KOH apresentaram menor viscosidade quando comparadas àquelas com NaOH, para um mesmo tipo de silicato. Logo, a viscosidade da solução ativadora alcalina tem grande influência sobre a viscosidade da resina e, conseqüentemente, sobre a sua trabalhabilidade;
- as soluções ativadoras alcalinas com maior presença de cátions de sódio na composição apresentaram tempos de início e fim de pega reduzidos, confirmando sua influência sobre estes parâmetros;
- as resinas geopoliméricas alcançaram valores próximos entre si, de resistência à compressão e de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, aproximadamente 80 MPa e 6 MPa, respectivamente. Após a análise estatística, pelos métodos de variância e Tukey, constatou-se que a resistência à compressão e à tração por compressão diametral entre as quatro resinas geopoliméricas eram iguais entre si;
- as resinas geopoliméricas mostraram bons resultados de resistência ao cisalhamento, principalmente para o módulo de cisalhamento obtido pelo ensaio losipescu. As resinas produzidas com soluções ativadoras alcalinas mistas apresentaram resultados superiores para o módulo de cisalhamento em relação às demais, sendo de 7 a 8 GPa. Já a resina epóxi comercial atingiu valor médio inferior (entre 54 e 66%) em comparação com as resinas geopoliméricas. Estes resultados mostraram que, apesar das resinas geopoliméricas apresentarem eficaz capacidade portante quanto ao

cisalhamento, os valores mais baixos de rigidez (maior deformabilidade) em relação aos substratos eram esperados, requisito este considerado necessário na recuperação de estruturas de concreto;

- os ensaios de cisalhamento duplo em corpos-de-prova (com e sem chapas de aço) colados com resinas geopoliméricas apresentaram valores normalizados similares aos obtidos pela resina epóxi comercial. Para o caso dos corpos-de-prova colados sem chapas de aço, a resina s.P – h.S apresentou valor 13% maior do que o da resina epóxi comercial. Com relação aos corpos-de-prova colados com chapas de aço, todas as resinas apresentaram valores iguais entre si, exceto a resina s.S – h.P. Em sentido amplo, pôde-se constatar que as resinas geopoliméricas e a resina epóxi comercial apresentaram desempenho mecânico muito próximos neste ensaio;
- os valores encontrados de coeficiente de aderência entre o substrato e as resinas geopoliméricas foram satisfatórios e comparáveis a outros materiais consolidados na Construção Civil e que são utilizados na recuperação estrutural (resina epóxi e argamassas poliméricas, entre outros). A análise estatística (ANOVA e teste de Tukey) revelou que o coeficiente de aderência obtido para as quatro resinas geopoliméricas e para a epóxi comercial são iguais entre si;
- os ensaios de tração por compressão diametral (*splitting test*) realizados em substratos (corpos-de-prova semicilíndricos) colados com resinas geopoliméricas revelaram que a resistência de aderência na interface substrato-resina foi maior que a resistência ao cisalhamento do substrato, fato observado pela ruptura coesiva no substrato;
- as resinas geopoliméricas com hidróxido de sódio apresentaram melhor desempenho do que aquelas com hidróxido de potássio ou com epóxi comercial nos ensaios ao cisalhamento por compressão. Os valores experimentais obtidos foram de duas a três vezes maiores em relação aos valores previstos pelas normas, as quais se revelaram conservadoras. O parâmetro de rugosidade utilizado foi baixo e similar para todos os substratos, indicando que os valores obtidos de resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina foi mais influenciado pelo coeficiente de coesão do que pelo atrito entre os materiais. Ruptura adesiva foi observada nesse caso, em

função da combinação de baixa rugosidade do substrato e inclinação do plano de cisalhamento ( $\alpha = 60^\circ$ );

- os corpos-de-prova recuperados com resinas geopoliméricas, nos ensaios de aderência à tração na flexão, apresentaram bons resultados, inclusive elevando a capacidade portante em relação ao substrato sem reparo (corpos-de-prova monolíticos). Segundo o tratamento estatístico, pelos métodos de variância e pelo teste de Tukey, as resistências alcançadas pela resina s.P – h.S e pela resina epóxi comercial são iguais entre si;
- no ensaio de tirante, tanto as barras lisas quanto as nervuradas, as resinas geopoliméricas apresentaram valores médios de coeficiente de conformação superiores a 1,0 - valor de referência exigido pela NBR 7477 (ABNT, 1982). Com relação à resistência de aderência dos tirantes de aço-resina geopolimérica, destacam-se as produzidas com silicato de potássio (s.P - h.S e s.P - h.P), que apresentaram valores superiores em relação aos obtidos por Castro (2000) e Silva (2015). Vale ressaltar que os resultados obtidos com as barras nervuradas-resinas geopoliméricas tiveram melhor desempenho que aqueles com barras lisas-resinas geopoliméricas;
- as quatro resinas geopoliméricas e a epóxi comercial foram expostas à degradação térmica. A análise termogravimétrica (TG) mostrou que as resinas geopoliméricas produzidas com silicato de sódio alcalino tiveram perdas de massa significativas (em torno de 15 e 16%), porém bem menores do que os 32% de perda de massa da resina epóxi comercial. Os resultados mostraram melhor estabilidade térmica das resinas geopoliméricas em relação à resina epóxi comercial;
- a análise por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura das resinas revelou diferenças significativas, dependendo do tipo de solução ativadora alcalina. As resinas produzidas com hidróxido de potássio apresentaram matriz densa e homogênea, enquanto as resinas com silicatos e hidróxidos misturados apresentaram zona de transição (interface agregado miúdo-matriz) com poucas microfissuras em relação às demais;
- por fim, conclui-se que o tipo e a composição da solução ativadora alcalina influencia diretamente na microestrutura, bem como nas características físicas e no comportamento mecânico das resinas geopoliméricas. Os resultados obtidos nesse trabalho corroboram os obtidos em estudos anteriores e

sugerem que as resinas geopoliméricas apresentam grande potencial de uso na recuperação de estruturas de concreto armado.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros, a fim de entender melhor o comportamento das resinas geopoliméricas para recuperação estrutural:

- estudar novas dosagens de resinas geopoliméricas, propondo variações das razões molares, tipos de precursores e componentes das soluções ativadoras alcalinas;
- avaliar a deformabilidade das resinas geopoliméricas (coeficientes de dilatação térmica, fluência, retração *etc.*);
- realizar ensaios de tempo em aberto e *pot life* nas resinas geopoliméricas, para verificar a evolução da consistência do material em função do tempo de aplicação (propriedades reológicas);
- determinar a resistência e a capacidade de deformação de resinas geopoliméricas com a adição de microfibras (*whiskers*) como, por exemplo, wollastonita;
- avaliar a resistência ao cisalhamento e a aderência entre as resinas geopoliméricas e substratos de concreto com resistência à compressão inferior (30 MPa) e superior (MPa) à utilizada nesse estudo (50 MPa);
- executar ensaios mecânicos para verificar o desempenho das resinas geopoliméricas quando aplicadas em diferentes tipos de substrato (concreto leve, concreto geopolimérico *etc.*) e de rugosidade interfacial;
- realizar ensaios de aderência entre as resinas geopoliméricas e barras de aço com outros diâmetros;
- projetar e efetuar ensaios mecânicos em vigas de concreto armado reparadas com chapas e/ou barras de aço coladas com resinas geopoliméricas.
- propor modelos de simulação pelo método de elementos finitos (MEF) para prever o comportamento mecânico de peças danificadas e recuperadas com resinas geopoliméricas.



## REFERÊNCIAS

ABDULKAREEM, O.A.; MUSTAFA AL BAKRI, A.M.; KAMARUDIN, H.; KHAIRUL NIZAR, I.; SAIF, A.A. (2014) **Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete**. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 50: 377–387.

ABU-TAIR, A.I.; RIGDEN, S.R.; BURLEY, E. (1996) **Testing the bond between repair materials and concrete substrate**. ACI Mater Journal 93(6):53–8.

ALVAREZ-AYUSO, E.; QUEROL, X.; PLANA, F.; ALASTUEY, A.; MORENO, N.; IZQUIERDO, M. (2008) **Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-combustion) fly ashes**. J Hazard Mater 2008;154:175–83.

AKTAS, M.; DENIZ, M.E. (2010) **Determination of in-plane shear properties of composites laminates**. Electronic Journal of Machine Technologies (7): 13-23.

AMBILY, P.S.; RAVISANKAR, K.; UMARANI, C.; DATTATREYA, J.K.; LYER, N.R. (2013) **Development of ultra-high-performance geopolymer concrete**. Magazine of Concrete Research (66) 82-89.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for Reinforced Concrete** (ACI 318M-05). Detroit, USA, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D 5739M/05. **Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched shear beam method**. West Conshohocken, PA, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C1404 / C1404M-98. **Standard Test Method for Bond Strength of Adhesive Systems Used with Concrete as Measured by Direct Tension**. West Conshohocken, PA, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C1042. **Standard Test Method for Bond Strength of Latex Systems Used With Concrete By Slant Shear.** West Conshohocken, PA, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 1231/C. **Standard practice for use of unbounded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders.** Novo México, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C1404. **Standard test method for bond strength of adhesive systems used with concrete as measured by direct tension.** West Conshohocken, PA; 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 1583. **Standard test method for tensile strength of concrete surface and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method).** 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C-270. **Standard specification for mortar for unit masonry.** United States, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 109. **Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 50 mm cube specimens).** USA, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C78M-10. **Standard test method for flexural strength of concrete.** West Conshohocken, PA; 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C882 / C882M-13a, **Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear,** West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C496. **Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.** West Conshohocken, PA; 2017.

ANTUNES, R.P.N.; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G. **Influência da sequência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliadas por squeeze-flow**, 2005. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, p. 158-179, Florianópolis, Brasil, 23-25 Maio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo**. NBR 5628. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregados – Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos: NBR 13281**. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido: NBR 13280**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade: NBR 15259**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água: NBR 13277.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração: NBR 15258.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação.** NBR 7480. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** NBR 9778. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: caracterização reológica pelo método squeeze-flow.** NBR 15839. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: requisitos.** NBR 15894-1. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Determinação da tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** NBR 5752. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Projeto de estruturas de concreto: procedimentos.** NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** NBR 5751. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Materiais metálicos: ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.** NBR ISO 6892-1. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Areia normal para ensaio de cimento – Especificações.** NBR 7214. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Materiais pozolânicos: requisitos.** NBR 12653. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** NBR 5738. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** NBR 6457. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência.** NBR 13276. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Solo: análise granulométrica.** NBR 7181. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal.** NBR 16606. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Cimento Portland: determinação do tempo de pega.** NBR 16607. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Cimento Portland: requisitos.** NBR 16697. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão.** NBR 7215. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - **Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci. - Essai de flexion sur éprouvette évidée et reconstituée:** AFNOR NF P18-851. Bruxelles, 1992.

AUSTIN, S.; ROBINS, P.; PAN, Y. (1999) **Shear bond testing of concrete repairs.** Cement and Concrete Research 29(7): 1067–76.

AYKAC, S.; KALKAN, I.; AYKAC, B.; KARAHAN, S.; KAYAR, S. (2013) **Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Beams Using External Steel Plates,** Journal of Structural Engineering, V.139, No.6, pp. 929–939.

AZEVEDO, A.G.S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C.T. (2018) **Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha.** Cerâmica 64: 388-396.

AZEVEDO, J.S.; DIAS, D.P.; SOARES, J.C. (2019) **Efeito da temperatura em resinas geopoliméricas à base de metacaulim ativado por diferentes combinações entre silicatos e hidróxidos.** 61º Congresso Brasileiro do Concreto.

BAGHI, H.; BARROS, J.A.O. (2016) **Shear properties of the strain hardening cementitious composite material.** Journal of Materials in Civil Engineering 28: 04016093-1/13.

BALCZÁR, I; KORIM, T.; DOBRÁDI, A. (2015) **Correlation of strength to apparent porosity of geopolymers – Understanding through variations of setting time.** Construction and Building Materials. 93: 983-988.

BARBOSA, M.P. (1998) **Uma contribuição experimental e numérica sobre estruturas de concreto armado de elevado desempenho: estudo da aderência ancoragem e do comportamento de vigas fletidas.** Tese de livre-docência. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

BÉLAIR, N.; BISSONNETTE, B.; COURARD, L. (2003) **Mise au point d'une procédure de caractérisation quantitative des surfaces démolles en béton en vue de travaux de réfection.** 10 Colloque sur la Progression de la Recherche Québécoise sur les Ouvrages d'Art. Quebec.

BENTUR, A.; MINDESS, S. (2006) **Fibre reinforced cementitious composites.** CRC Press.

BRITISH STANDARD - BS 1881: Part 207. **Testing the interface bond strength between existing and new concrete.** England, 1992.

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

BRITISH STANDARD - BS EN 12636. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – test methods – determination of adhesion concrete to concrete.** England, 1999.

BRU, T.; OLSSON, R.; GUTKIN, R.; VYAS, G. M. (2017) **Use of the losipescu test for the identification of shear damage evolution laws of an orthotropic composite.** Composite Structure 174: 319-328.

CABRAL, A.E.B.; DAL MOLIN, D.C.C. ; BAUER, E. **Avaliação de sistemas de reparo para estruturas de concreto armado atacadas por cloretos utilizando a resistência de polarização.** In: Congresso Brasileiro do Cimento. São Paulo, 1999.

CABRAL, R.F.; CICHELLI, P.P.M.; ALVARENGA, C.F.A.; ARAÚJO, F.A.; ROSA, V.V.S.; LEITE, B.F. (2018) **Estudo da resistência mecânica e análise térmica da resina epóxi.** Revista Teccen, Jun/Dez.; 11 (2): 32-39.

CAMPAGNOLO J.L; CAMPOS FILHO A.; SILVA FILHO, L.C.P. **Técnicas de ancoragem em vigas de concreto armado reforçadas com chapas de aço coladas,** In: 36a. REIBRAC - Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto, 1994, Porto Alegre/ RS.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION - CAN/CSA A23.2-6B. **Methods of test to determine adhesion by tensile load.** Canada; 1990.

CANADIAN PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. CSA Standard Association A23.3-04: Design of Concrete Structures. 2 ed. Ontario, Canada, 2004.

CÁNOVAS, M.F. (1985) **Refuerzo de elementos estructurales de hormigón armado mediante encolado de bandas de acero con adhesivos epoxídicos,** Informes de la Construcción, V.37, No. 373, pp. 27-38.

CARASEK, H. (1996) **Aderência de Argamassas a Base de Cimento Portland a Substratos Porosos – Avaliação dos Fatores Intervenientes e Contribuição ao**



**Estudo do Mecanismo de Ligação.** 285 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**, 2007. São Paulo: Arte Interativa. Cap. 26, p. 863-904.

CARASEK, H.; ISAIA, G.C. (2010) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON 2010. p. 893-941.

CARDOSO, F.A.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M. **Caracterização reológica de argamassas através do método de squeeze-flow**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis p 121-143, 2005.

CARDOSO, F.A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**, 2009. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 158p.

CHANG, J.J. (2003) **A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes**. Cement Concrete Research, 33(7): 1005-1011.

CHENG, T.W.; LEE, M.L.; KO, M.S.; UENG, T.H.; YANG, S.F. (2012) **The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymers**. Applied Clay Science 56: 90-96.

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W.; RATTANASAK, U. (2009) **Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers**. Waste Manage; 29:539–43.

CLÍMACO, J.C.T.S.; REGAN, P.E. (2001) **Evaluation of bond strength between old and new concrete in structural repairs**. Mag Concrete Research 53(6):377–90.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN, CEB-FIP MODEL CODE 1990, MC90, **Design Code**, 366 p., Thomas Telford Services Ltda., London, 2010.

COSTA, V.C.M. (2012) **Influência da corrosão generalizada na aderência e comportamento estrutural de elementos de concreto armado**. Tese de doutorado em estruturas e construção civil. Universidade de Brasília, Distrito Federal.

COSTA, H.; CARMO, R.N.F.; JÚLIO, E. (2018) **Influence of lightweight aggregates concrete on the bond strength of concrete-to-concrete interfaces**. Construction and Building Materials 180: 519-530.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. (2005) **Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products**. Fuel. 84: 2048-2054.

CUNHA, M.F.; FORTI, B.A.; SILVA B.I. (2010) **Tendências da normalização de metacaulim para utilização em concreto de alto desempenho**. Reunião Anual do Ibrancon 52 - Novas Tecnologias do Concreto para o Crescimento Sustentável, 2010, Ceará. Anais: IBRACON 2010, p46.

DAL MOLIN, D.C.C.; CABRAL, A.E.; BAUER, E. (2000) **Avaliação de aspectos mecânicos de argamassas de reparo utilizadas em estruturas de concreto armado**. In: VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC 2000, 2000, Salvador. Anais do VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC 2000. v. 2. p. 885-892.

DAVIDOVITS, J. (2008) **Geopolymer Chemistry e Application**. Institute Geopolymère, 2 edição, Cap. 1, Pag. 9. Disponível em: [http://www.geopolymer.org/fichiers\\_pdf/geopolymer-book-chapter1.pdf](http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/geopolymer-book-chapter1.pdf) . Acesso em: 28 de Abril de 2020.

DE LARRARD, F. (1999) **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**. **Modern Concrete Technology Series**. vol. 9, E&FN SPON, London, 421 pp.

DEGHENHARD, C.C; TEIXEIRA, T; VARGAS, A; VITO, M; PICCININI, A.C; VALE SILVA, B. (2016) **Análise experimental de distintas configurações de chapa metálica no reforço à flexão em vigas de concreto armado**. Revista ALCONPAT, Volume 6, Número 2, Maio - Agosto 2016, Páginas 188 – 199.

DELATTE, N.J; WILLIAMSON, M.S; FOWLER, D.W. (2000) **Laboratory and field testing of concrete bond development for expedited bonded concrete overlays**. ACI Material Journal 97(3): 272–80.

DE WEERDT, K. (2011). **Geopolymers – State of the art**. Coin Project report N° 37.

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

DIAS, J.C. (2004) **Resistência ao cisalhamento do compósito carbono reforçado com fibras de carbono/tecido tipo twill**. Revista Matéria, v.9, n.4, pp.263-270.

DIAZ-LOYA, E.I.; ALLOUCHE, E.N.; EKLUND, S. (2010) **Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers**. Fuel. 89: 992-996.

DING, Y.C.; CHENG, T.W.; DAI, Y.S. (2017) **Application of geopolymer paste for concrete repair**. Structural concrete 18: 561-570.

DUXSON, P.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; MALLICOAT, S.W.; KRIVEN, W.M.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2005) **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties**. Journal of Colloid and Interface Science. A: Physicochemical Engineering Aspects 269: 47-58.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2007a) **Geopolymer technology: the current state of the art**. Journal Material Science 42, 9: 2917-2933.

DUXSON, P.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2007b) **The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'**, Cement Concrete Res. 37: 1590-1597.

DUXSON, P.; MALLICOAT, S.W.; LUKEY, G.C.; KRIVEN, W.M.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2007c) **The effect of álcali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers**, Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects 292: 8-20.

EUROCODE, 2. EN 1992-1-1 - **Design of concrete structures, Part 1-1. General rules and rules for buildings**. European Committee for Standardization Brussels, Belgium – 2004.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; CRIADO, M. (2004) **Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: a Descriptive Model**. Cement and Concrete Research. 1204-1209.

FRANÇA, F.C.C. (2017) **Avaliação da aderência e resistência a flexão de vigas de concreto armado reparadas com argamassa geopolimérica**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro.

GAMA, D.P.N (2017) **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. Dissertação de mestrado. UFF. Rio de Janeiro.

GAMAGE, J.; AL-MAHAIDI, R.; WONG, M. (2006) **Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures**, Composite Structures, Vol.75, 199–205.

GARCIA-LODEIRO, I. (2015). **Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders**. In: PACHECO-TORGAL, F; LABRINCHA, J; LEONELLI, C; PALOMO, A; CHINDAPRASIT, C (eds.), Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. 1. ed. Woodhead Publishing, pp. 49-73.

GONÇALVES, V.; PARDINI, L.; GARCIA, K.; ANCELOTTI, A.; BEZERRA, E. (2009) **losipescu shear resistance in composites of carbon and glass fiber with epoxy resin**. Journal of Aerospace Technology and Management 1: 49-53.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; P.D. RYAN, P.D (2001) **PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis**. Palaeontologia Electronica 4(1): 9pp.

HARDJITO, D.; RANGAN, B.V. (2005) **Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete**. Research report GC1, Curtin University of Technology, Australia.

He, J.; JIE, Y.; ZHANG, J.; YU, Y.; G. ZHANG, G. (2013) **Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites**. Cement Concrete Composites 37, 108-118.

HEAH, C.Y.Y.; KAMARUDIN, H.; BNHUSSAIN, M.; LUQMAN, M.; RUZAIDI, C.M.M.; HU, S.; WANG, H.; ZHANG, G.; DING, Q. (2008) **Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag**. Cement Concrete Composites 30: 239–244.

HOFBECK, J.A.; IBRAHIM, I.O.; MATTOCK, A.H. (1969) **Shear transfer in reinforced concrete**. Journal of the American Concrete Institute 66(2): 119-128.

HOSAN, A.; HAQUE, S.; SHAIKH, F. (2016) **Compressive behavior of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: a comparative study**. Journal of Building Engineering 8: 123-130.

KAMSEU, E.; BIGNOZZI, M.C.; MELO, U.C.; LEONELI, C.; SGLAVO, V.M. (2013) **Design of inorganic polymer cements: effects of matrix compression on microstructure**, Constr. Build. Mater. (38), 1135 –1145.

KARAKOCA, M.B.; TURKMEN, I.; MARAS, M.M.; KANTARCI, F.; DEMIRBOGA, R.; TOPRAK, M.U. (2014) **Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar**. Constr Build Mater. 72: 283-292.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. (2007) **Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review**. Journal of Materials 42: 729–746.

KHAN, M.I.; AZIZLIN, K.; SUFIAN, S.; MAN, Z. (2015) **Sodium silicate-free geopolymers as coating materials: effects of Na/Al and water/solid ratios on adhesion strength**. Ceramics International (41)2: 2794-2805.

KHUN MA, C.; AWANG, A.Z.; OMAR, W. (2018) **Structural and material performance of geopolymer concrete: A review**. Construction and Building Materials 186: 90–102

KONG, D.L.Y.; SANJAYAN, J.G. (2010) **Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete**. Cement and Concrete Research. 40(2), 334 – 9.

KOMMITSAS, K.; ZAHARAKI, D. (2007) **Geopolymerisation: A Review and Prospects for the Minerals Industry**. Minerals Engineering. 20: 1261–1277.

KRIEGH, J.D. (1976) **Arizona slant shear test: a method to determine epoxy bond strength**. Journal American Concrete Institute 73(3): 372–3.

KUMOSA, M.; ODEGARD, G.; ARMENTROUT, D.; KUMOSA, L.; SEARLES, K.; SUTTER, J.K. (2002) **Comparison of the +45 Tensile and Iosipescu shear tests for woven fabric composite materials**. Journal Composite Technology Research 24(1):13.

KUNIEDA, M.; KURIHARA, N.; UCHIDA, Y.; ROKUGO, K. (2000) **Application of tension softening diagrams to evaluation of bond properties at concrete interfaces**. Engineering Fracture Mechanical 65(2–3): 299–315.

LABOISSIERE, P. (1993) Current and future applications of advantaged composite materials in structural engineering. Canadian Society for civil engineering, 43p.

LARRALDE, J.; SCHULZE, E.M.; WECKER-MANN, D. (2001) **A simplified shear test for the adhesion of FRP composites to concrete**. Cement Concrete and aggregates (23) 1: 66-70.

LASKAR, S.M.; Talukdar, S. (2017) **Development of ultrafine slag-based geopolymer mortar for use as repairing mortar**. J. Mater Civ. Eng. 29(5).

LEE, W.K.W. e VAN DEVENTER, J.S.J. (2002) **The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers**. Colloids and Surfaces. A 211: 115 – 126.

LEONG, H.Y.; ONG, D.E.L.; SANJAYAN, J.G.; NAZARI, A. **The effect of different Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based geopolymer**. Construction and Building Materials 106: 500 – 511, 2016.

LIEW, Y.M.; KAMARUDIN, H.; BAKRI, A.M.M.A.; BINHUSSAIN, M.; LUQMAN, M.; NIZAR, I. K. (2011) **Influence of solids-to-liquid and activator ratios on calcined kaolin cement powder**. Physics Procedia. 22: 312–317.

LIMA, F.T; SILVA F.J.; THAUMATURGO, C. (2005) **Xanes na borda-k do Si do sistema caulim-metaculim-geopolímero**. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo. 24(2): 90-92.

LIN, I.J.; CHEN, Y.L. (1989) **Shear transfer across a crack in reinforced high strength concrete**. Proceedings 2nd east Asia-Pacific conference on structural engineering and construction, Thailand, January. pp. 505-510.

LONG A; MURRAY A. (1984) **The pull-off partially destructive test for concrete**. American Concrete Institute. Special publication.

LONGHI, M.A. (2015) **Álcali-Ativação de Lodo de Caulim Calcinado E Cinza Pesada Com Ativadores Convencionais E Silicato de Sódio Alcalino Alternativo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de doutorado.

MANSUR, M.A.; VINAYAGAM, T.; TAN, K. (2008) **Shear transfer across a crack in reinforced high-strength concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, pp.294-302.

MAZZA, S.C. (2010) **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência entre argamassa de reparo geopolimérica e substrato de concreto com cimento Portland**. Dissertação de mestrado em engenharia ambiental urbana. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. (1994) **Concreto: Estrutura, propriedades e Materiais**. São Paulo, Pini, 1994.

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

MENON, N.V. (2008) **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

MORENO Jr., R.; SELMO, S.M.S. (2001) **Reparos localizados superficiais em estruturas de concreto – Análise da aderência segundo métodos de ensaios distintos**. 43° IBRACON-REIBRAC - Instituto Brasileiro do Concreto.

MORGAN, D.R. (1996) **Compatibility of concrete repair materials and systems**. Construction and Building Materials, v. 10, n. 1, p. 57- 67.

MORIN, D.; HAUGOU, G.; LAURO, F. (2011) **Experimental characterization of a toughened epoxy adhesive under a large range of strain rates**. Journal of Adhesion Science and Technology 25: 1581-1602.

MORTON, J.; HO, H.; TSAI, M.Y.; FARLEY, G.L. (1992) **An evaluation of the losipescu specimen for composite materials shear property measurement**. Journal of Composites Materials 26(5): 708–750.



NADERI, M. (2009) **Analysis of the slant shear test**. Journal of Adhesion Science and Technology 23(2): 229 – 45.

NEMATOLLAHI, B., SANJAYAN, J. (2014) **Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer**. Materials and Design. 57: 667–672.

NEVILLE, A.M. (1997) **Propriedades do concreto**. Pini, São Paulo. P.51.

NORMA PORTUGUESA - NP EN 12390-5. **Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens**. Portuguese Institute for Quality; 2009.

NORMA PORTUGUESA - NP EN 12390-6. **Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens**. Portuguese Institute for Quality; 2009.

NORWEGIAN STANDARD - NS 3473 E: **Concrete Structures Design and Detailing Rules**. Oslo, Norwegian, 2004.

ODEGRAD, G.; KUMOSA, M. (2000) **Determination of shear strength of unidirectional composite materials with the losipescu and 10° off-axis shear tests**. Composites Science Technology 60(16): 2917–2943.

OHAMA, Y.; DEMURA, K.; NAGAO, H.; OGI, T. (1986) **Adhesion of polymer modified mortars to ordinary cement mortars by different test methods**. In: RILEM international symposium on adhesion between polymers and concrete: bonding, protection, repair.

OLIVEIRA, A.M.A. (2018) **Determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassa à base de metacaulim ativado por NaOH, KOH e NaOH + KOH**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

OZER, I.; SOYER-UZUN, S. (2015) **Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios**. *Ceramics International* 41(8): 10192-10198.

PARK, S.; POUR-GHAZ, M. (2018) **What is the role of water in the geopolymerization of metakaolin**. *Construction and Building Materials* 182: 360-370.

PACHECO-TORGAL, F.; MOURA, D.; DING, Y.; JALALI, S. (2011) **Composition strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars**. *Construction and Buildings Materials*. 25: 3732-3745.

PACHECO-TORGAL, F. (2014) **Introduction to Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes** 1. Ed. Woodhead Publishing, p. 1-16.

PACKHAM, D.E. (2003) **Surface energy, surface topography and adhesion**. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 23: 437-448.

PADHY, G.S., LEMAIRE, C., AMIRTHARAJ, E.S., *et al.* (2007) **Pore size distribution in multiscale porous media as revealed by DDIF-NMR, mercury porosimetry and statistical image analysis**. *Colloids Surfaces A: Physicochemistry Engineering Aspects*, v. 300, n. 1–2, pp. 222–234.

PANIAS, D.; GIANNOPOULOU, I.P.; PERRAKI, T. (2007) **Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 301: 246-254.

PETRIE, E.M. **Epoxy Adhesive formulations**, McGraw-Hill, 2006.

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina do Metacaulino**. Tese de Doutorado, Universidade do Minho. 2004.

POUHET, R.; CYR, M. (2016) **Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes**. *Construction and Building Materials* 120: 150-160.

PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; van DEVENTER, J.S.J. (2005) **Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results.** Chemistry of Materials 17: 3075–3085.

PROVIS, J.L.; VAN DEVENTER, J.S.J. (2009). **Geopolymers - Structure, processing, properties and industrial applications.** Woodhead Publishing Limited.

PRYNIA, C.; PRE, S.; KWESI, S.C.; SAKONWAN, H. (2012) **Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems,** J. Mater Sci (47) 4876-4883.

QUARCIONI, V.A.; CHOTOLI, F.F.; ANGULO, S.C.; GUILGE, M.S.; CAVANI, G.D.E; DE CASTRO, A.L.; CINCOTTO, M.A. (2009) **Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo metodo de cálculo de volumes.** Ambiente Construído, v. 9, n. 4, p. 175-18.

RAHIER, H.; WASTIELS, J.; BIESEMANS, M.; WILLEN, R.; VAN ASSCHE, G; VAN MELE, B. (2007) **Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers.** Journal of Materials Science, (42) pp. 2982-2996.

RAHIM, R.H.A; RAHMIATI, T; AZIZLI, K.A; MAN, Z; NURUDDIN, M. F; LUKMAN, I. (2015). **Comparison of using NaOH and KOH activated fly ash-based geopolymer on the mechanical properties.** Materials Science Forum, Vol. 803, pp. 179-184, Trans Tech Publications, Switzerland.

RANGEL, G.P. (2017) **Estudo da viabilidade tecnológica de argamassas ativadas por NaOH e KOH.** Dissertação de mestrado, UENF – Rio de Janeiro.

RANJBAR, N.; BEHNIA, A.; CHAI, H.K.; ALENGARAMD, U.J.; JUMAATD, M.Z. (2016) **Fracture evaluation of multi-layered precast reinforced geopolymer concrete composite beams by incorporating acoustic emission into mechanical analysis.** Construction and Building Materials. 127: 274–283

ROCHA, R.J.; ROCCO, J.A; SILVA, M.A; LHA, K. (2017) **High layer coating obtained in the reaction of modified novolacepoxys resins with organosiloxanes through acid catalysis**. Química Nova, 40 (2), 146- 153.

ROCHA, T.S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação de temperatura**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, 2017.

SALDANHA, R.; JÚLIO, E.; COSTA, D.D.; SANTOS, P. (2013) **A modified slant shear test designed to enforce adhesive failure**. Construction and Building Materials 41: 673–680

SALOMA; SAGGAFF, A.; MAWARNI, A. (2016) **Geopolymer mortar with fly ash**. Matec Web Conferences (78) 01026.

SANTOS, P. **Assessment of the shear strength between concrete layers**. PhD Thesis in Civil Engineering, Faculty of Sciences and Technology, Coimbra University, Coimbra, 2009.

SANTOS, P.; JÚLIO, E.N.B.S. (2011) **Factors affecting bond between new and old concrete**. ACI Material Journal, 108(4):449–56.

SANTOS, P.; JÚLIO, E.N.B.S. (2012) **A state-of-the-art review on shear-friction**. Engineering Structures 45: 435-448.

SHAO, N.; LIU, Z.; XU, Y.; KONG, F.; WANG, D. (2015) **Fabrication of hollow microspheres filled fly ash geopolymer composites with excellent strength and low density**. Materials Letters. 161: 451- 454.

SILVA, F.J. **Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada**. Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2000, Brasil.

SILVA, J.Z.R. **Argamassas para reparo de estruturas de concreto**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001, Brasil.

SILVA, R.P.; BARROS, M.M.S.B.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M. (2005) **Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, p. 106-120, Florianópolis, Brasil, 23-25 Maio.

SILVA, M.A. (2015) **Desenvolvimento e Caracterização Experimental de Concretos Autoadensáveis contendo seixo de rio e fibras de aço**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SINDHUNATA, J.S.S.; VAN DEVENTER, G.C.; LUKEY, H.; XU (2006) **Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization**. Ind. Eng. Chem. Res. 45: 3559-3568.

SKAF, T.B. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. Dissertação de mestrado em Ciências dos Materiais. IME, 2008, Rio de Janeiro.

SOARES, J.C; DIAS, D.P.; GARCIA, S.L.G. (2007) **Aço-concreto geopolimérico: correlação entre tensão de aderência e comprimento de ancoragem**. Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, v.3, n.3: 39-52.

SOMNA, K; JATURAPITAKKUL, C; KAJITVICHYANUKUL, P; CHINDAPRASIRT, P. (2011) **NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature**. Fuel. 90: 2118–2124.

STOJCEVSKI, F.; HILDITCH, T.; HENDERSON, L.C. (2018) **A modern account of losipescu testing**. Composites A 107: 545 – 554.

SUSTERSIC, J.; ZAJC, A. (1999) **Characteristics of bond between concrete layers**. In: RILEM international symposium on adhesion between polymers and concrete.

SWANSON, S.R.; MESSICK, M.; TOOMBERS, G.R. (1985), **Comparison of torsion tube and losipescu in-plane shear test results for a carbon fibre-reinforced epoxy composite**. Composites 16, p. 220-4.

TABOR, L.J. (1978) **Evaluation of resin systems for concrete repair**. Mag Concrete Research 30(15): 221–5.

TEW, B.W.; ODOM, E.M.; TEEL, J.D. (2001) **Composite specimen bearing failure reduction in losipescu Shear Tests**. Experimental Mechanics 41: 218-224.

TORGAL, F.P. (2007) **Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira**. Tese de doutorado em engenharia civil. Universidade da Beira Interior, Portugal.

TORGAL, F.P.; GOMES, J.C.; JALALI, S. (2007) **Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders**. Cement and Concrete Research (37) 933-941.

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

TSCHEGG, E.K; INGRUBER M.; SURBERG, C.H.; MUNGER, F. (2000) **Factors influencing fracture behaviour of old–new concrete bonds**. ACI Mater Journal 97(4):447–53.

UENG, T.H.; LYU, S.J.; CHU, H.W.; LEE, H.H.; WANG, T.T. (2012) **Adhesion at interface of geopolymer and cement mortar under compression: an experimental study**. Construction and Building Materials 35: 204–210.

VAN DEVENTER, J.S.J. *et al.* (2010) **Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials**. *Waste and Biomass Valorization* 1(1): p. 145-155.

VAN JAARSVELD, J.G.S.; VAN DEVENTER, J.S.J.; LOREZEN, L. (1997) **The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: part I. Theory and applications**, *Minerals Engineering* 10, 659–669.

VAN JAARSVELD, J.G.S.; VAN DEVENTER, J.S.J.; LUKEY, G.C. (2002) **The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers**. *Chemical Engineering Journal* 89: 63–73.

VELASCO, R.V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. Tese de Doutorado, PEC-COPPE/UFRJ, 2008, Rio de Janeiro.

VICKERS, L.; VAN RIESSEN, A.; RICKARD, W.D.A. (2015) **Fire resistant geopolymers: role of fibres and fillers to enhance thermal properties**. Springer.

VILLA, C.; PECINA, E.T.; TORRES, R.; GÓMEZ, L. (2010) **Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite**. *Construction and Building Materials*. 24: 2084–2090.

WALL, J.S.; SHRIVE, N.G.; GAMBLE, B.R. (1986) **Testing of bond between fresh and hardened concrete**. In: *International symposium on adhesion between polymers and concrete: bonding, protection, repair*.

WALL, J.S.; SHRIVE, N.G. (1988) **Factors affecting new and old concrete**. *ACI Mater Journal* 85(2):117–25.

WALRATH, D.E.; ADAMS, D.F. (1983) **Analysis of the stress state in an losipescu shear test specimen**. Technical Report, NASA Langley Research Center.

WANG, H.L.; LI, H.H.; YAN, F.Y. (2005) **Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer**. *Colloids Surface, A* 268 1–6.

XU, H., VAN DEVENTER, J.S.J. (2000) **The geopolymerisation of aluminosilicate minerals**. *International Journal of Mineral Processing*. 59: 247–266.

XU, H.; VAN DEVENTER, J.S.J.; LUKEY, G.C. (2001) **Effect of alkali metals on the preferential geopolymerization of stilbite/kaolinite mixtures**. *Industrial Engineering Chemistry Research* 40: 3749–3756.

YASERI, S.; HAJIAGHAEI, G.; MOHAMMADI, F.; MAHDIKHANI, M.; FAROKHZAD, R. (2017) **The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste**. *Construction and Building Materials* 157: 534–545.

YUAN, J.; HE, P.; JIA, D.; Yang, C.; ZHANG, Y.; YANG, Z.; DUAN, X.; WANG, S.; ZHOU, J.; YE, G.; BREUGEL, K.V. (2016a) **Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials**. *Construction and Building Materials*. 112: 765-772.

YUAN, J.; HE, P.; JIA, D.; YANG, C.; Zhang, Y.; YANG, Z.; Duan, X.; Wang, S.; Zhou, Y.; (2016b) **Effect of curing temperature and SiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers**. *Ceram. Int.* (42): 16184 –16190.

ZHANG, S; GONG, K; LU, J. (2004) **Novel modification method for inorganic geopolymer by using water soluble organic polymers**. *Material Letter*, 58:1292–1296.

ZHANG, F.; ZHANG, L.; LIU, L; MU, C.; LIANG, Y. N.; HU, X. (2017) **Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers**. *Ceramics International*. 43: 3811–3817.

ZHANG, H.Y.; LV, H.R.; KODUR, V.; QI, S.L. (2018) **Comparative fire behavior of geopolymer and epoxy resin bonded fiber sheet strengthened RC beams**. *Engineering Structures* 155: 222-234.



ZUHUA, Z.; XIAO, Y.; HUAJUN, Z.; YUE, C. (2009) **Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer**. *Appl Clay Sci*; 43(2):218–23.

## ANEXO A

Os resultados da análise estatística foram gerados pelo programa Past (*Paleontological Statistics*) e são mostrados nas Tabelas A1 a A35.

Para a análise estatística, os tratamentos ou variáveis categóricas utilizados foram as resinas geopoliméricas à base de metacaulim diferidas entre si pelo tipo de solução ativadora alcalina utilizada e a resina epóxi comercial. As variáveis dependentes foram as diferentes características analisadas em cada procedimento experimental. Para cada análise foram apresentadas duas tabelas.

A primeira com os resultados da análise de variância (ANOVA). Porém, esses resultados não indicam quais os tratamentos são diferidos uns dos outros, caso essa diferença realmente exista.

A segunda mostra os resultados do teste de Tukey para um nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ), para detectar as diferenças entre as médias amostrais. Nessas análises, os valores médios da característica avaliada de cada resina foram comparados por pares (One-way ANOVA). Os valores destacados em vermelho na primeira matriz indicam que há diferenças significativas entre os tratamentos, para o nível de probabilidade estabelecido ( $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ ). Já os resultados destacados em vermelho na segunda matriz indicam que o tratamento da linha  $i$  difere significativamente do tratamento da coluna  $j$ .

### A.1. Caracterização das resinas

Os resultados da análise de variância dos valores médios dos ensaios de caracterização das resinas geopoliméricas e a indicação dos valores diferidos significativamente, segundo o teste de Tukey, são mostrados nas Tabelas A1 a A9. Para essas análises foram realizadas três repetições para cada tipo de resina geopolimérica em função da solução ativadora alcalina.

Tabela A1: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de densidade aparente no estado fresco; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para densidade aparente ( $\text{kg/m}^3$ )  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	$F_{\text{Calculado}}$	Probabilidade
Entre as amostras	16375	3	5458,32	<b>226,4</b>	<b>4,5E-08</b>
Dentro das amostras	192,87	8	24,11		
Total	16567,8	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: densidade aparente ( $\text{kg/m}^3$ )

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		<b>3,73E-08</b>	<b>1,09E-05</b>	<b>1,21E-07</b>
B	s.S – h.P	<b>3,73E-08</b>		<b>1,09E-05</b>	0,056
C	s.P – h.S	<b>1,09E-05</b>	<b>1,09E-05</b>		<b>0,0001</b>
D	s.P – h.P	<b>1,21E-07</b>	0,056	<b>0,0001</b>	

(b)

Tabela A2: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de retenção de água; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a retenção de água (%)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	$F_{\text{Calculado}}$	Probabilidade
Entre as amostras	0,057	3	0,019	1,68	0,248
Dentro das amostras	0,091	8	0,011		
Total	0,148	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: retenção de água (%)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9481	0,2434	0,5258
B	s.S – h.P	0,9481		0,4658	0,816
C	s.P – h.S	0,2434	0,4658		0,9129
D	s.P – h.P	0,5258	0,816	0,9129	

(b)

Tabela A3: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de índice de consistência *flow-table*; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para o índice de consistência *flow-table* (mm)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	3585,67	3	1195,22	31,32	9,03E-05
Dentro das amostras	305,33	8	38,17		
Total	3891,00	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: índice de consistência *flow-table* (mm)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,016	0,0009	5,16E-05
B	s.S – h.P	0,016		0,9775	0,0022
C	s.P – h.S	0,0009	0,975		0,0034
D	s.P – h.P	5,16E-05	0,0022	0,0034	

(b)

Tabela A4: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de consistência *squeeze-flow* (lento); (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para o índice de consistência *squeeze-flow* (mm)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	1954,24	3	651,41	50,56	1,52x10 <sup>-5</sup>
Dentro das amostras	103,08	8	12,89		
Total	2057,32	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: índice de consistência *squeeze-flow* (mm)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,0002	3,31x10 <sup>-5</sup>	1,96x10 <sup>-5</sup>
B	s.S – h.P	0,0002		0,16	0,0559
C	s.P – h.S	3,31x10 <sup>-5</sup>	0,16		0,8741
D	s.P – h.P	1,96x10 <sup>-5</sup>	0,0559	0,8741	

(b)

Tabela A5: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de consistência *squeeze-flow* (rápido); (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para o índice de consistência *squeeze-flow* (mm)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	120018	3	40006	4101	4,38x10 <sup>-13</sup>
Dentro das amostras	78,034	8	9,75		
Total	120096	11	-		

(a)

Fonte: autoria própria.

Teste de Tukey  
Variável: índice de consistência *squeeze-flow* (mm)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		2,29x10 <sup>-11</sup>	4,99x10 <sup>-14</sup>	4,99x10 <sup>-14</sup>
B	s.S – h.P	2,29x10 <sup>-11</sup>		5,97x10 <sup>-9</sup>	4,84x10 <sup>-10</sup>
C	s.P – h.S	4,99x10 <sup>-14</sup>	5,97x10 <sup>-9</sup>		1,30x10 <sup>-5</sup>
D	s.P – h.P	4,99x10 <sup>-14</sup>	4,84x10 <sup>-10</sup>	1,30x10 <sup>-5</sup>	

(b)

Tabela A6: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de densidade aparente no estado endurecido; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	49798,1	3	16599,4	90,32	1,64E-06
Dentro das amostras	1470,27	8	183,78		
Total	51268,3	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		1,13E-06	0,00016	1,63E-05
B	s.S – h.P	1,13E-06		0,00026	0,0064
C	s.P – h.S	0,00016	0,00026		0,0676
D	s.P – h.P	1,63E-05	0,0064	0,0676	

(b)

Tabela A7: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de coeficiente de capilaridade; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para coeficiente de capilaridade ( $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ )  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	$F_{\text{Calculado}}$	Probabilidade
Entre as amostras	6,21	3	2,07	51,72	1,39E-05
Dentro das amostras	0,32	8	0,04		
Total	6,53	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: coeficiente de capilaridade ( $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ )

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,7428	7,40E-05	6,3E-05
B	s.S – h.P	0,7428		0,0002	0,0001
C	s.P – h.S	7,40E-05	0,0002		0,9967
D	s.P – h.P	6,3E-05	0,0001	0,9967	

(b)

Tabela A8: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de absorção por imersão; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a absorção por imersão (%)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	$F_{\text{Calculado}}$	Probabilidade
Entre as amostras	41,96	3	13,98	54,22	$1,17 \times 10^{-5}$
Dentro das amostras	2,06	8	0,26		
Total	44,02	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: absorção por imersão (%)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		$8,50 \times 10^{-6}$	0,046	0,0104
B	s.S – h.P	$8,50 \times 10^{-6}$		$8,52 \times 10^{-5}$	0,0002
C	s.P – h.S	0,046	$8,52 \times 10^{-5}$		0,7032
D	s.P – h.P	0,0104	0,0002	0,7032	

(b)

Tabela A9: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de porosidade aparente; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para porosidade aparente (%)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	47,59	3	15,86	36,86	4,96x10 <sup>-5</sup>
Dentro das amostras	3,44	8	0,43		
Total	51,03	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: porosidade aparente (%)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,00012	0,9995	0,9985
B	s.S – h.P	0,00012		0,0001	0,0001
C	s.P – h.S	0,9995	0,0001		0,9932
D	s.P – h.P	0,9985	0,0001	0,9932	

(b)

## A.2. Propriedades mecânicas

Os resultados da análise de variância para as resistências à compressão das resinas geopoliméricas em função das idades (1, 3, 14, 28 e 90 dias), e à tração por compressão diametral aos 28 dias, bem como a indicação dos valores diferidos significativamente, segundo o teste de Tukey, são mostrados nas Tabelas A10 a A15.

Tabela A10: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão após 1 dia; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a resistência em (MPa)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	36,99	3	12,33	3,33	0,077
Dentro das amostras	29,65	8	3,71		
Total	66,65	11	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência em (MPa)					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9919	0,6246	0,1275
B	s.S – h.P	0,9919		0,4740	0,0863
C	s.P – h.S	0,6246	0,4740		0,5855
D	s.P – h.P	0,1275	0,0863	0,5855	

(b)

Tabela A11: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 3 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a resistência em (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	10,41	3	3,47	0,85	0,5036
Dentro das amostras	32,58	8	4,07		
Total	42,99	11	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência em (MPa)					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9982	0,9056	0,8073
B	s.S – h.P	0,9982		0,9559	0,7203
C	s.P – h.S	0,9056	0,9559		0,4467
D	s.P – h.P	0,8073	0,7203	0,4467	

(b)

Tabela A12: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 14 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a resistência em (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	122,3	3	40,77	3,28	0,0795
Dentro das amostras	99,37	8	12,42		
Total	221,67	11	-		

(a)



Teste de Tukey					
Variável: resistência em (MPa)					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,0953	0,1222	0,1795
B	s.S – h.P	0,0953		0,9979	0,9667
C	s.P – h.S	0,1222	0,9979		0,9919
D	s.P – h.P	0,1795	0,9667	0,9919	

(b)

Tabela A13: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a resistência em (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	59,69	3	19,90	2,10	0,1783
Dentro das amostras	75,72	8	9,47		
Total	135,42	11	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência em (MPa)					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,5067	1,00	0,2543
B	s.S – h.P	0,5067		0,5187	0,9354
C	s.P – h.S	1,00	0,5187		0,2619
D	s.P – h.P	0,2543	0,9354	0,2619	

(b)

Tabela A14: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 90 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a resistência em (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	347,16	3	115,72	13,43	0,0017
Dentro das amostras	68,93	8	8,62		
Total	416,09	11	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência em (MPa)					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,0276	0,8258	0,1341
B	s.S – h.P	0,0276		0,0088	0,0013
C	s.P – h.S	0,8258	0,0088		0,409
D	s.P – h.P	0,1341	0,0013	0,409	

(b)

Tabela A15: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para a resistência em (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,16	3	0,053	2,62	0,1226
Dentro das amostras	0,16	8	0,020		
Total	0,32	11	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência em (MPa)					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9764	0,2492	0,9934
B	s.S – h.P	0,9764		0,1446	0,9988
C	s.P – h.S	0,2492	0,1446		0,1762
D	s.P – h.P	0,9934	0,9988	0,1762	

(b)

Os resultados da análise de variância para o módulo de elasticidade longitudinal, coeficiente de Poisson, da resistência à tração na flexão aos 28 dias das resinas geopoliméricas e a indicação dos valores diferidos significativamente, segundo o teste de Tukey, são mostrados nas Tabelas A16 a A18. Foram realizadas três repetições para cada resina geopolimérica.

Tabela A16: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para módulo de elasticidade (GPa)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	5,69	3	1,90	<b>279,9</b>	<b><math>1,95 \times 10^{-8}</math></b>
Dentro das amostras	0,05	8	0,007		
Total	5,74	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: módulo de elasticidade (GPa)

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		<b><math>2,63 \times 10^{-5}</math></b>	<b><math>1,98 \times 10^{-6}</math></b>	<b><math>1,38 \times 10^{-8}</math></b>
B	s.S – h.P	<b><math>2,63 \times 10^{-5}</math></b>		<b>0,011</b>	<b><math>4,21 \times 10^{-7}</math></b>
C	s.P – h.S	<b><math>1,98 \times 10^{-6}</math></b>	<b>0,011</b>		<b><math>3,73 \times 10^{-6}</math></b>
D	s.P – h.P	<b><math>1,38 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>4,21 \times 10^{-7}</math></b>	<b><math>3,73 \times 10^{-6}</math></b>	

(b)

Tabela A17: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados do coeficiente de Poisson aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para coeficiente de Poisson  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,0027	3	0,0009	<b>33,1</b>	<b><math>7,37 \times 10^{-5}</math></b>
Dentro das amostras	0,0002	8	$2,71 \times 10^{-5}$		
Total	0,0029	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: coeficiente de Poisson

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		<b>0,0002</b>	<b>0,0005</b>	<b><math>8,44 \times 10^{-5}</math></b>
B	s.S – h.P	<b>0,0002</b>		0,8595	0,6567
C	s.P – h.S	<b>0,0005</b>	0,8595		0,2776
D	s.P – h.P	<b><math>8,44 \times 10^{-5}</math></b>	0,6567	0,2776	

(b)

Tabela A18: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados da resistência à tração na flexão a 3 pontos aos 28 dias; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência à tração na flexão a 3 pontos (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	4,80	3	1,60	1,79	0,227
Dentro das amostras	7,14	8	0,89		
Total	11,94	11	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência à tração na flexão a 3 pontos (MPa)					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,8606	0,2305	0,3763
B	s.S – h.P	0,8606		0,5756	0,7887
C	s.P – h.S	0,2305	0,5756		0,9787
D	s.P – h.P	0,3763	0,7887	0,9787	

(b)

Os resultados da análise de variância para o módulo de cisalhamento das resinas, a resistência ao cisalhamento e o coeficiente de adesão substrato-resina, bem como a indicação dos valores diferidos significativamente, segundo o teste de Tukey, são mostrados nas Tabelas A19 a A26. Foram realizadas três repetições para cada tipo de resina geopolimérica e para a resina epóxi comercial.

Tabela A19: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento pelo método losipescu; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência ao cisalhamento (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	334,03	4	83,51	39,46	4,28x10 <sup>-6</sup>
Dentro das amostras	21,16	10	2,12		
Total	355,19	14	-		

(a)

**Teste de Tukey**  
Variável: resistência ao cisalhamento (MPa)

Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		0,1187	0,2401	0,2776	$3,59 \times 10^{-6}$
B	s.S – h.P	0,1187		0,987	0,9732	$4,29 \times 10^{-5}$
C	s.P – h.S	0,2401	0,987		1	$2,64 \times 10^{-5}$
D	s.P – h.P	0,2776	0,9732	1		$2,39 \times 10^{-5}$
E	R. epóxi	$3,59 \times 10^{-6}$	$4,29 \times 10^{-5}$	$2,64 \times 10^{-5}$	$2,39 \times 10^{-5}$	

(b)

Tabela A20: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados do módulo de cisalhamento pelo método Iosipescu; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

**Teste One-way ANOVA para módulo de cisalhamento (GPa)**  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	47,92	4	11,98	<b>8,26</b>	<b>0,0033</b>
Dentro das amostras	14,51	10	1,45		
Total	62,43	14	-		

(a)

**Teste de Tukey**  
Variável: Módulo de cisalhamento (GPa)

Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		0,5326	0,8999	0,9777	<b>0,0274</b>
B	s.S – h.P	0,5326		0,9474	0,2702	<b>0,0026</b>
C	s.P – h.S	0,8999	0,9474		0,62	<b>0,0073</b>
D	s.P – h.P	0,9777	0,2702	0,62		0,0657
E	R. epóxi	<b>0,0274</b>	<b>0,0026</b>	<b>0,0073</b>	0,0657	

(b)

Tabela A21: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência por cisalhamento duplo substrato-resina; (b) Teste de médias Tukey.

**Teste One-way ANOVA para resistência por cisalhamento duplo (MPa)**  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	6,62	4	1,66	<b>21,13</b>	<b><math>5,06 \times 10^{-6}</math></b>
Dentro das amostras	1,18	15	0,08		
Total	7,80	19	-		

(a)

Teste de Tukey						
Variável: Resistência por cisalhamento duplo (MPa)						
Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		0,0307	0,0004	0,7584	0,2816
B	s.S – h.P	0,0307		$1,83 \times 10^{-6}$	0,0031	0,0006
C	s.P – h.S	0,0004	$1,83 \times 10^{-6}$		0,0039	0,0213
D	s.P – h.P	0,7584	0,0031	0,0039		0,8984
E	R. epóxi	0,2816	0,0006	0,0213	0,8984	

(b)

Tabela A22: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência por cisalhamento duplo substrato-resina-chapa de aço; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência por cisalhamento duplo (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,41	4	0,10	34,5	$7,97 \times 10^{-6}$
Dentro das amostras	0,03	10	0,003		
Total	0,44	14	-		

(a)

Teste de Tukey						
Variável: Resistência por cisalhamento duplo (MPa)						
Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		$1,21 \times 10^{-5}$	0,9901	0,0770	0,8892
B	s.S – h.P	$1,21 \times 10^{-5}$		$1,84 \times 10^{-5}$	0,0003	$2,84 \times 10^{-5}$
C	s.P – h.S	0,9901	$1,84 \times 10^{-5}$		0,1524	0,9901
D	s.P – h.P	0,0770	0,0003	0,1524		0,2880
E	R. epóxi	0,8892	$2,84 \times 10^{-5}$	0,9901	0,2880	

(b)

Tabela A23: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados do coeficiente de aderência substrato-resina; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para coeficiente de aderência					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,021	4	0,0054	1,05	0,431
Dentro das amostras	0,052	10	0,0052		
Total	0,073	14	-		

(a)

Teste de Tukey						
Variável: coeficiente de aderência						
Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		0,9769	0,8397	0,9993	0,5658
B	s.S – h.P	0,9769		0,9898	0,9262	0,8644
C	s.P – h.S	0,8397	0,9898		0,7251	0,9843
D	s.P – h.P	0,9993	0,9262	0,7251		0,4436
E	R. epóxi	0,5658	0,8644	0,9843	0,4436	

(b)

Tabela A24: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina inclinada a 30° por *splitting test*; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	5,29	4	1,32	5,30	0,007
Dentro das amostras	3,74	10	0,25		
Total	9,03	14	-		

(a)

Teste de Tukey						
Variável: resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina (MPa)						
Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		0,8052	0,0463	0,0651	0,9950
B	s.S – h.P	0,8052		0,2982	0,3843	0,5897
C	s.P – h.S	0,0463	0,2982		0,9997	0,0223
D	s.P – h.P	0,0651	0,3843	0,9997		0,0318
E	R. epóxi	0,9950	0,5897	0,0223	0,0318	

(b)

Tabela A25: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina inclinada a 45° por *splitting test*; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	1,29	4	0,32	0,79	0,548
Dentro das amostras	6,10	10	0,41		
Total	7,39	14	-		

(a)

Teste de Tukey						
Variável: resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina (MPa)						
Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		1	0,8548	0,75	0,9997
B	s.S – h.P	1		0,8933	0,7997	0,9986
C	s.P – h.S	0,8548	0,8933		0,9995	0,765
D	s.P – h.P	0,75	0,7997	0,9995		0,6453
E	R. epóxi	0,9997	0,9986	0,765	0,6453	

(b)

Tabela A26: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina por *slant shear test*; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina (MPa)					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	590,03	4	147,51	35,23	7,24x10 <sup>-6</sup>
Dentro das amostras	41,88	10	4,19		
Total	631,91	14	-		

(a)

Teste de Tukey						
Variável: resistência ao cisalhamento na interface substrato-resina (MPa)						
Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		4,79x10 <sup>-5</sup>	0,9995	0,0002	0,0007
B	s.S – h.P	4,79x10 <sup>-5</sup>		3,89x10 <sup>-5</sup>	0,7308	0,2215
C	s.P – h.S	0,9995	3,89x10 <sup>-5</sup>		0,0001	0,0005
D	s.P – h.P	0,0002	0,7308	0,0001		0,8216
E	R. epóxi	0,0007	0,2215	0,0005	0,8216	

(b)

### A.3. Aderência

As Tabelas A27 a A35 mostram os resultados da análise de variância e o teste de Tukey para a resistência de aderência à tração na flexão das resinas geopoliméricas, conformação superficial e resistência de aderência das barras de aço em relação às resinas geopoliméricas. Foram realizadas três repetições para cada tipo de resina geopolimérica, exceto para os ensaios de aderência e conformação superficial das barras, em que foram feitas cinco repetições.



Tabela A27: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de resistência de aderência à tração na flexão dos substratos colados com resina; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência de aderência (MPa)  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	18,19	4	4,55	<b>6,43</b>	<b>0,008</b>
Dentro das amostras	7,08	10	0,71		
Total	25,26	14	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: resistência de aderência (MPa)

Series	Resina	A	B	C	D	E
A	s.S – h.S		0,862	0,2868	0,9809	<b>0,0076</b>
B	s.S – h.P	0,862		0,7851	0,9912	<b>0,0338</b>
C	s.P – h.S	0,2868	0,7851		0,5441	0,1903
D	s.P – h.P	0,9809	0,9912	0,5441		<b>0,0172</b>
E	R. epóxi	<b>0,0076</b>	<b>0,0338</b>	0,1903	<b>0,0172</b>	

(b)

Tabela A28: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de conformação superficial de barras lisas tipo CA-25  $\phi$  6,3mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para conformação superficial de barras  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	1,19	3	0,40	<b>10,45</b>	<b>0,0012</b>
Dentro das amostras	0,46	12	0,04		
Total	1,65	15	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: conformação superficial

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9926	<b>0,0025</b>	<b>0,0331</b>
B	s.S – h.P	0,9926		<b>0,0040</b>	0,0531
C	s.P – h.S	<b>0,0025</b>	<b>0,0040</b>		0,4751
D	s.P – h.P	<b>0,0331</b>	0,0531	0,4751	

(b)

Tabela A29: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) dos resultados de conformação superficial de barras nervuradas tipo CA-60  $\phi$  4,2mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para conformação superficial de barras  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,97	3	0,32	<b>9,99</b>	<b>0,0006</b>
Dentro das amostras	0,52	16	0,03		
Total	1,49	19	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: conformação superficial

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9672	<b>0,015</b>	<b>0,008</b>
B	s.S – h.P	0,9672		<b>0,006</b>	<b>0,003</b>
C	s.P – h.S	<b>0,015</b>	<b>0,006</b>		0,992
D	s.P – h.P	<b>0,008</b>	<b>0,003</b>	0,992	

(b)

Fonte: autoria própria.

Tabela A30: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Castro (2000), entre as resinas geopoliméricas e barras lisas tipo CA-25  $\phi$  6,3 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência de aderência  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,031	3	0,010	<b>22,23</b>	<b>5,97X10<sup>-6</sup></b>
Dentro das amostras	0,007	16	0,0005		
Total	0,038	19	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: resistência de aderência

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9708	<b>5,80x10<sup>-5</sup></b>	<b>0,002</b>
B	s.S – h.P	0,9708		<b>2,62x10<sup>-5</sup></b>	<b>0,001</b>
C	s.P – h.S	<b>5,80x10<sup>-5</sup></b>	<b>2,62x10<sup>-5</sup></b>		0,329
D	s.P – h.P	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	0,329	

(b)

Tabela A31: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Castro (2000), entre as resinas geopoliméricas e barras nervuradas tipo CA-60  $\phi$  4,2 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência de aderência  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,05	3	0,015	<b>27,82</b>	<b>1,39x10<sup>-6</sup></b>
Dentro das amostras	0,01	16	0,0005		
Total	0,06	19	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: resistência de aderência

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,6242	<b>6,45x10<sup>-5</sup></b>	<b>0,0004</b>
B	s.S – h.P	0,6242		<b>7,54x10<sup>-6</sup></b>	<b>3,94x10<sup>-5</sup></b>
C	s.P – h.S	<b>6,45x10<sup>-5</sup></b>	<b>7,54x10<sup>-6</sup></b>		0,7798
D	s.P – h.P	<b>0,0004</b>	<b>3,94x10<sup>-5</sup></b>	0,7798	

(b)

Tabela A32: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações da NBR 6118 (ABNT, 2014), entre as resinas geopoliméricas e barras lisas tipo CA-25  $\phi$  6,3 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência de aderência  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,0004	3	0,0001	<b>11,83</b>	<b>0,003</b>
Dentro das amostras	0,0001	8	1,15x10 <sup>-5</sup>		
Total	0,0005	11	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: resistência de aderência

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,4471	<b>0,028</b>	0,078
B	s.S – h.P	0,4471		<b>0,004</b>	<b>0,009</b>
C	s.P – h.S	<b>0,028</b>	<b>0,004</b>		0,886
D	s.P – h.P	0,078	<b>0,009</b>	0,886	

(b)

Tabela A33: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações da NBR 6118 (ABNT, 2014), entre as resinas geopoliméricas e barras nervuradas tipo CA-60  $\phi$  4,2 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência de aderência					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,002	3	0,001	<b>8,73</b>	<b>0,007</b>
Dentro das amostras	0,001	8	$6,97 \times 10^{-5}$		
Total	0,003	11	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência de aderência					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,6313	<b>0,0394</b>	0,1899
B	s.S – h.P	0,6313		<b>0,0077</b>	0,0343
C	s.P – h.S	<b>0,0394</b>	<b>0,0077</b>		<b>0,6860</b>
D	s.P – h.P	0,1899	0,0343	<b>0,6860</b>	

(b)

Tabela A34: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Silva (2015), entre as resinas geopoliméricas e barras lisas tipo CA-25  $\phi$  6,3 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência de aderência					
Tipo 1 – decomposição					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,016	3	0,005	<b>19,64</b>	<b><math>1,30 \times 10^{-5}</math></b>
Dentro das amostras	0,004	16	0,0003		
Total	0,020	19	-		

(a)

Teste de Tukey					
Variável: resistência de aderência					
Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,9975	<b><math>6,39 \times 10^{-5}</math></b>	<b>0,0017</b>
B	s.S – h.P	0,9975		<b><math>9,07 \times 10^{-5}</math></b>	<b>0,0025</b>
C	s.P – h.S	<b><math>6,39 \times 10^{-5}</math></b>	<b><math>9,07 \times 10^{-5}</math></b>		0,3553
D	s.P – h.P	<b>0,0017</b>	<b>0,0025</b>	0,3553	

(b)

Tabela A35: (a) Análise de variância (One-way ANOVA) da resistência de aderência, segundo equações de Silva (2015), entre as resinas geopoliméricas e barras nervuradas tipo CA-60  $\phi$  4,2 mm; (b) Teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

Teste One-way ANOVA para resistência de aderência  
Tipo 1 – decomposição

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Variância	F <sub>Calculado</sub>	Probabilidade
Entre as amostras	0,015	3	0,005	25,91	$2,21 \times 10^{-6}$
Dentro das amostras	0,003	16	0,0002		
Total	0,018	19	-		

(a)

Teste de Tukey  
Variável: resistência de aderência

Séries	Resina	A	B	C	D
A	s.S – h.S		0,414	0,0002	0,0007
B	s.S – h.P	0,414		$1,06 \times 10^{-5}$	$3,50 \times 10^{-5}$
C	s.P – h.S	0,0002	$1,06 \times 10^{-5}$		0,9034
D	s.P – h.P	0,0007	$3,50 \times 10^{-5}$	0,9034	

(b)

## ANEXO B

### B.1. Prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento

#### B.1.1. CEB-FIP MC90 (2010)

O CEB-FIPMC90 (2010) descreve o procedimento em projeto de ligações, no qual relaciona a resistência ao cisalhamento e deslizamento relativo entre materiais. Assim, a avaliação da resistência ao cisalhamento da ligação é calculada pelas Equações B.1 e B.2.

$$\tau_b = cf_{cta} + \mu(\rho_w f_{yd} + \sigma_n) < 0,25f_{cd} \quad (\text{B.1})$$

sendo,

$$f_{cta} = \frac{0,3f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} \quad (\text{B.2})$$

sendo,

$c$  o coeficiente de coesão;

$cf_{cta}$  a coesão entre as duas partes na ligação concreto-resina;

$\gamma_c = 1,5$  o coeficiente de minoração da resistência do concreto;

$\mu$  o coeficiente de atrito;

$\rho_w$  a taxa geométrica de armadura perpendicular à interface  $\geq 0,001$ ;

$f_{yd}$  a tensão de escoamento da armadura;

$\sigma_n$  a tensão normal à interface devido à ação de forças aplicadas (*slant shear*);

$f_{cd}$  a resistência a compressão do concreto;

$f_{ck}$  a resistência característica à compressão do concreto.

Para este estudo, os valores utilizados para  $c$  e  $\mu$  foram 0,1 e 0,5 (superfícies lisas), respectivamente, segundo as recomendações do CEB-FIP MC-90 (2010).

#### B.1.2. Eurocode 2 (2004)

Segundo o Eurocode 2 (2004), a resistência ao cisalhamento é calculada segundo as Equações B.3 e B.4.

$$\tau_b = cf_{ctd} + \mu(\sigma_n + \rho_w f_{yd}) \leq 0,30 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \quad (\text{B.3})$$

$$f_{ctd} = \frac{0,21 f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} \quad (\text{B.4})$$

sendo,

$c$  a coesão entre as duas partes na ligação concreto-resina;

$\gamma_c = 1,5$  o coeficiente de minoração da resistência do concreto;

$\mu$  o coeficiente de atrito;

$\sigma_n$  a tensão normal à interface devido à ação de forças aplicadas.

Neste estudo, os valores utilizados para  $c$  e  $\mu$  foram 0,35 e 0,60 (superfícies lisas), respectivamente, segundo as recomendações do Eurocode 2 (2004), sendo mostrados na Tabela B.1.

Tabela B.1: Valores de  $c$  e  $\mu$  de acordo com o Eurocode 2 (2004).

Tipos de superfície	$c$	$\mu$
Muito lisa	0,25	0,50
Lisa	0,35	0,60
Rugosa	0,45	0,70
Dentada	0,50	0,90

### **B.1.3. CAN/CSA A23.3-04 (2004)**

A equação B.5 é usada para calcular a resistência ao cisalhamento segundo as prescrições da norma CAN/CSA A23.3-04 (2004).

$$\tau_b = \lambda \phi_c [c + \mu(\rho_w f_y + \sigma_n)] < 0,25 \phi_c f_c \quad (\text{B.5})$$

sendo,

$\lambda$  o fator que considera a massa específica do concreto. Para concreto convencional é igual a 1,0; para concreto de agregado graúdo leve 0,85 e para o concreto leve 0,70;

$\phi_c = 0,65$  o coeficiente de minoração da resistência do concreto.

A coesão é função somente do tipo de superfície da interface, independentemente da resistência do concreto. Os valores de coesão ( $c$ ) e do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) para diferentes tipos de interface são mostrados na Tabela B.2. Neste estudo foram atribuídos os valores de 0,25 e 0,60, respectivamente, para a coesão e para o coeficiente de atrito.

Tabela B.2: Valores de  $c$  e  $\mu$ , segundo a CAN/CSA A23.3-04 (2004).

Tipos de superfície	$c$ (MPa)	$\mu$
Concreto monolítico	1,00	1,40
Limpa, rugosidade > 5 mm	0,50	1,00
Limpa, pouco rugosa	0,25	0,60
Concreto-aço	0	0,60

#### **B.1.4. NS 3473-04 (2004)**

Segundo a norma NS 3473-04 (2004), as interfaces podem ser classificadas como lisas, rugosas ou dentadas. Se as superfícies possuem depressões com profundidade superior a 2 mm ao longo da interface, são consideradas como rugosas. A Equação B.6 é utilizada para determinar a resistência ao cisalhamento de acordo com a norma supracitada.

$$\tau_b = \tau_{cd} + \mu(\rho_w f_{yd} + \sigma_n) \leq 0,30 f_{cd} \quad (\text{B.6})$$

sendo,

$\tau_{cd}$  a resistência ao cisalhamento do concreto, que deve ser levada em consideração somente para superfícies de contato limpas antes da concretagem e não submetidas a tensões de tração perpendiculares à interface.

A Tabela B.3 mostra  $\tau_{cd}$  e  $\mu$  recomendados pela NS 3473-04 (2004) em função da característica da interface. Os valores adotados para  $\tau_{cd}$  e  $\mu$  devem corresponder à combinação que leva à menor resistência ao cisalhamento da



ligação. Neste estudo a condição da superfície de contato foi considerada como lisa e os valores adotados foram  $\tau_{cd} = 0$  e  $\mu = 0,70$ .

Tabela B.3: Valores de  $\tau_{cd}$  e  $\mu$  de acordo com a NS 3473-04 (2004).

Superfície de contato	$\sigma_n \geq 0,4 \text{ MPa}$			
	Combinação 1		Combinação 2	
	$\tau_{cd}$	$\mu$	$\tau_{cd}$	$\tau_{cd}$
Lisa	0	0,70	0	0,70
Rugosa	0	1,50	$0,6 f_{ctd}$	0,80
Dentada	0	1,80	$1,5 f_{ctd}$	0,80

As Tabelas B.4 e B.5 mostram os valores médios experimentais e os teóricos calculados segundo as prescrições das normas para resistência ao cisalhamento do substrato-resina e substrato-resina-aço. Todos estes valores médios são mostrados no item 4.3.2.10 (Figuras 4.34 e 4.35).

Tabela B.4: Valores médios experimentais e das prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resina).

Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) CEB-FIB (2010)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	19,14	5,81	3,3
s.S – h.P	4,79	1,66	2,9
s.P – h.S	19,49	5,88	3,3
s.P – h.P	6,86	2,22	3,1
Resina epóxi	8,63	2,75	3,1
Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) Eurocode 2 (2004)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	19,14	7,62	2,5
s.S – h.P	4,79	2,64	1,8
s.P – h.S	19,49	7,65	2,5
s.P – h.P	6,86	3,22	2,1
Resina epóxi	8,63	3,89	2,2
Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) CAN/CSA A23.3 (2004)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	19,14	4,47	4,3
s.S – h.P	4,79	1,24	3,9
s.P – h.S	19,49	4,55	4,3
s.P – h.P	6,86	1,71	4,0
Resina epóxi	8,63	2,11	4,1
Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) NS 3473-04 (2004)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	19,14	7,73	2,5
s.S – h.P	4,79	1,94	2,5
s.P – h.S	19,49	7,88	2,5
s.P – h.P	6,86	2,77	2,5
Resina epóxi	8,63	3,49	2,5

Tabela B.5: Valores médios experimentais e das prescrições das normas para a resistência ao cisalhamento (substrato-resina-aço).

Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) CEB-FIB (2010)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	3,13	1,19	2,6
s.S – h.P	2,04	0,87	2,3
s.P – h.S	2,36	0,94	2,5
s.P – h.P	2,15	0,86	2,5
Resina epóxi	10,58	3,31	3,2
Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) Eurocode 2 (2004)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	3,13	1,61	1,9
s.S – h.P	2,04	1,29	1,6
s.P – h.S	2,36	1,32	1,8
s.P – h.P	2,15	1,23	1,7
Resina epóxi	10,58	3,70	2,9
Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) CAN/CSA A23.3 (2004)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	3,13	0,87	3,6
s.S – h.P	2,04	0,62	3,3
s.P – h.S	2,36	0,69	3,4
s.P – h.P	2,15	0,64	3,4
Resina epóxi	10,58	2,55	4,1
Resinas	$\tau b_{exp}$ (MPa)	$\tau b_{norma}$ (MPa) NS 3473-04 (2004)	$\tau b_{exp} / \tau b_{norma}$
s.S – h.S	3,13	1,27	2,5
s.S – h.P	2,04	0,83	2,5
s.P – h.S	2,36	0,95	2,5
s.P – h.P	2,15	0,87	2,5
Resina epóxi	10,58	4,28	2,5